



COMISION NACIONAL
DEL AGUA



IMTA
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGIA DEL AGUA

Manual de diseño e instalación de drenaje parcelario en zonas áridas y semiáridas bajo riego



Manual de diseño e instalación de drenaje parcelario en zonas áridas y semiáridas bajo riego

Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca

Secretaria
M.C. Julia Carabias Lillo

Comisión Nacional del Agua

Director General
Ing. Guillermo Guerrero Villalobos

Director General Adjunto
Ing. Daniel Ruiz Fernández

Subdirector General de Operación
Ing. César Octavio Ramos Valdés

Gerente de Distritos y Unidades de Riego
Dr. Luis Rendón Pimentel

Subgerente de Ingeniería de Riego y Drenaje
Ing. Carlos Barocio Fregoso

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Director General
Dr. Álvaro Alberto Aldama Rodríguez

Coordinador de Tecnología de Riego y Drenaje
Dr. Benjamín de León Mojarro

Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola
Dr. Carlos Fuentes Ruiz

Especialista en Hidráulica
Dr. Arturo González Casillas

Secretario Técnico
Ing. Fernando Fragoza Díaz



Manual de diseño e instalación de drenaje parcelario en zonas áridas y semiáridas bajo riego

AUTORES

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Felipe Benjamín de León Mojarro
Carlos Fuentes Ruiz
Arturo González Casillas
Pedro Rigoberto Lázaro Chávez
Oscar Lemus Ramírez
José Rodolfo Namuche Vargas
Héber Eleazar Saucedo Rojas
Felipe Zataráin Mendoza

Universidad Autónoma Chapingo y CP

Oscar Luis Palacios Vélez
Félix Alberto Llerena Villalpando
Iouri Nikolski Gavrilov
Cesáreo Landeros Sánchez

Comisión Nacional del Agua

Luis Rendón Pimentel
Ildfonso de la Peña de la Torre
Carlos Barocio Fregoso

Diciembre de 1998

Título:

Manual de diseño e instalación de drenaje parcelario en zonas áridas y semiáridas bajo riego

Integración, edición y reproducción:

Departamento de Irrigación, UACH
F. Alberto Llerena V.

Revisión literaria y cuidado editorial:

Subcoordinación de Editorial y Gráfica, IMTA
Jesús Hernández Sánchez
Daniel Murillo Licea

Diseño de portada:

F. Alberto Llerena V., UACH

©Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1998
ISBN 968-7417-25-0

Reservados todos los derechos. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio, mecánico, eléctrico, de fotocopia, térmico u otros sin permiso del IMTA.

Paseo Cuauhnáhuac 8532, Progreso, Jiutepec, Morelos,
C.P. 62550
Tel: (73) 19-40-00, ext. 727
Fax: (73) 19-39-46

Hecho en México
Made in Mexico

MENSAJE

Dentro de las múltiples funciones que tiene a cargo la Comisión Nacional del Agua (CNA), está el fomentar, desarrollar y conservar todas las obras de infraestructura hidroagrícola existentes en el país. Acorde a éstas políticas, la institución efectúa acciones encaminadas a difundir y promover las diferentes tecnologías que se desarrollan o validan en los organismos y dependencias auxiliares de este sector, para mejorar, potenciar y mantener la productividad de las áreas bajo riego.

En este marco de referencia, la CNA ha iniciado programas para disminuir el impacto negativo que se presenta en las áreas productivas bajo riego que se deriva por la elevación de los niveles freáticos y el ensalitramiento de los suelos. Entre las principales acciones que se están realizando para contrarrestar dicha problemática, ha sido el establecer, promover y apoyar programas nacionales para fomentar el establecimiento de drenaje parcelario y el uso de prácticas asociadas.

Por otra parte y considerando la situación adversa que se presenta actualmente en el país por la insuficiencia de recursos, motiva la necesidad de establecer mecanismos que permitan la conjunción de esfuerzos para contrarrestar la problemática que se presenta en dichas áreas bajo riego, sin que se eluda la corresponsabilidad técnica y económica que tiene esta institución para atender las necesidades existentes.

Por todo lo anterior, la CNA procedió a elaborar el presente manual de drenaje parcelario, con la finalidad de facilitar a los usuarios la elaboración directa de los proyectos en los casos que así lo consideren, esperando contribuir de manera importante en la solución de la problemática particular descrita.

Ing. Guillermo Guerrero Villalobos
Director General de la Comisión Nacional del Agua

México, D. F., diciembre de 1998

PRESENTACIÓN

Las áreas agrícolas bajo riego en México son de gran importancia por su alta participación en la producción nacional. Dentro de ellas, los distritos de riego han destacado por las grandes superficies que agrupan y por su organización actual de administración transferida por la CNA a los usuarios.

Por lo anterior, los diferentes problemas que han surgido en los distritos de riego han sido paulatinamente corregidos como parte de los compromisos contraídos por la CNA con los usuarios en el marco de dicha transferencia. Sin embargo, prevalece en grandes superficies la problemática de salinidad y drenaje (que en general se manifiesta de manera conjunta), de tal manera que se estima que actualmente existen 500,000 hectáreas ensalitradas y 475,000 hectáreas con niveles freáticos someros.

Parte de su solución implica el contar con la herramienta metodológica adecuada al alcance de las diferentes técnicas involucradas. En el caso del tema de drenaje parcelario con técnicas modernas, no se tenía un manual práctico por ser acciones que han resurgido recientemente.

Por ello, la Comisión Nacional del Agua (CNA) se dio a la tarea de reunir a un grupo de especialistas de la propia CNA así como del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y del Colegio de Postgraduados (CP), con el propósito de conjuntar las experiencias exitosas ya obtenidas en los distritos de riego y plasmarlas de manera sencilla en un manual para el diagnóstico, diseño, instalación, supervisión y evaluación de sistemas de drenaje parcelario en zonas árida y semiáridas bajo riego.

Es deseo de esta Sudirección General, el lograr el objetivo planteado de hacer llegar al mayor número posible de técnicos las metodologías y experiencias aquí vertidas, como una modesta participación para resolver la problemática existente en la agricultura bajo riego de México y el mundo.

Ing. César Octavio Ramos Valdés
Subdirector General de Operación de la CNA

México, D. F., diciembre de 1998

PRÓLOGO

El riego y el drenaje son dos prácticas agrícolas que complementan la regulación del régimen de humedad y del contenido de sales en el suelo. Con estas prácticas se adapta el contenido de agua del suelo a la variabilidad temporal de las necesidades hídricas de los cultivos y se mantiene la salinidad en niveles tolerables por los cultivos.

La aplicación del riego como práctica agrícola principal en los distritos de riego ubicados en las zonas áridas y semiáridas de México, ha provocado un ensalitramiento progresivo en 500,000 hectáreas y la elevación de los niveles freáticos en 475,000 hectáreas. Esta situación ha reducido la frontera agrícola y el rendimiento nacional, ya que las tierras se han dejado de cultivar o se ha disminuido su producción de manera considerable en relación con aquellas sin problemas de salinidad o de drenaje.

Para resolver estos problemas, la Comisión Nacional del Agua (CNA) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARD), han instrumentado programas nacionales de apoyo a la producción agrícola como el Programa de Desarrollo Parcelario (PRODEP) y los de la Alianza para el Campo, los cuales destinan recursos complementarios a las aportaciones de los productores para realizar estudios y proyectos y ejecutar acciones de recuperación de suelos mediante la instalación de drenaje parcelario combinado con prácticas físicas, hidrotécnicas, químicas y biológicas.

Los resultados obtenidos con estos programas han estimulado el interés y la participación de los productores, lo cual ha propiciado que en los últimos tres años se hayan instalado sistemas de drenaje parcelario en aproximadamente 10,000 hectáreas en los distritos de riego del país.

Para el diagnóstico, diseño, instalación y evaluación de sistemas de drenaje parcelario, se requiere que los técnicos de los distritos de riego, de las asociaciones usuarios y de las empresas prestadoras de servicios, dispongan de herramientas que integren las metodologías de elaboración y supervisión de este tipo de proyectos.

La CNA solicitó al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) la elaboración de un manual de diseño e instalación de drenaje parcelario en zonas áridas y semiáridas bajo riego. En este manual se integran los conocimientos y las experiencias de técnicos nacionales y del extranjero sobre procedimientos de diseño, instalación, supervisión de obra y evaluación de sistemas de drenaje.

El manual se elaboró bajo la supervisión técnica de la CNA y con la colaboración de investigadores de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas de Montecillo, México (CP), lo cual permitió integrar diferentes técnicas de la ingeniería agronómica y civil.

De manera especial se agradece a la Subdirección General de Operación de la CNA la confianza depositada en la Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje para la elaboración del manual. De igual manera deseo expresar mi reconocimiento a la participación de los técnicos e investigadores de la Gerencia de Distritos y Unidades de Riego de la CNA, del Departamento de Irrigación de la UACH, del Programa de Hidrociencias del CP y de la Subcoordinación de Editorial y Gráfica del IMTA.

Finalmente, un agradecimiento especial a cada uno de los autores por sus aportaciones técnicas y su disposición a incorporar las observaciones y modificaciones sugeridas durante la elaboración del manual.

Dr. Benjamín de León Mojarro
Coordinador de Tecnología de Riego y Drenaje del IMTA

Jiutepec, Morelos, diciembre de 1998

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	
PRÓLOGO	
1. INTRODUCCIÓN	1
2. IDENTIFICACIÓN DE PROBLEMAS DE DRENAJE EN LOS DISTRITOS DE RIEGO	3
2.1. Conceptos básicos	3
2.2. Identificación y ubicación de problemas de salinidad y drenaje en un distrito o módulo de riego	4
2.2.1. Clasificación cualitativa de la red de canales	4
2.2.2. Clasificación cualitativa de la red general de drenaje	5
2.2.3. Estudios generales	5
a) Topografía	5
b) Estudio agrológico	8
c) Estudio general de salinidad analizada	8
d) Estudio general de freaticimetría	8
2.2.4. Selección de zonas para proyectos de drenaje parcelario	10
2.3. Estudios en las parcelas	11
2.3.1. Acopio de información	11
2.3.2. Visitas a las parcelas	11
2.3.3. Freaticimetría local	11
2.3.4. Suelos	11
2.3.5. Diagnóstico	13
2.3.6. Parcelas de referencia	13
3. DISEÑO DEL DRENAJE PARCELARIO	15
3.1. Información requerida	15
3.1.1. Topografía	15
3.1.2. Infraestructura existente	15
3.1.3. Freaticimetría	16
3.1.4. Suelos	16
3.2. Parámetros de diseño	17
3.2.1. Conductividad hidráulica	17
3.2.2. Porosidad drenable	20
3.2.3. Módulo de drenaje	20
3.2.4. Profundidad del hidroapoyo	21
3.2.5. Profundidad deseada del manto freático	21
3.2.6. Profundidad mínima de los drenes	22
3.2.7. Diámetro de tubería de los drenes con fines de diseño	22
3.3. Diseño en planta	22
3.3.1. Espaciamiento entre drenes	22
A. Régimen permanente	22
B. Régimen transitorio	24
3.3.2. Trazo de drenes y colectores	24

CONTENIDO

3.4. Diseño en perfil	25
3.5. Cálculos hidráulicos	26
3.6. Materiales y accesorios	27
3.6.1. Tubería de drenaje	27
3.6.2. Accesorios	27
3.6.3. Filtros	28
3.7. Justificación económica	29
3.7.1. Costos	29
3.7.2. Estimación de beneficios	29
3.7.3. Indicadores económicos	29
3.7.4. Relación beneficio costo (RBC)	29
3.7.5. Tasa interna de retorno (TIR)	30
3.8. Presentación del proyecto	30
3.8.1. Memoria técnica	30
3.8.2. Plano de construcción de la red de drenaje (colectores y laterales)	30
3.8.3. Especificaciones técnica	31
3.9. Ejemplo del diseño	31
3.9.1. Determinación y cálculo de la conductividad hidráulica	31
3.9.2. Cálculo del espaciamiento entre drenes	32
A. Régimen permanente	32
B. Régimen transitorio	33
3.9.3. Ubicación de los drenes en el plano	34
3.9.4. Cálculos de gasto, diámetro y velocidad del agua en la tubería	34
4. INSTALACIÓN Y SUPERVISIÓN DE LA OBRA EN CAMPO	37
4.1. Maquinaria y Equipo	37
4.1.1. Maquinaria	37
4.1.2. Equipo de apoyo	40
4.2. Trazo en campo	41
4.2.1. Localización de las descargas en planta y en perfil	41
4.2.2. Trazo de colectores	41
4.2.3. Trazo de los drenes laterales	41
4.3. Instalación y supervisión de la obra en campo	41
4.3.1. Instalación del sistema de drenaje	41
4.3.2. Supervisión de la obra en campo	44
4.4. Métodos modernos para supervisar la instalación de drenaje	46
4.4.1. Uso de materiales de calidad certificada	46
4.4.2. Método <i>rodding</i>	46
4.4.2. Métodos de Collins-Schaffer y <i>Consoil profiling</i>	47
5. PRÁCTICAS CULTURALES ASOCIADAS CON EL DRENAJE PARCELARIO	49
5.1. Prácticas mecánicas	49
5.2. Prácticas hidrotécnicas	50
5.2.1. Sobre-riego o fracción de lavado	51
5.2.2. Lámina de lavado	51
5.3. Prácticas químicas	53
5.4. Prácticas biológicas	54
5.5. Selección y manejo de cultivos en suelos en procesos de mejoramiento o de rehabilitación	54

CONTENIDO

6. EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE DRENAJE PARCELARIO	57
6.1. Verificación del funcionamiento de sistemas de drenaje	57
6.2. Evaluación agronómica	58
6.3. Evaluación económica	60
6.4. Evaluación hidráulica	60
6.4.1. Medición del gasto en los laterales	61
6.4.2. Medición de la posición del manto freático	62
6.4.3. Estimación del módulo de drenaje	63
6.4.4. Estimación de la conductividad hidráulica a saturación	63
6.4.5. Criterios de evaluación	64
6.5. Régimen de salinidad del suelo	64
7. MANTENIMIENTO DE SISTEMAS DE DRENAJE PARCELARIO	65
7.1 Inspección del sistema de drenaje	65
7.2. Principales causas que afectan el funcionamiento de un sistema de drenaje	66
7.3. Tipos de taponamiento	66
7.3.1. Taponamiento bioquímico	66
7.3.2. Taponamiento mineral	67
7.3.3. Taponamiento por raíces	67
7.4. Métodos de limpieza	67
7.4.1 Inyección de agua a presión	67
7.4.2. Limpieza con soluciones químicas	70
7.5. Conservación de estructuras auxiliares del drenaje entubado	70
7.6. Conservación de drenes abiertos	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. Ejemplo de eficiencia de conducción o pérdidas por filtración de la red de canales en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa	6
Plano 2. Ejemplo del funcionamiento real de la red de drenaje en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa	7
Plano 3. Ejemplo de configuración de las isobatas para febrero de 1995 en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa	9
Plano 4. Ejemplo de configuración de las isohypsas para febrero de 1995 en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa	10
Plano 5. Selección de zonas para el establecimiento de sistemas de drenaje parcelario	12
Plano 6. Diseño detallado de drenaje parcelario	35

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Foto 1. Dren de la red general en condiciones adecuadas en donde se señala la descarga de un colector parcelario	16
Foto 2. Determinación de la conductividad hidráulica por el método del pozo de barrena	17
Foto 3. Recipiente cilíndrico para extraer el agua del pozo	18
Foto 4. Tubería de drenaje	27
Foto 5. Coples tipo "T" o de unión y tapones	27
Foto 6. Diferentes accesorios de drenaje parcelario	28
Foto 7. Diferentes tipos de filtros	28
Foto 8. Zanjadora de cadena	38
Foto 9. Arado de drenaje tipo cincel ó subsuelo	38
Foto 10. Arado de drenaje tipo "V" o delta	39
Foto 11. Uso de dos tractores durante la instalación del drenaje parcelario	40
Foto 12. Borrado de la berma de un dren a cielo abierto	42
Foto 13. Inicio de la instalación de un colector	43
Foto 14. Zanja para conectar un lateral a un colector	43
Foto 15. Zanjadora iniciando la instalación de un lateral	44
Foto 16. Colocación del tapón al final de un lateral	45
Foto 17. Equipo <i>rodding</i>	46
Foto 18. Cabezal del <i>rodding</i>	47
Foto 19. Equipo Collins-Schaffer	48
Foto 20. Equipo <i>Consoil profiling</i>	46
Foto 21. Subsoleo	50
Foto 22. Aplicación de lavados	52
Foto 23. Aplicación de yeso	54
Foto 24. Incorporación de materia orgánica al suelo	55
Foto 25. Desarrollo del cultivo de trigo	56
Foto 26. Etapa final del cultivo	56
Foto 27. Estado de un lote antes de instalarse el drenaje parcelario	59
Foto 28. Estado del lote de la foto 6-5 después de instalarse el sistema de drenaje parcelario	59
Foto 29. Medición del gasto en la descarga	61
Foto 30. Medición del nivel freático	62
Foto 31. Tramo de dren lateral con filtro geotextil mostrando taponamiento con partículas finas	66
Foto 32. Equipo de inyección de agua a presión para limpieza de drenes entubados	67
Foto 33. Boquillas para inyectar agua a presión	68
Foto 34. Fosa para limpieza con inyección de agua	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2-1. Clases de suelo por contenido de sales	8
Cuadro 3-1. Valores de la conductividad hidráulica (K) en función de la textura y estructura	20
Cuadro 3-2. Valores del módulo de drenaje (q) en función de la conductividad hidráulica (K), de la salinidad del suelo (CE) y del método de riego	21
Cuadro 3-3. Valores del coeficiente δ para el cálculo del espaciamiento entre drenes en función de los coeficientes Δ y λ	23
Cuadro 3-4. Lecturas de la determinación de la conductividad hidráulica	31
Cuadro 3-5. Cálculo del espaciamiento entre drenes	33
Cuadro 3-6. Especificaciones técnicas del proyecto	36
Cuadro 5-1. Prácticas mecánicas recomendadas para diferentes condiciones de textura y salinidad del suelo	50
Cuadro 5-2. Efecto de la salinidad del suelo (CE_{sf}) en el rendimiento potencial de algunos cultivos	51
Cuadro 5-3. Valores de la fracción de lavado y de la lámina de riego total neta ($LRT=ET+FL$)	51
Cuadro 5-4. Valores de α para diferentes contenidos de cloruros y textura del suelo (cm)	52

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1. Ejemplo de gráfica áreas-tiempo	9
Ilustración 3-1. Esquema del método del pozo de barrena	19
Ilustración 3-2. Relación entre la porosidad drenable (μ) y la conductividad hidráulica (K), adaptada del Drainage Manual (1991)	21
Ilustración 3-3. Ejemplo de trazo de drenaje	25
Ilustración 6-1. Gráfica de gasto contra tiempo en un dren subterráneo	63
Ilustración 6-2. Gráfica de h contra q/h	64

Capítulo 1

Introducción

Los problemas de ensalitramiento o de mantos freáticos someros que se presentan en el ámbito mundial de las áreas agrícolas bajo riego, son de gran importancia por el impacto negativo que tienen en los procesos productivos y por las extensas superficies en las que inciden. Se estima que existen más de 45 millones de ha afectadas, de las aproximadamente 240 millones hectáreas que se riegan en todo el mundo (Dregne *et al*, 1992).

Esta situación se agrava aún más, debido a que en las áreas bajo riego se obtiene un alto porcentaje de la producción agrícola mundial, por lo cual se han efectuado grandes inversiones en la construcción de la infraestructura requerida para la aplicación de los riegos.

En el caso de México, en 1996 se estimó que existían aproximadamente 500 mil hectáreas afectadas por salinidad y drenaje inapropiado (de la Peña, 1996). En su mayoría se localizan en los 3.2 millones de hectáreas que cubren

los distritos de riego de las zonas áridas y semiáridas del país, de los 6 millones de hectáreas que existen bajo riego.

La causa principal de esta problemática es la elevación de los niveles freáticos (cerca del 85% de la superficie afectada a nivel nacional) y, en menor grado, el uso de aguas contaminadas por sales o la combinación de ambos (Llerena, 1993).

Destaca, por su magnitud, la situación que se presenta en los distritos de riego por gravedad que se localizan en las planicies costeras (63% del total nacional), cuyas condiciones topográficas propician que en las zonas bajas se dificulte el funcionamiento de la red general de drenaje, ocasionando niveles freáticos someros y salinidad en los suelos.

Dentro de dicha problemática, sobresale la de la región noroeste, en especial en los estados de Sinaloa y Sonora en los que se reporta que existen 120 mil y 60 mil hectáreas afectadas respectivamente (de la Peña, 1996).

Para rehabilitar la mayoría de estas áreas y lograr un incremento sostenido en su productividad, se requieren sistemas de drenaje parcelario.

Durante 1997 la Comisión Nacional del Agua (CNA), a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), elaboró tres proyectos ejecutivos para la recuperación de 10,000 hectáreas con problemas de salinidad y drenaje, en tres de los distritos de riego ubicados en el noroeste del país: 5,000 hectáreas en el distrito 038, Navojoa, Sonora, 2,800 hectáreas en el distrito 076, Valle del Carrizo, Sinaloa, y 2,200 ha en el distrito 018, Colonias Yaquis, Sonora (González, 1997, Namuche, 1997 y Llerena y González, 1997).

La instalación de drenaje parcelario se incluyó en estos proyectos, como una de las principales soluciones para la recuperación o mejoramiento de las parcelas afectadas.

El objetivo primordial del drenaje es prevenir y combatir los problemas de niveles freáticos elevados y los de salinidad. Su importancia radica en que el drenaje parcelario propicia un adecuado balance de humedad, aire y sales, en la capa de suelo donde se desarrollan los cultivos.

En el caso de los distritos de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa y 038, Río Mayo, Sonora, se ha iniciado la instalación del drenaje parcelario y la aplicación de los programas para mejorar y recuperar suelos afectados por sales.

Para ayudar a la elaboración de proyectos ejecutivos y de diseño de drenaje parcelario, la CNA consideró necesario contar con un documento sobre los principales aspectos de tecnología aplicada sobre el tema, por lo que le solicitó al IMTA la conformación de un grupo de especialistas en la materia, para elaborar un manual que cubriera los siguientes objetivos básicos:

- a) Reunir y sintetizar la tecnología apropiada para el diseño e instalación de sistemas de drenaje parcelario en zonas áridas y semiáridas bajo riego.
- b) Integrar procedimientos básicos y prácticos en los diferentes aspectos de diseño, instalación, operación, evaluación y mantenimiento de sistemas de drenaje parcelario.
- c) Ilustrar algunos de estos procedimientos con ejemplos aplicados con éxito en México.
- d) Servir como herramienta de consulta y guía para facilitar el trabajo de los técnicos de la CNA, de usuarios y de particulares que se enfrentan con problemas prácticos de drenaje en los distritos de riego.
- e) Orientar a los usuarios sobre los conceptos básicos del drenaje para que puedan participar en todo el proceso de manera más preparada y consciente, coadyuvando a que operen adecuadamente el sistema que se instale en su parcela, así como a tener mayor seguridad de que su inversión será redituable y efectiva.

El presente manual no pretende abarcar de manera exhaustiva temas que son examinados en otras publicaciones de carácter educativo y de investigación (IMTA, 1992; IMTA; 1995; González, 1998).

Se compone de siete capítulos: el primero corresponde a la introducción; en el segundo se tratan los aspectos relacionados con la identificación de los problemas de drenaje y salinidad de los suelos bajo riego; el tercero aborda el diseño de un proyecto de drenaje e incluye aspectos sobre la información requerida, los parámetros y procedimiento del diseño, la justificación económica y presenta un ejemplo; en el cuarto capítulo se describen los diferentes tipos de maquinaria y equipo de construcción, los aspectos operativos y de supervisión, durante la instalación en campo; el quinto se refiere a las prácticas culturales asociadas con el drenaje parcelario; el sexto plantea los procedimientos de evaluación del drenaje; y el séptimo trata sobre el mantenimiento y conservación de los sistemas de drenaje parcelario.

Capítulo 2

Identificación de problemas de drenaje en los distritos de riego

En este capítulo se presentan los criterios metodológicos de la Comisión Nacional del Agua para definir el funcionamiento de la infraestructura hidroagrícola, y evaluar los impactos negativos en la productividad de los distritos de riego. Entre estos impactos destacan, por su gravedad, las deficiencias de drenaje y los procesos de ensalitramiento de los suelos (Barocio, 1998).

También se enuncian algunas definiciones básicas en relación con el drenaje agrícola en los distritos de riego y se describe una metodología para la identificación de los problemas de drenaje y salinidad, tanto a escala regional de distrito de riego o módulo de riego a cargo de cada Asociación Civil de usuarios, como a la escala de zona compacta o de parcela que permitirán decidir sobre la conveniencia de instalar drenaje parcelario.

2.1. Conceptos básicos

En general, el drenaje agrícola se define como la remoción de los excesos de agua superficial y subsuperficial para favorecer el desarrollo de los cultivos, incluyendo la remoción de las sales solubles del suelo (Bos y Boers, 1994).

Uno de los aspectos más sorprendentes de los problemas de drenaje, es la rapidez con la que aparecen después de incorporar una zona árida o semiárida a una agricultura de riego, ya que ello implica una modificación radical del régimen de humedad de los suelos.

Para la solución de un problema de drenaje agrícola, es básica la identificación y detección oportuna de aquellas señales o indicios que revelen la presencia de niveles freáticos muy cercanos a la superficie del suelo.

El principal indicio de un problema de este tipo, es una disminución del rendimiento de los cultivos agrícolas atribuible a la salinidad del suelo, ocasionada por un alto nivel freático. Esto significa que durante una buena parte del año, dicha profundidad es inferior a 1.5 m e inclusive inferior a 1 m, en casos más graves.

La causa primaria de esta elevación de los niveles freáticos son las pérdidas del agua de riego, principalmente en canales no revestidos y en las parcelas de riego con manejo deficiente, que incrementan la recarga del manto freático, formado en condiciones naturales por la fracción de la lluvia que se percola.

Algunas veces, la nueva recarga supera a la capacidad de drenaje natural, por lo que el nivel freático empieza a ascender y a participar activamente en los procesos de evaporación, provocando la salinización del suelo. Esto disminuye e incluso llega a impedir la producción agrícola.

Dichos excesos de agua pueden removerse de manera natural, mediante los siguientes procesos:

- ◆ Por escurrimiento superficial, cuando las pendientes del terreno son adecuadas y en cauces naturales.
- ◆ Por escurrimiento subterráneo.
- ◆ Por medio de percolación profunda, cuando los suelos son permeables y existen acuíferos con nivel piezométrico menor que el nivel freático medio.

A este conjunto de procesos se les conoce como "drenaje natural". Convencionalmente también puede considerarse como drenaje natural, la función que realiza la red general de colectores.

Cuando el drenaje natural no es suficiente para mantener abatidos los mantos freáticos de forma adecuada, de acuerdo con el uso agrícola de las tierras, requerirse un "drenaje artificial", también llamado "drenaje parcelario", o "drenaje complementario" del drenaje natural.

El drenaje parcelario normalmente está constituido por una tubería de plástico

instalada dentro del terreno y por debajo de los niveles freáticos. También puede establecerse por medio de zanjas a cielo abierto, las que se usan cada vez menos debido a que ocupan área agrícola, dificultan las labores de cultivo y requieren un mantenimiento frecuente.

La extracción de aguas subterráneas mediante bombeo tiene un efecto muy acentuado en el abatimiento de niveles freáticos. A este efecto se le conoce como "drenaje vertical" para diferenciarlo del drenaje por tuberías o por zanjas, al que se le puede llamar "drenaje horizontal". En algunos casos, su efecto es tan marcado que puede resultar innecesario construir un sistema de drenaje parcelario.

En general, la rehabilitación de los terrenos afectados por mantos freáticos someros o salinidad requiere, en primer lugar, un diagnóstico general que permita identificar, cuantificar y clasificar las áreas afectadas en un distrito o un módulo de riego y, en segundo lugar, estudios particulares en la escala de parcela o grupo de parcelas, que permitirán decidir sobre la conveniencia de instalar drenaje parcelario.

2.2. Identificación y ubicación de problemas de salinidad y drenaje en un distrito o módulo de riego

El diagnóstico de los problemas de drenaje en un distrito o módulo de riego se realiza de la siguiente manera:

- a) Clasificación del funcionamiento real de la infraestructura hidroagrícola del distrito de riego, con base en dos criterios (Barocio, 1998):
 - ◆ Clasificación cualitativa de la red de canales considerando pérdidas de conducción, impacto en el drenaje y procesos de ensalitramiento.
 - ◆ Clasificación cualitativa de la red general de drenaje de acuerdo a su funcionamiento.
- b) Delimitación de áreas afectadas en su productividad agrícola por problemas de salinidad y drenaje, con base en estudios generales (topográficos, agrológicos, de salinidad y freáticos).

2.2.1. Clasificación cualitativa de la red de canales

Conocer el funcionamiento de la red de distribución es de gran importancia en la identificación de los problemas de drenaje en los distritos de riego, ya que las pérdidas de conducción en los canales constituyen una de las principales fuentes de alimentación de los mantos freáticos.

Por lo tanto, los diversos planos que se integran para este fin son una herramienta muy valiosa para detectar y ubicar las fuentes de recarga del nivel freático, y relacionarlas con los procesos de ensalitramiento de los suelos.

La identificación de tramos donde se tienen pérdidas de agua, se deriva de la elaboración y análisis del plano de clasificación cualitativa de pérdidas de agua en la red de distribución.

Los planos de clasificación cualitativa de la red de canales se elaboran de acuerdo a los siguientes criterios:

- i) Se dibujan en color verde los canales en buen estado, es decir, aquellos que tienen pérdidas de agua en la conducción, menores al 20 por ciento.
- ii) En color amarillo los canales que presentan pérdidas de agua en la conducción, entre un 20 y 35 por ciento.
- iii) En color rojo los canales en mal estado, es decir, aquellos que tienen pérdidas de agua en la conducción mayores al 35 por ciento.

Una estimación de las pérdidas de los canales puede ser proporcionada por los operadores de los mismos.

Como ejemplo, se presenta el plano 1 que muestra la eficiencia de conducción o pérdidas por filtración de la red de canales en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa.

También es de gran utilidad elaborar un plano para la clasificación de los tramos de canales revestidos, entubados o en tierra, tanto de la red general como de la interparcelaria, dibujando en color azul los canales revestidos de concreto o asfalto, en rojo los canales

alojados en tierra y en color verde los canales entubados.

2.2.2. Clasificación cualitativa de la red general de drenaje

Siguiendo un procedimiento análogo al de la red de distribución, se elaboran planos en los que se muestre el funcionamiento y estado de conservación de los drenes a cielo abierto:

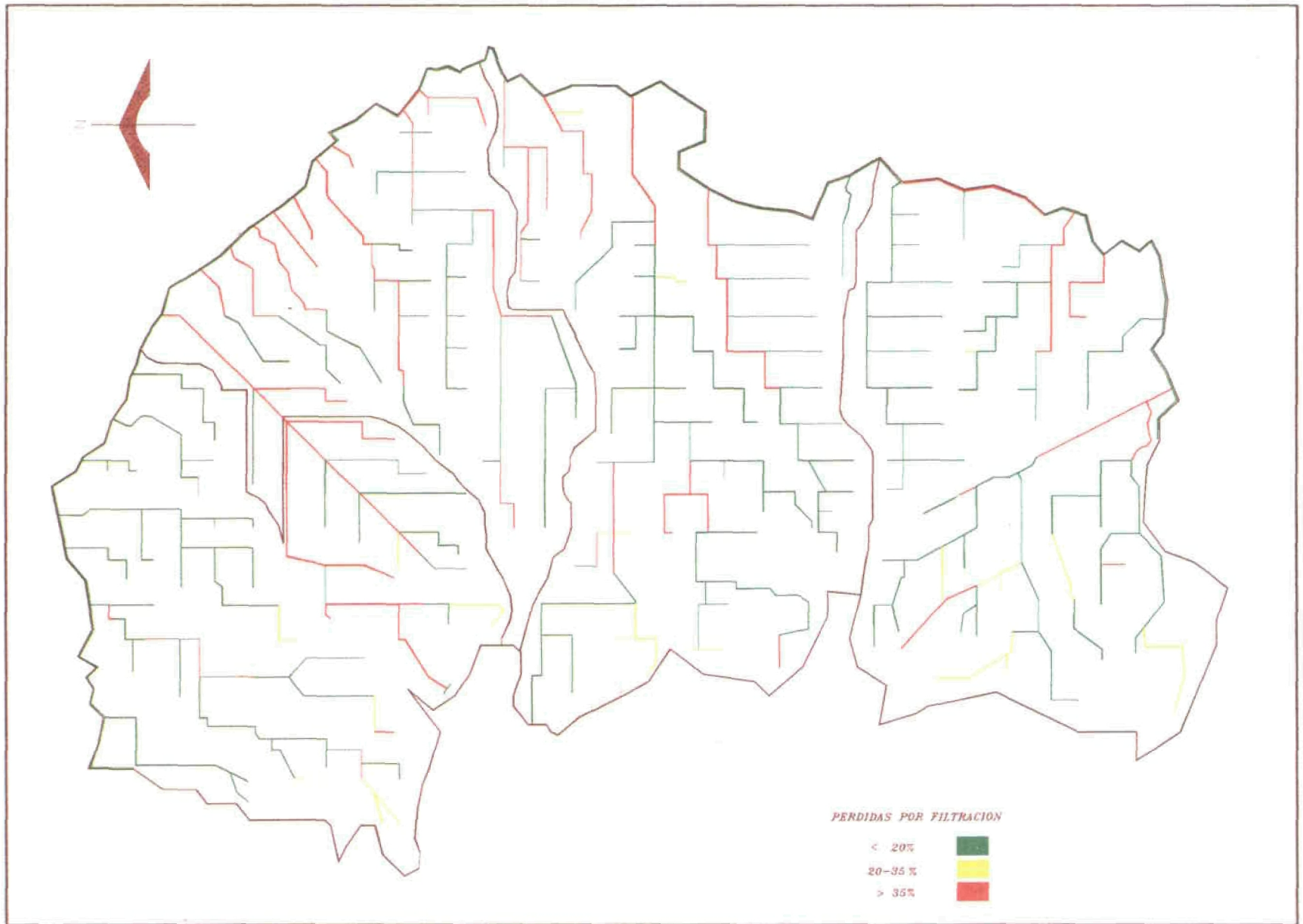
- i) Se dibuja en color verde un dren cuando cumple en mayor o menor grado con su función (el agua fluye de manera continua a través del mismo) y requiere un trabajo normal de conservación.
- ii) Con amarillo, cuando el dren presenta ligeros o medianos problemas en su funcionamiento y requiere poca inversión para mejorarlo.
- iii) Con rojo, cuando el dren no funciona (el agua no fluye o está estancada) y las inversiones que requiere para rehabilitarlo son altas.

En el plano 2 se muestra un ejemplo del grado de funcionamiento real de la red de drenaje en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa.

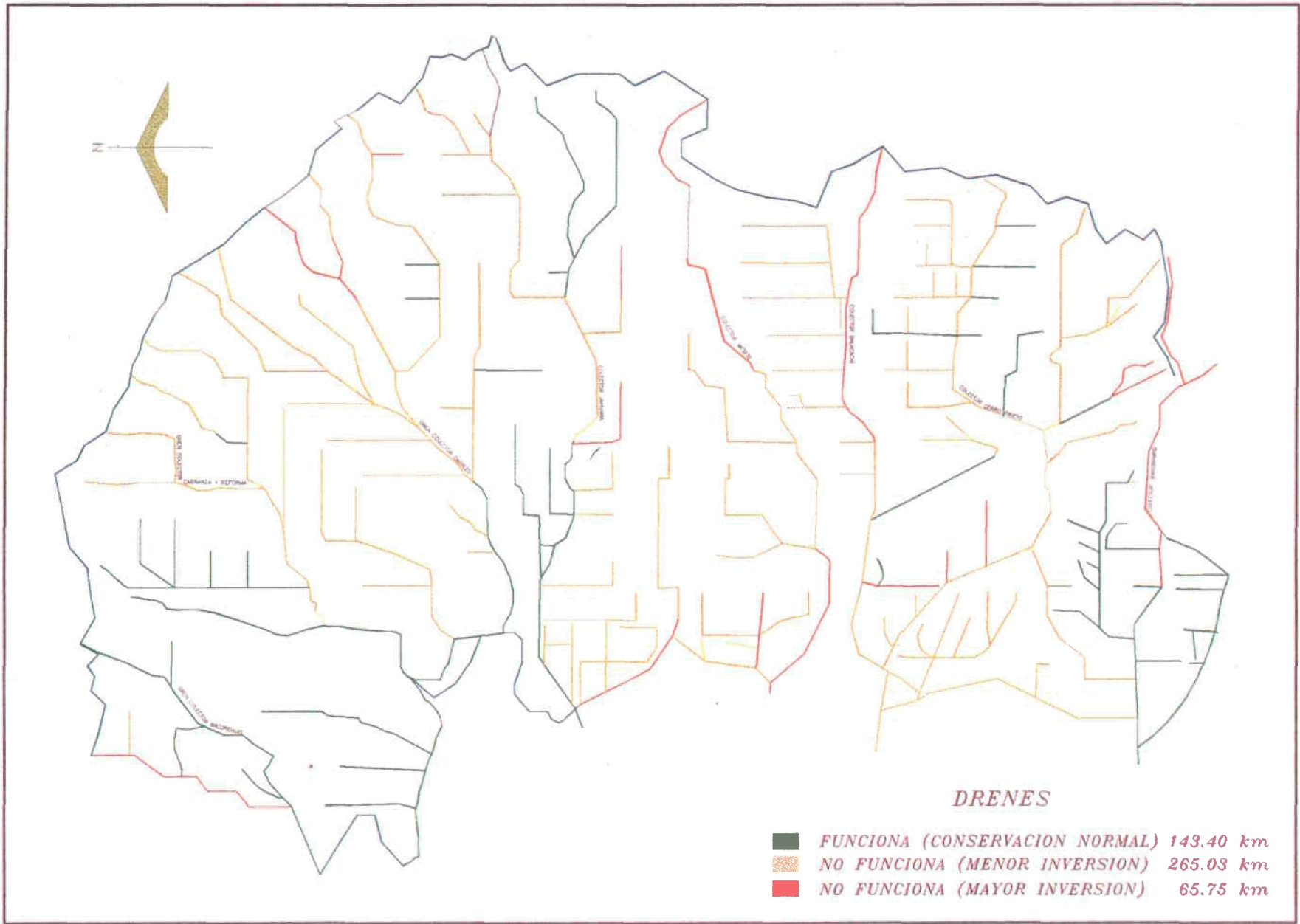
2.2.3. Estudios generales

En la mayoría de los distritos de riego existe información general y planos de las principales variables relacionadas con la problemática de drenaje y salinidad de los suelos, que muestran:

- a) **Topografía.** La información que puede obtenerse de este tipo de planos es sobre:
 - ◆ Pendientes dominantes.
 - ◆ Esquema general del escurrimiento superficial.
 - ◆ Altitud.
 - ◆ Principales detalles naturales o artificiales.
- b) **Estudio agrológico.** El estudio de estos planos permite correlacionar el tipo de textura y la estratigrafía de los suelos con la problemática y el diseño del drenaje.



Plano 1. Ejemplo de eficiencia de conducción o pérdidas por filtración de la red de canales en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa



Plano 2. Ejemplo del funcionamiento real de la red de drenaje en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa

c) **Estudio general de salinidad analizada.**

Los propósitos de un estudio de salinidad analizada son:

- ◆ Proponer los cultivos de mayor viabilidad en función de su tolerancia al contenido de sales en el suelo.
- ◆ Recomendar el manejo del régimen de humedad del suelo para disminuir los efectos negativos de las sales en el rendimiento de los cultivos y en el deterioro del suelo.
- ◆ Establecer programas de recuperación de suelos ensalitrados.
- ◆ Jerarquizar los programas de conservación normal, diferida y de rehabilitación o modernización de las obras del distrito.

Con la información disponible sobre el contenido de sales en el suelo se delimitan las áreas con diferentes grados de afectación, de acuerdo con los rangos del cuadro 1 (de la Peña, 1980 y Barocio, 1998).

Cuadro 2-1. Clases de suelo por contenido de sales

SUELO	CE del suelo (dS/m)	Color en el plano
Primera Clase	< 4	Azul
Segunda clase	4 – 8	Verde
Tercera clase	8 – 12	Amarillo
Cuarta clase	12 – 20	Café
Quinta clase	20 – 30	Rojo
Sexta clase	> 30	Lila

Esta delimitación facilitará la asignación de prioridades en los programas de mejoramiento y recuperación de suelos.

a) **Estudio general de freaticimetría.** Sirve para obtener mediante sondeos periódicos de una red de pozos de observación, la posición y variación del nivel freático con respecto al tiempo.

Permite definir la superficie afectada por niveles freáticos superficiales y relacionarla con su impacto en el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, así como en el proceso de

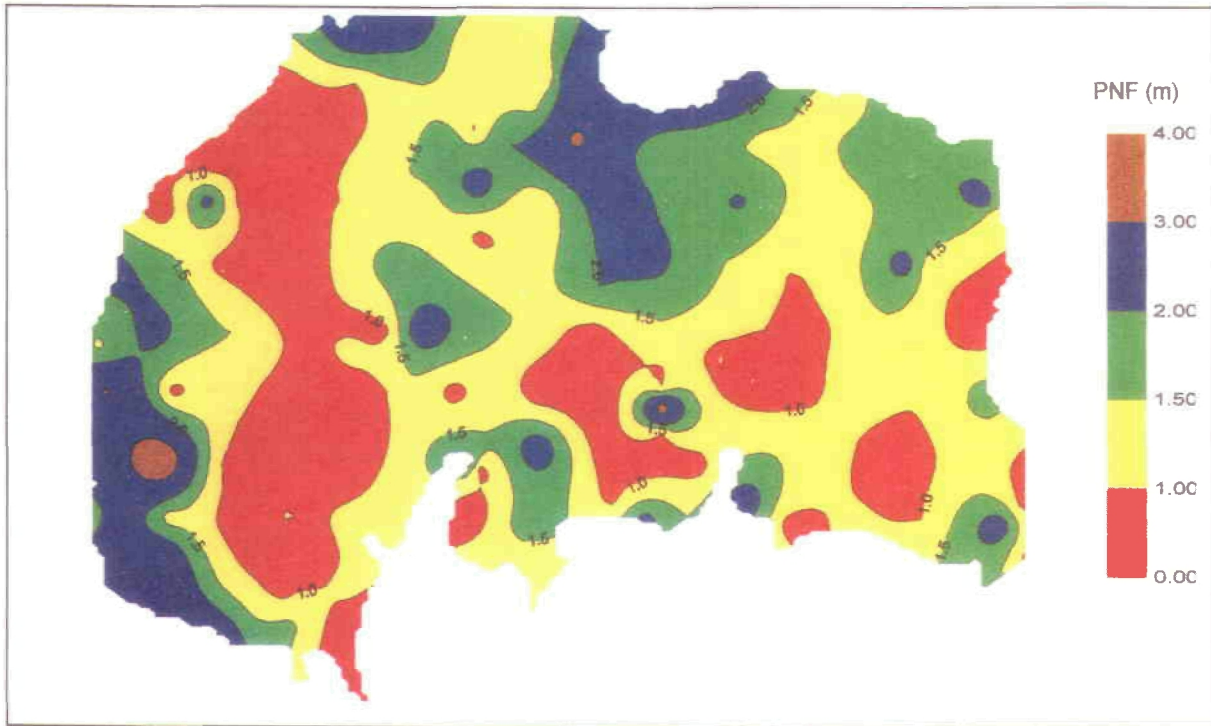
ensalitramiento de los suelos bajo riego.

Se debe analizar, por lo menos, la información y los planos de los meses más críticos y menos críticos del nivel freático. Los niveles críticos o peligrosos se presentan cuando la red de canales de distribución está en su máxima demanda; sucede al traslaparse los últimos riegos del subciclo primavera-verano con los primeros riegos del subciclo otoño-invierno.

Los niveles menos críticos se presentan después del subciclo otoño-invierno.

Los planos que se requiere analizar son los siguientes:

- ◆ **Plano de isobatas.** Se obtiene al trazar líneas de igual profundidad del nivel freático con respecto a la superficie del suelo, y permite delimitar de manera estacional, las áreas con mantos freáticos someros. Un ejemplo de configuración de las isobatas para febrero de 1995 en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa se presenta en el plano 3.
- ◆ **Gráfica áreas-tiempo.** Se elabora graficando las superficies delimitadas en los rangos convencionales de la profundidad del nivel freático, con respecto al tiempo. Estas superficies se obtienen de los planos de isobatas. En esta gráfica, se puede observar la varjación de la superficie con mantos freáticos someros a través del tiempo. Un ejemplo se muestra en la ilustración 2-1.
- ◆ **Plano de isohypsas.** Se obtiene al trazar líneas de igual elevación del manto freático con respecto al nivel del mar o a un banco de nivel establecido. Estos planos permiten definir la dirección general del flujo del agua del manto freático y localizar las zonas de recarga y descarga. Las isohypsas se dibujan con color rojo y las líneas de corriente con color azul. En el plano 4 se muestran un ejemplo de la configuración de las isohypsas para el mes de febrero de 1995, del distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa.



Plano 3. Ejemplo de Configuración de las isobatas para febrero de 1995, en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa

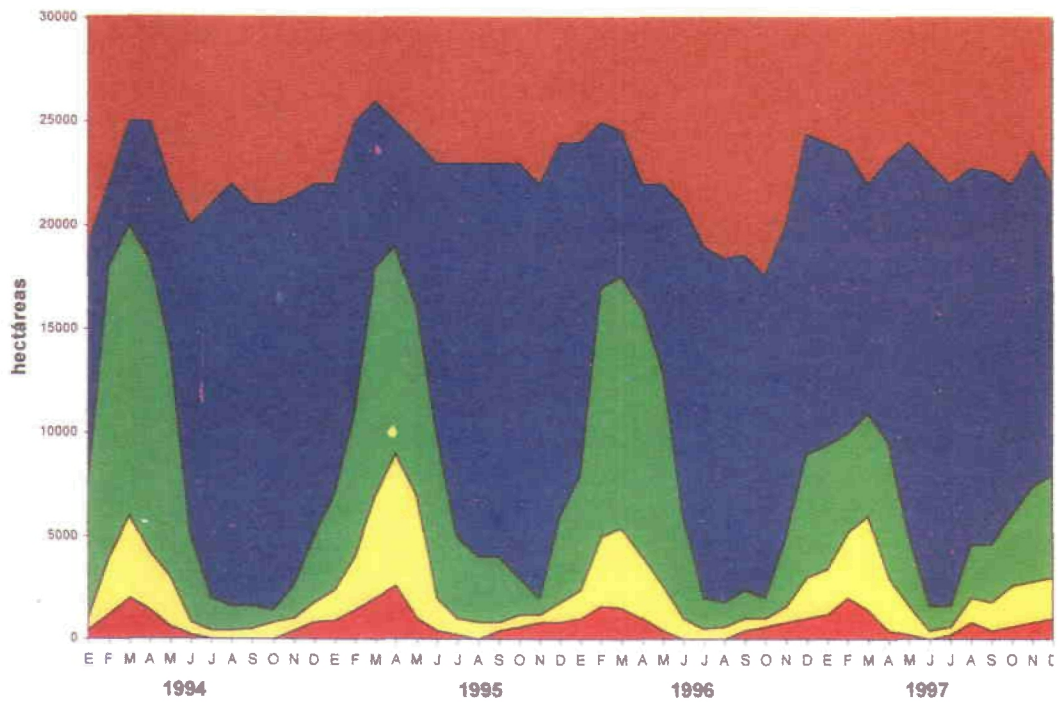
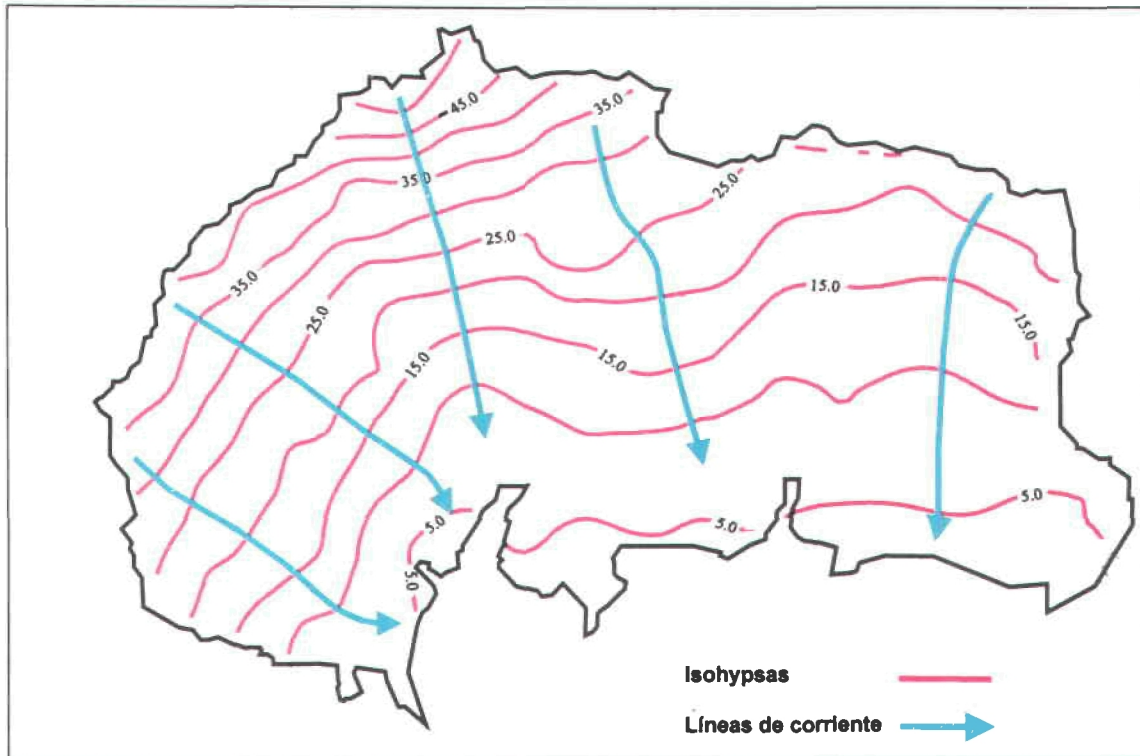


Ilustración 2-1. Ejemplo de gráfica áreas-tiempo



Plano 4. Ejemplo de configuración de las isohypsas para febrero de 1995 en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa

Adicionalmente, es necesario recopilar información sobre la calidad del agua freática con el objeto de elaborar un plano de salinidad que permita detectar áreas con alto riesgo de salinización del suelo.

El análisis de estos planos permitirá lo siguiente:

- ◆ Identificar los tramos de drenes de la red general que funcionan como interceptores o como colectores.
- ◆ Establecer la prioridad, oportunidad y los trabajos mínimos necesarios de conservación y mejoramiento de la red de distribución y de la red general de drenaje para garantizar su funcionamiento y, en consecuencia, disminuir el impacto negativo en la producción.
- ◆ Direccionar y cuantificar los programas de conservación normal, de desarrollo parcelario y de rehabilitación o modernización que se realizan en el distrito.
- ◆ Delimitar y cuantificar las áreas con requerimientos de drenaje parcelario.
- ◆ Identificar los periodos críticos con niveles freáticos peligrosos para el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos, así como las zonas con riesgo o en proceso de ensalitramiento de los suelos bajo riego.
- ◆ Ubicar zonas con riego excesivo y proponer al área de operación de los módulos las medidas correctivas para un mejor uso y manejo del agua.

Conocer el comportamiento que tienen los niveles freáticos a través del tiempo.

2.2.4. Selección de zonas para proyectos de drenaje parcelario

Con el objeto de facilitar los trabajos relacionados con los proyectos de drenaje parcelario, es conveniente agrupar las áreas seleccionadas para establecer este tipo de drenaje, con base en la información recabada y analizada en los puntos anteriores.

La definición de zonas compactas permitirá, además de optimizar el uso de materiales y maquinaria en la ejecución de los proyectos de drenaje parcelario, integrar estos proyectos con otras acciones tales como el revestimiento o entubamiento de la red de conducción del agua, el programa de conservación de la red de distribución y de drenaje y, los proyectos de mejoramiento del riego.

Las áreas que potencialmente requieren de drenaje parcelario, son aquellas que tienen niveles freáticos someros o problemas de salinidad en el suelo. Pueden ser identificadas sobreponiendo los planos de isobatas, de salinidad del manto freático, de salinidad del suelo y de texturas, localizando las zonas donde coincidan factores adversos.

Por ejemplo, las áreas que permanecen con nivel freático a profundidades menores de 1.0 m durante uno o más meses y que tienen agua freática de mala calidad ($CE > 10$ dS/m), generalmente requieren drenaje parcelario.

Si el agua freática es de buena calidad, la necesidad de drenaje parcelario se define por los efectos negativos del manto freático en el cultivo o en los trabajos de laboreo.

El plano 5 muestra las zonas seleccionadas en 1997, del distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa.

2.3. Estudios en las parcelas

La necesidad de construir drenaje parcelario será detectada con un reconocimiento final que se debe realizar en las parcelas, en el que se relacione la disminución en la productividad de los terrenos, con problemas de mantos freáticos someros y salinidad.

Los estudios para el reconocimiento final incluyen acopio de información, visitas a las parcelas y estudios freaticométricos y de suelos.

2.3.1. Acopio de información

Se debe recopilar la información específica y más detallada de la parcela, en el marco del estudio regional descrito en el punto anterior. Además, es conveniente obtener información complementaria con respecto a: topografía, altitud, texturas, salinidad, freaticometría, condiciones actuales de la red de distribución y

drenaje del área de estudio, e información sobre la evolución de los rendimientos de los cultivos en el tiempo.

2.3.2. Visitas a las parcelas

Se recomienda realizar una o más visitas a la parcela en diferentes épocas del año. En las visitas se debe prestar atención especial a los siguientes puntos:

- ◆ Estado de los cultivos.
- ◆ Efectos evidentes en el suelo de problemas de salinidad o de drenaje.
- ◆ Fuentes de alimentación al manto freático.
- ◆ Estado actual de la red de drenaje que le da servicio a la parcela y presencia de obstáculos al flujo del agua.
- ◆ Existencia de un colector en uno de los linderos de la parcela o en las cercanías de la misma, que se encuentre en buen estado y que tenga la profundidad requerida, para recibir el agua que en su caso van a remover los drenes parcelarios. De no existir este colector, se debe considerar la factibilidad de construirlo.

2.3.3. Freaticometría local

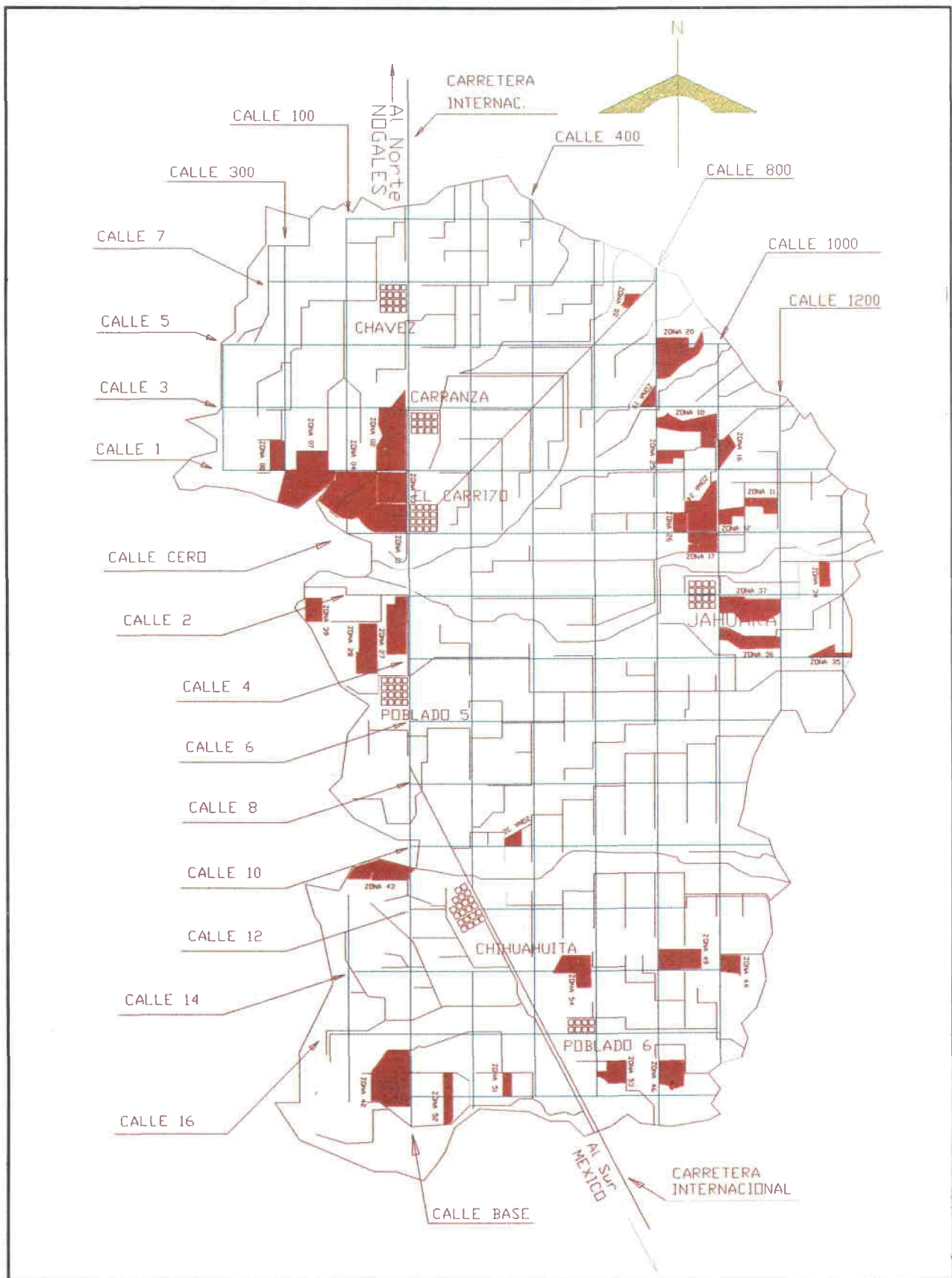
Debido a que generalmente la información disponible es muy escasa, se recomienda construir un pozo de observación por cada 4 ha con una profundidad de hasta 3 m y obtener lecturas mensuales, de preferencia durante un año, o por lo menos durante el periodo de máxima aplicación de riego.

Estos pozos podrán utilizarse para los estudios de suelos y la determinación de la conductividad hidráulica.

En caso de encontrarse el manto freático, se debe tomar una muestra de agua para determinar la conductividad eléctrica y el pH.

2.3.4. Suelos

Se recomienda aprovechar la construcción de los pozos de observación del manto freático para la realización de un estudio de salinidad y textura del suelo. Los muestreos deberán efectuarse a las siguientes profundidades: 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 y 150-200 centímetros.



Plano 5. Selección de zonas para el establecimiento de sistemas de drenaje parcelario

Los muestreos deberán efectuarse a las siguientes profundidades: 0-30, 30-60, 60-90, 90-120, 120-150 y 150-200 centímetros.

En las primeras tres profundidades deberán hacerse las determinaciones siguientes: aniones y cationes, potencial hidrógeno (pH), conductividad eléctrica del extracto de saturación y textura. En los demás casos sólo se determinará la textura.

Se recomienda determinar la curva granulométrica en suelos con altos contenidos de limos o arenas finas, en el perfil de 1.0 a 2.0 metros.

2.3.5. Diagnóstico

El análisis de la información anterior permitirá hacer recomendaciones sobre las medidas preventivas y correctivas que se deben tomar, por ejemplo:

- ◆ Sugerir el revestimiento de tramos de canal y, si no se cuenta con recursos para ello, entonces se podrá recomendar la construcción de drenes para interceptar el flujo de filtración; sin embargo, en este caso debe considerarse que pueden incrementarse las filtraciones del canal, lo que repercutirá en una baja de la eficiencia de operación del sistema.
- ◆ Es posible que los problemas se deban al manejo descuidado del agua de riego en parcelas vecinas, para lo cual es aconsejable buscar un entendimiento con los dueños o usuarios de estas parcelas y con las autoridades del distrito, con el fin de lograr una solución a este problema. El aumento de las cuotas por servicio de riego podrá ser un factor que promueva un mayor cuidado del agua por parte de los agricultores.
- ◆ Frecuentemente, la presencia de obstáculos en la red de drenaje es la causante de altos niveles freáticos en las áreas servidas por los drenes en mal estado de conservación; la eliminación de tales obstáculos en todos los drenes, hasta la desembocadura en el cuerpo receptor de las aguas de drenaje, resuelve el

problema muchas veces; sin embargo, estas labores de limpieza y conservación de la red de drenaje de apoyo, son costosas y no se llevan a tiempo regularmente.

- ◆ La construcción de drenaje parcelario se recomienda cuando los bajos rendimientos son atribuibles a niveles freáticos someros y salinidad del suelo, y cuando las medidas anteriores no se hayan podido realizar o no hayan dado los resultados esperados.

La construcción de drenaje parcelario generalmente está condicionada a la instrumentación de programas gubernamentales que otorguen apoyos financieros y a la existencia en la localidad de empresas que instalen drenaje parcelario con los equipos y tecnología adecuadas.

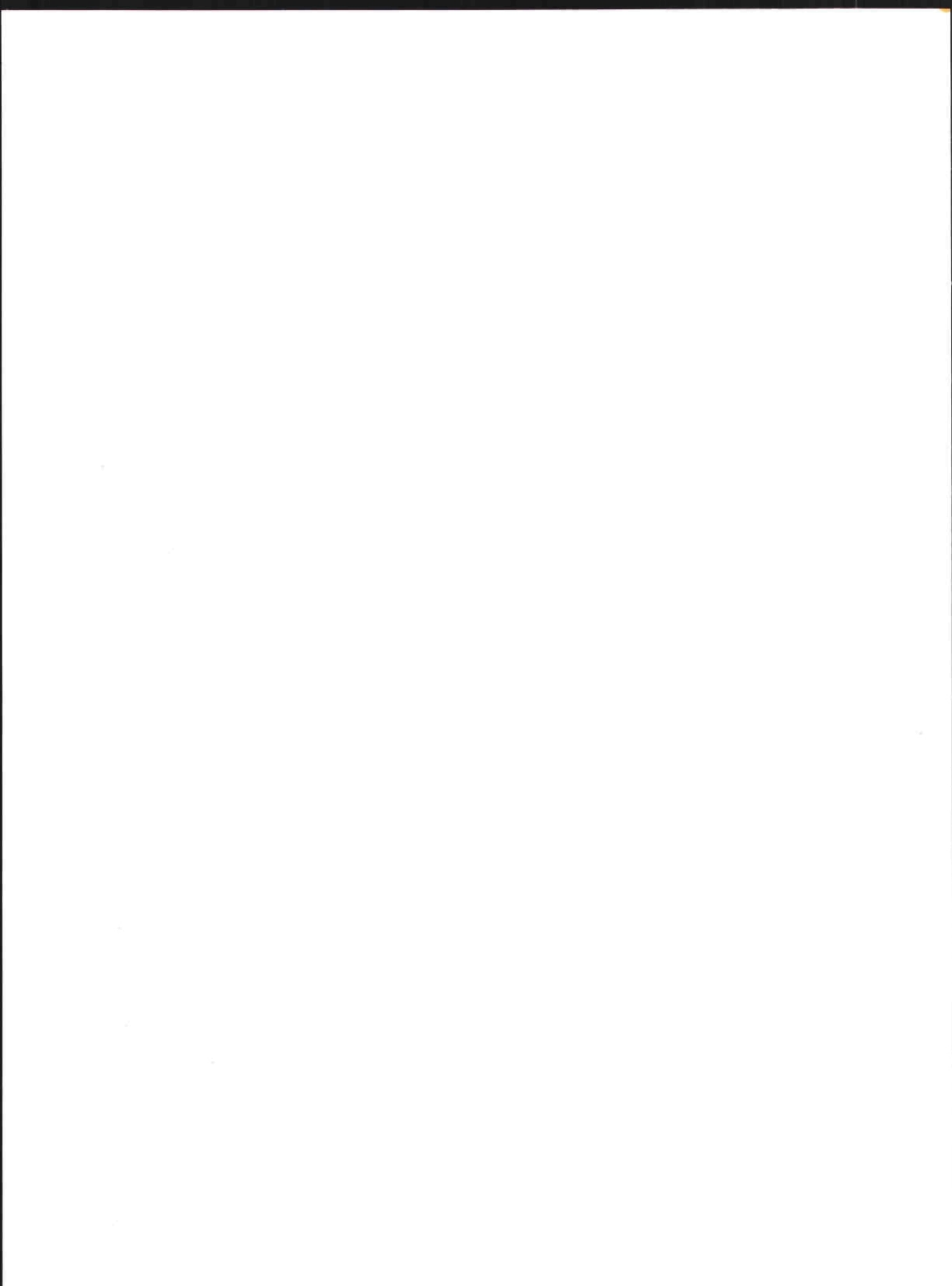
2.4.6. Parcelas de referencia

Cuando se pretende implementar un programa de construcción de drenaje parcelario en grandes extensiones, se recomienda el establecimiento de parcelas de referencia con la finalidad de conocer la respuesta de los suelos y cultivos por un lado, y sobre los criterios y parámetros de diseño, por el otro. Los resultados favorables que se obtengan en estas parcelas, servirán para hacer promoción de la práctica del drenaje.

Las parcelas de referencia deberán establecerse en áreas representativas de los suelos dominantes y con los cultivos más comunes.

En la medida de lo posible, deberán definirse distintos espaciamientos entre drenes y probar diferentes tecnologías de instalación. Se deberá prestar atención especial al desarrollo de los cultivos y al funcionamiento hidráulico de los drenes (ver Capítulo 6, Evaluación de sistemas de drenaje).

Con la finalidad de reducir los costos, las parcelas de referencia deberán establecerse en lotes comerciales, con agricultores cooperantes.



Capítulo 3

Diseño del drenaje parcelario

En este capítulo se presentan los lineamientos para el diseño del sistema de drenaje parcelario. Se incluyen aspectos sobre la información requerida, los parámetros y procedimiento del diseño, la justificación económica y un ejemplo de diseño.

3.1. Información requerida

3.1.1. Topografía

La información topográfica es primordial para hacer un buen diseño de un sistema de drenaje. Un plano topográfico con errores en las altitudes absolutas o relativas, puede ocasionar que los drenes no tengan las profundidades de proyecto o no se logren las descargas con el libre bordo de proyecto.

Cuando no se cuente con un plano topográfico confiable de la parcela donde se construirá el sistema de drenaje, se recomienda realizar un nuevo levantamiento sobre una cuadrícula de 50 por 50 m.

El plano topográfico se debe elaborar con curvas de nivel a cada 0.2 m y con una escala de 1:2,000 para superficies menores de 50 ha y de 1:5,000 hasta de 500 ha (González, 1998).

3.1.2. Infraestructura existente

En el plano topográfico se deben señalar las cotas topográficas de los canales y drenes, la sección, el tirante, la plantilla y ancho de bermas, así como las líneas eléctricas, tuberías de conducción, carreteras, caminos, etc. Esta información será útil para proponer la ubicación de los drenes del proyecto, la cual deberá en lo posible evitar el cruce con la infraestructura existente.

La red de drenaje parcelario requiere un dren a cielo abierto o un cauce natural que permita la descarga de las aguas de drenaje. Es importante que este dren se encuentre en buen estado y que tenga la profundidad necesaria (foto 1).



Foto 1. Dren de la red general en condiciones adecuadas en donde se señala la descarga de un colector parcelario (ver círculo)

3.1.3. Freatimetría

Antes de proceder a diseñar el sistema de drenaje parcelario, se debe verificar:

- ♦ La profundidad del nivel freático, que debe ser menor a 1.0 m durante el periodo de máxima aplicación del riego, y menor a 1.5 m durante el periodo de descanso.
- ♦ La dirección de flujo del agua freática, para tomarla en cuenta al definir la dirección de los drenes laterales y colectores parcelarios.

La información general sobre las profundidades y direcciones de flujo del manto freático, puede obtenerse de planos de isobatas e isohypsas del distrito de riego.

Cuando no se tengan pozos de observación del manto freático de la red del distrito cercanos a la parcela, es necesario hacer observaciones en pozos temporales, que se construyen hasta de 2 o 3 m de profundidad.

Se recomienda hacer un pozo cada 4 a 10 ha, aprovechando cuando sea posible las horadaciones que se hagan para el muestreo de suelos. Es importante hacer mediciones en varias veces al año, particularmente durante la época en que se tengan más riegos.

3.1.4. Suelos

Se recomienda realizar el muestreo de suelos sobre la cuadrícula trazada para el levantamiento topográfico, a las profundidades siguientes: 0-30, 30-60, 60-100, 100-150 y 150-200 cm, haciendo uso de una barrena tipo "California" o la disponible para tomar suficiente suelo (1 kg por estrato). Cada punto de muestreo debe cubrir una superficie de 4 ha, para parcelas de 20 ha o menos.

Cuando la zona de drenaje cubre superficies mayores, se recomienda obtener muestras compuestas de la misma profundidad, mezclando como máximo cinco muestras cercanas y representativas de una superficie de 20 ha (González, 1998).

Durante el muestreo es necesario anotar los cambios en el tipo de textura, la zona de saturación o presencia de manto freático y las capas de arado, lo que permite detectar el estrato más adecuado para colocar los laterales y colectores.

En el laboratorio se deben realizar los análisis físico-químicos destacando textura y salinidad.

La textura del suelo permitirá hacer una primera clasificación de las áreas con diferente requerimiento de drenaje, especialmente en superficies mayores a 50 hectáreas.

La distribución de los estratos en el perfil del suelo servirá para precisar la profundidad de colocación de los drenes.

La textura del suelo en los estratos donde se colocarán los drenes, definirá la necesidad de utilización de filtros y su tipo, tal como se explica en la sección de filtros, p 28.

La salinidad debe permitir la evaluación del grado de ensalitramiento de la parcela, para definir el proceso más adecuado para mejorarla o recuperarla, así como para estimar el sobreriego o la lámina de lavado necesario para cada caso (lo que equivale al módulo de drenaje). En caso de requerirlo, también

ayudará a definir la cantidad de mejorador químico.

3.2. Parámetros de diseño

Para diseñar el drenaje, particularmente para determinar el espaciamiento entre los drenes, es importante conocer o definir una serie de parámetros del suelo y de la operación de los propios drenes, que incluye: la conductividad hidráulica, la porosidad drenable, el módulo de drenaje, la profundidad del hidroapoyo o estrato impermeable, la profundidad deseada del manto freático, la profundidad mínima de los drenes y el diámetro de tubería de los drenes con fines de diseño, lo que se explica a continuación.

3.2.1. Conductividad hidráulica

Para calcular el espaciamiento entre drenes se debe conocer el valor de la conductividad hidráulica a saturación, que es un indicador de la velocidad con la que el agua se mueve en el suelo.

Para conocer el valor de este parámetro se recomienda usar el método del pozo de barrena (foto 2), aprovechando en lo posible los pozos construidos para la observación del manto freático o para el muestreo de suelos.



Foto 2. Determinación de la conductividad hidráulica por el método del pozo de barrena

Una recomendación general es que se usen barrenas que alteren lo menos posible la estructura del suelo. Si el suelo es muy arenoso y las paredes no se sostienen durante el tiempo de la prueba, es necesario ademarla con un tubo que tenga por lo menos el 10 % de su superficie perforada.

Para este método, se requiere lo siguiente:

- ◆ Una barrena de 10 cm de diámetro aproximadamente y con extensiones para hacer un pozo de 2 m o más de

profundidad, cuyo fondo quede por debajo del nivel freático.

- ◆ Un dispositivo para medir las variaciones del nivel freático o recuperación del pozo (foto 2).
- ◆ Un recipiente cilíndrico para extraer el agua, de un diámetro algo menor que el del pozo, con una válvula en el fondo que permita la entrada del agua durante la introducción del recipiente y evite su salida durante la extracción (foto 3).



Foto 3. Recipiente cilíndrico para extraer el agua del pozo (ver flecha)

- ◆ Un cronómetro.
- ◆ Un formato para anotar los datos de la prueba.

Procedimiento:

- a) Se realiza una barrenación cuyo fondo quede por debajo del nivel freático.
- b) Generalmente se deja pasar un día, para dar tiempo que el nivel del agua en el pozo

se equilibre con el del manto freático del suelo circundante.

- c) Se mide la profundidad del manto freático (a_f) y del pozo (Y'), anotando la fecha, sitio y nombre de la persona encargada de la prueba.
- d) Con el recipiente se extrae el agua para producir un abatimiento rápido del nivel en el pozo y se mide la profundidad del nivel freático.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL DRENAJE PARCELARIO

e) Se hacen diez mediciones del nivel del agua con intervalos de 10 segundos para suelos arenosos, de 30 segundos para suelos medios y de 60 segundos para suelos arcillosos, lo que también dependerán de la velocidad con que se recupere el pozo.

f) Si por algún motivo se suspende la prueba, antes de repetirla debe esperarse hasta que se alcance el nivel inicial del agua.

En la ilustración 3-1 se muestran las variables que intervienen en el método.

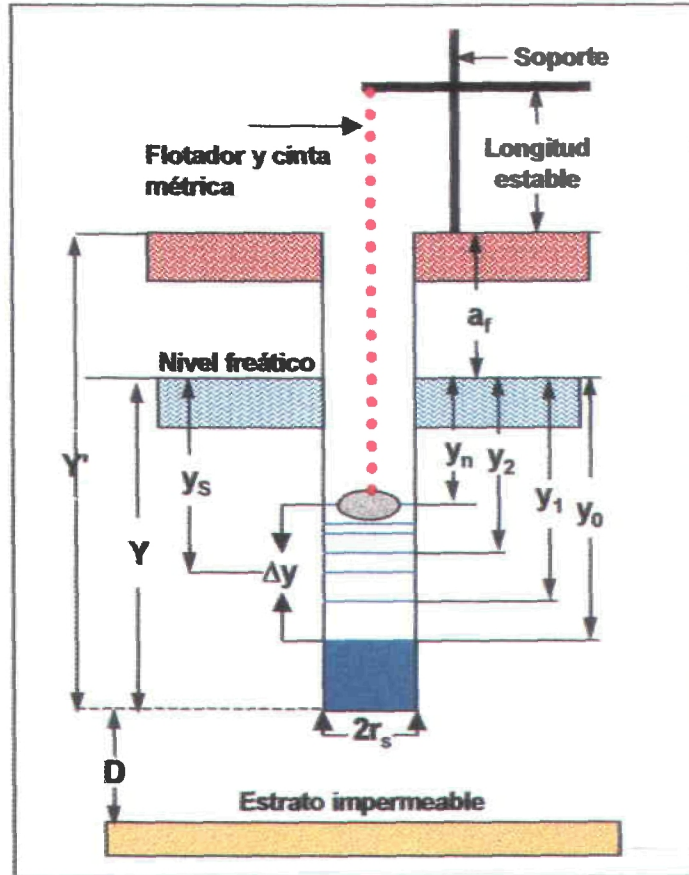


Ilustración 3-1. Esquema del método del pozo de barrena

La conductividad hidráulica se calcula mediante la fórmula de Ernst (Ritzema, 1994):

$$K = C_K \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.1)$$

donde:

K = conductividad hidráulica (m/día).

$\frac{\Delta y}{\Delta t}$ = velocidad media de recuperación del nivel (cm/s).

C_K = coeficiente que toma en cuenta la geometría del flujo (adimensional).

$$C_K = \frac{3600}{\left(10 + \frac{Y}{r_s}\right) \left(2 - \frac{Y_s}{Y}\right)} \frac{r_s}{Y_s} \quad (3.2)$$

para $D \leq \frac{Y}{2}$, y

$$C_K = \frac{4000}{\left(20 + \frac{Y}{r_s}\right) \left(2 - \frac{Y_s}{Y}\right)} \frac{r_s}{Y_s} \quad (3.3)$$

para $D > \frac{Y}{2}$

donde:

D = distancia entre el fondo de la barrenación y el hidroapoyo o estrato impermeable (cm).

r_s = radio de la barrenación que puede variar entre 7.5 y 10 cm; si se ha usado tubo perforado de ademe este valor es el radio externo del tubo (cm).

Y = profundidad del agua en la barrenación (cm), donde:

$Y = Y' - a_f$

Y' = profundidad del pozo (m).

a_f = profundidad del nivel freático (m).

$$y_s = y_0 - \frac{\Delta y}{2}$$

donde:

y_0 = abatimiento inicial (cm).

Δy = recuperación máxima del nivel del agua en el pozo durante la prueba, en la que $\Delta y \leq 0.25 y_0$ (cm).

Si no se conoce la profundidad del hidroapoyo, se recomienda usar la fórmula (3.3).

En caso de contar con doce o más pruebas de conductividad hidráulica en diferentes puntos del campo, se recomienda calcular la media geométrica de la siguiente manera:

- ◆ Calcular los logaritmos de cada uno de los valores de K.
- ◆ Calcular la media de los logaritmos de K.
- ◆ La media geométrica será el antilogaritmo del valor calculado en el punto anterior.

La media geométrica de K se empleará para calcular el espaciamiento entre drenes.

Al final de este capítulo se presenta un ejemplo de cálculo de la conductividad hidráulica mediante este método.

Si por alguna razón no se puede determinar la conductividad hidráulica con el método del pozo de barrena, su valor puede ser estimado a partir de la textura usando el cuadro 3-1.

Cuadro 3-1. Valores de la conductividad hidráulica (K) en función de la textura y estructura (Martínez, 1986)

TEXTURA Y ESTRUCTURA	K (M/DIA)
Arena gruesa con grava	10-50
Franco arenoso, arena fina	1-5
Franco, franco arcilloso sin estructura	1-3
Franco arenoso muy fino	0.5-2
Arcilla con grietas	0.5-2
Franco arcilloso mal estructurado	0.02-0.2
Arcilla compuesta	<0.002

3.2.2. Porosidad drenable

Es la fracción de los poros de suelo que se libera de agua cuando desciende el nivel freático y depende de las propiedades del suelo y de la profundidad del manto freático.

Este parámetro es empleado en las fórmulas de régimen transitorio que se utilizan para calcular el espaciamiento entre drenes, aunque su aplicación está limitada por la dificultad que existe para su determinación. Sin embargo, para fines prácticos se recomienda obtenerla en función de la conductividad hidráulica, utilizando la gráfica que se presenta en la ilustración 3-2 adaptada del *Drainage Manual* (1994).

3.2.3. Módulo de drenaje

El módulo de drenaje se define como la lámina de agua promedio que debe ser removida por los drenes diariamente, durante el periodo de riegos. Esta lámina está constituida por las pérdidas de agua de riego o por el sobreriego aplicado para el lavado de sales.

Cuando se cuente con parcelas de referencia, será posible estimar el módulo de drenaje con el procedimiento indicado en el Capítulo VI, **Evaluación de sistemas de drenaje parcelario.**

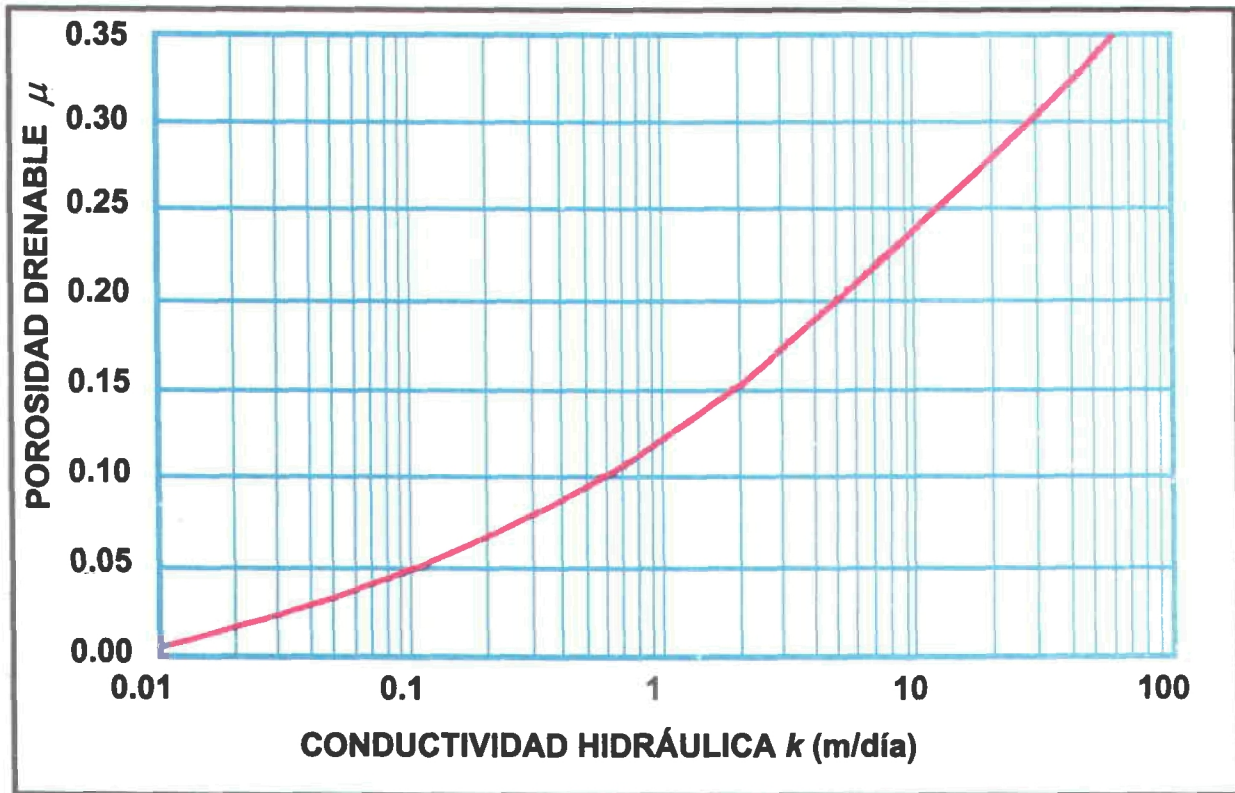


Ilustración 3-2. Relación entre la porosidad drenable (μ) y la conductividad hidráulica (K), adaptada del *Drainage Manual* (1994)

La FAO (1980), recomienda tomar el valor del módulo de drenaje según el cuadro 3.2.

Cuadro 3-2. Valores de módulo de drenaje (q) en función de la conductividad hidráulica (K), de la salinidad del suelo (CE) y del método de riego (FAO, 1980)

K (m/día)	CE (dS/m)	q (mm/día)			
		Surcos	Corrugación	Inundación	Aspersión
<0.5	< 10	1.5	1.7	2.0	1.0
>0.5	> 10	3.0	3.5	4.0	2.0
<0.5	< 10	3.5	4.0	4.4	2.5
>0.5	> 10	4.5	5.0	5.5	3.5

3.2.4. Profundidad del hidroapoyo

La profundidad de la "barrera impermeable" o "hidroapoyo" puede ser estimada a partir de estudios geohidrológicos disponibles, en particular de los perfiles registrados durante la construcción de pozos profundos de bombeo.

Este hidroapoyo puede ser la roca madre o un estrato arcilloso con una permeabilidad diez veces menor que los estratos superiores.

3.2.5. Profundidad deseada del manto freático

De acuerdo con van Hoorn y van Alphen (1994) y recomendaciones de la FAO (1980), para riego continuo o para los periodos de riego con uno o dos cultivos anuales, se deberán considerar los siguientes valores de profundidad deseada del nivel freático:

- ◆ Entre 1.0 y 1.2 m, para granos y hortalizas.
- ◆ De 1.2 a 1.6 m, para árboles frutales.

Los valores menores son para suelos de texturas gruesas y los valores mayores, para suelos de texturas finas.

Para terrenos con uno o dos cultivos anuales deberán considerarse los siguientes valores durante los periodos de descanso:

- ◆ No menor de 1.4 m, para suelos arenosos.
- ◆ No menor de 1.7 m, para suelos arcillosos.

3.2.6. Profundidad mínima de los drenes

Los drenes parcelarios deben tener una profundidad mínima de 1.20 m en parcelas con riego continuo y de 1.70 m en parcelas con uno o dos cultivos anuales.

3.2.7. Diámetro de tubería de los drenes con fines de diseño

Para calcular el espaciamiento entre drenes laterales, se recomienda utilizar un diámetro de tubería de 7.62 cm o de 10.16 cm (3 o 4 pulgadas). Si durante la colocación de la tubería se presentan pequeñas variaciones en la profundidad, hidráulicamente funciona mejor la de 4 "que las de menor diámetro.

3.3. Diseño en planta

El diseño en planta consiste en la ubicación, en un plano de la parcela, de los drenes laterales y colectores, así como de las estructuras auxiliares. Para obtener el plano correspondiente es necesario determinar el espaciamiento, dirección y longitud de los drenes.

3.3.1. Espaciamiento entre drenes

De la diversidad de fórmulas reportadas en la literatura, en este manual se presentan dos opciones para el cálculo del espaciamiento interdrenes: una para régimen permanente y otra para régimen transitorio.

A. Régimen permanente

El espaciamiento entre drenes puede determinarse de acuerdo con la fórmula de Hooghoudt (Ritzema, 1994), y corroborarse con experiencias obtenidas en parcelas de referencia. Dicha fórmula es la siguiente:

$$L = 2h \sqrt{\frac{K}{q} \left(1 + \frac{2d}{h} \right)} \quad (3.4)$$

donde:

L = espaciamiento entre drenes (m).

h = sobreelevación media del nivel freático, en relación con el nivel del agua en los drenes durante el periodo de riegos (m), es decir: $h = Pd - a$, donde:

Pd = profundidad de los drenes (m).

a = profundidad permisible del nivel freático durante el periodo de riegos (m).

K = conductividad hidráulica del suelo (m/día).

q = módulo de drenaje (m/día).

d = "espesor saturado equivalente", propuesto por Hooghoudt. Se determina utilizando el cuadro 3.3, en función de los parámetros:

$$\lambda = \frac{L}{r_o} \quad \text{y} \quad \Delta = \frac{D}{r_o} \quad (3.5)$$

donde:

D = espesor saturado medio del manto freático, medido a partir de la profundidad donde se encuentran los drenes hasta el estrato impermeable o hidroapoyo (m).

r_o = radio externo del dren (m).

El procedimiento de cálculo del espaciamiento entre drenes es iterativo y consiste en lo siguiente:

- Se propone un valor L , por ejemplo de 50 metros.
- Se determina el espesor saturado equivalente (d) de la siguiente manera: se calculan los cocientes λ y Δ a partir de las expresiones (3.5) y utilizando el cuadro 3-3 se determina el valor de δ . El parámetro d se calcula como: $d = \delta r_o$.
- Se calcula L mediante la fórmula de Hooghoudt (ecuación 3.4).
- Si los dos valores, el supuesto y el calculado para L , se diferencian en más de 5 %, entonces se repite el procedimiento con un nuevo valor propuesto para L , igual al obtenido de la aplicación de la fórmula en el paso anterior. Finalmente, se recomienda redondear el valor que se obtenga de L a múltiplos de 5 m o 10 m (por ejemplo 30 m, 35 m, 40 m, 45 m, 50 m, 60 m, etcétera).

Cuadro 3-3. Valores del coeficiente δ para el cálculo del espaciamiento entre drenes en función de los coeficientes Δ y λ (Ritzema, 1994).

Δ	λ											
	50	100	150	200	300	400	500	600	800	1000	1500	2000
3	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
4	3.98	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
5	4.69	4.85	4.90	4.92	4.95	4.96	4.97	4.98	5.00	5.00	5.00	5.00
6	5.27	5.63	5.76	5.82	5.88	5.91	5.93	5.94	5.96	5.97	5.99	6.00
7	5.74	6.34	6.55	6.66	6.77	6.82	6.86	6.89	6.82	6.94	6.97	6.98
8	6.13	6.98	7.30	7.48	7.64	7.72	7.78	7.82	7.86	7.89	7.92	7.95
9	6.41	7.54	7.97	8.23	8.47	8.60	8.68	8.73	8.78	8.83	8.88	8.92
10	6.56	8.04	8.63	8.94	9.27	9.44	9.56	9.63	9.72	9.77	9.83	9.87
15	7.10	9.87	11.10	11.90	12.80	13.30	13.70	13.90	14.10	14.30	14.50	14.60
20	7.10	10.80	12.80	14.10	15.70	16.60	17.20	17.60	18.20	18.50	19.00	19.20
25	7.10	11.30	13.90	15.60	17.90	19.30	20.20	21.00	21.80	22.40	23.10	23.60
30	7.10	11.40	14.60	16.70	19.70	21.60	22.80	23.80	25.10	26.00	27.20	27.90
35	7.10	11.40	14.90	17.50	21.10	23.40	25.20	25.40	28.80	29.30	31.00	31.90
40	7.10	11.40	15.10	18.10	22.20	25.00	27.20	28.80	30.90	32.40	34.60	35.80
50	7.10	11.40	15.30	18.80	23.90	27.40	30.20	32.40	35.60	37.80	41.20	43.10
60	7.10	11.40	15.30	18.90	24.90	29.20	32.60	35.40	39.40	42.30	47.00	49.70
70	7.10	11.40	15.30	18.90	25.50	30.40	34.40	37.60	42.40	46.20	52.20	55.70
80	7.10	11.40	15.30	18.90	25.80	31.20	35.60	39.40	45.20	49.60	56.80	61.30
90	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	31.80	36.60	40.80	47.50	52.30	60.90	66.30
100	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.20	37.20	41.80	49.20	54.80	64.50	70.90
150	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.70	44.60	55.00	62.50	77.50	88.40
200	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.40	66.50	85.50	99.70
250	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.70	67.90	90.00	107.0
300	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.10	92.70	113.0
350	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	94.40	116.0
400	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.20	118.0
500	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.50	121.0
600	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.50	122.0
700	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.50	122.0
800	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.50	122.0
900	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.50	122.0
1000	7.10	11.40	15.30	18.90	25.90	32.40	38.80	44.80	56.80	68.20	95.50	122.0

B. Régimen transitorio.

Las condiciones de régimen transitorio permiten obtener el espaciamiento entre drenes como una función del tiempo en que se desea el abatimiento del manto freático, desde una posición inmediatamente después del riego, hasta la profundidad deseada antes de aplicar el siguiente riego.

La fórmula más utilizada en este caso es la de Glover-Dumm (Ritzema, 1994):

$$L = \frac{\pi \sqrt{\frac{Kdt}{\mu}}}{\sqrt{\ln 1.16 \frac{h_o}{h_t}}} \quad (3.6)$$

L = espaciamiento entre drenes (m).

π = 3.1416

K = conductividad hidráulica del suelo (m/día).

d = espesor saturado equivalente (m).

μ = porosidad drenable (adimensional).

α = factor de reacción (1/día).

h_o = elevación media del nivel freático con respecto al nivel del agua de los drenes inmediatamente después del riego, es decir, el nivel inicial del manto freático (m).

t = tiempo en el cual debe abatirse el nivel del manto freático (días).

h_t = elevación media del nivel freático con respecto al nivel del agua en los drenes antes del siguiente riego (m).

El cálculo se realiza en forma análoga al régimen permanente.

3.3.2. Trazo de drenes y colectores

Una vez calculado el espaciamiento, la siguiente etapa consiste en trazar la red de drenes y colectores en un plano de la parcela. El objetivo principal de esta operación, es lograr la alternativa con menor profundidad en la descarga que cumpla con los parámetros de diseño.

Se recomienda que los drenes laterales queden ubicados paralelamente entre ellos, con el espaciamiento seleccionado (ajustado para que se tenga un número de líneas de drenaje equidistantes, según las dimensiones del terreno) y de preferencia, en sentido aproximadamente perpendicular a la pendiente mayor del terreno.

Los drenes más cercanos a la orilla del terreno deberán ubicarse a una distancia no mayor de la mitad del espaciamiento. Cuando un dren lateral quede paralelo a un dren a cielo abierto, la distancia entre ellos podrá ser 50% mayor al espaciamiento (ilustración 3-3).

En terrenos pequeños (hasta 20 ha) que cuentan con un dren colector abierto en la parte baja, es posible que los drenes laterales descarguen directamente en el colector abierto.

En terrenos más grandes y con topografía más abrupta será necesario considerar colectores parcelarios entubados, tratando de minimizar la longitud de ellos debido al alto costo de la tubería.

Generalmente se tendrán que probar varias alternativas antes de seleccionar la más apropiada. En este proceso es necesario considerar que los drenes y colectores deberán tener una pendiente mínima de 0.001.

Para evitar cambios en el diámetro de los drenes, es conveniente que su longitud no rebase los 400 metros. La verificación de los diámetros propuestos así como los cambios de los mismos, se explica en el punto 3.5. **Cálculos hidráulicos.**

Para evitar un aumento de las filtraciones desde los canales de tierra, se procura que en distancias menores a 20 m, los drenes laterales no sean paralelos a los canales.

Cuando los terrenos tienen salientes irregulares, se agregan drenes aislados para drenar estas áreas.

Se deben evitar en lo posible los cruces con canales y caminos, ya que encarecen considerablemente al sistema de drenaje. En cruces indispensables con canales, deberá utilizarse tubería sin ranurar.

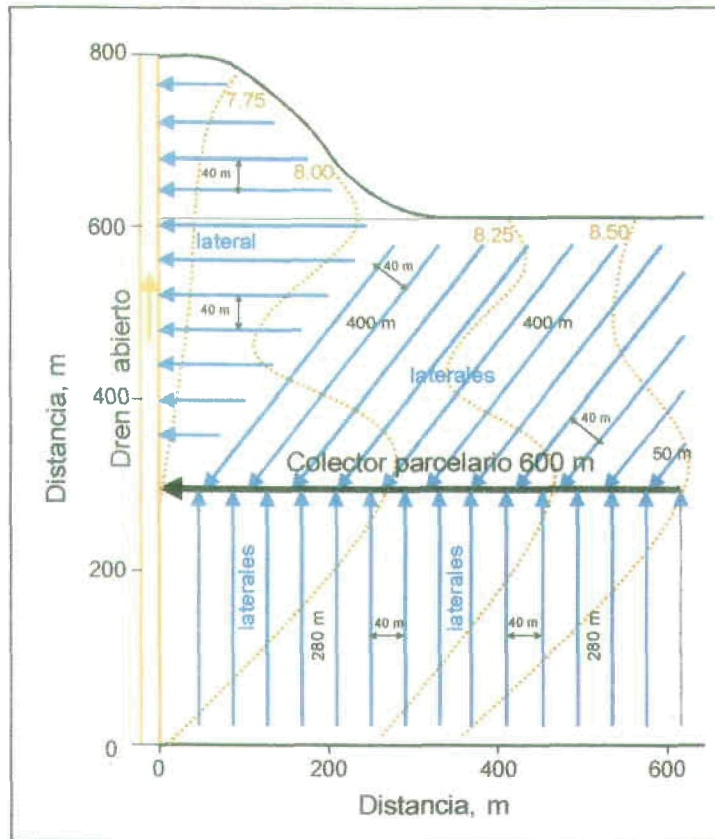


Ilustración 3-3. Ejemplo de trazo de drenaje

Los drenes pueden unirse al colector entubado por un solo lado o por ambos, cuando el terreno tiene pendientes convergentes.

3.4. Diseño en perfil

Una vez propuesta una ubicación de drenes laterales y colectores parcelarios, se procede a hacer el diseño en perfil que consiste en lo siguiente:

- Calcular el perfil del terreno a lo largo de la ubicación propuesta para el colector entubado.
- Proponer la ubicación del colector en el perfil calculado, tratando que la pendiente sea cuando menos de 0.001 y que las aguas puedan descargar libremente en el colector abierto (en este caso, la descarga debe estar por lo menos 20 cm por encima del nivel máximo del agua).
- Calcular los perfiles del terreno en la ubicación de cada dren lateral que descargue en el colector analizado y trazar en dichos perfiles los drenes

correspondientes. Este último trazo se realiza a partir del punto de descarga (que es la parte superior de la tubería del colector en el punto de unión con el lateral) y considerando la pendiente de diseño.

- Estimar la longitud de drenes que quedan por encima de la profundidad de diseño mínima,

Si el porcentaje de la longitud de drenes por encima de la profundidad de diseño, con respecto a la longitud total de drenes, es mayor al 5% o 10% (según se esté dispuesto a aceptar que en el 5% o 10% del área de proyecto no funcionarán adecuadamente), se deberán probar nuevas alternativas con las consideraciones siguientes:

- ◆ Cambiar la pendiente de tramos del colector o drenes. Para evitar riesgos de azolvamiento, se recomienda no considerar cambios de mayor a menor pendiente en el sentido del escurrimiento. Los cambios de pendiente se deberán realizar en cadenamientos múltiplos de 5 metros.

- ♦ Cambiar la ubicación del colector y drenes laterales, es decir, proponer un nuevo diseño en planta.
- ♦ Considerar la posibilidad de elevar mecánicamente las aguas de drenaje.

Debido a los costos de instalación y operación de los equipos de bombeo, generalmente se evita considerar esta posibilidad. La falta de seguridad de los equipos instalados en el campo, es otro factor que debe considerarse al analizar la factibilidad de esta alternativa.

3.5. Cálculos hidráulicos

Los cálculos hidráulicos consisten en:

- a) Calcular el gasto que debe ser removido por drenes y colectores.
- b) Verificar que la capacidad de conducción con las pendientes y diámetros propuestos, sea suficiente para desalojar los gastos que deben ser removidos.
- c) Verificar que la velocidad del agua en sitios críticos sea superior a 0.2 m/s para evitar el riesgo de azolvamiento.

Los cálculos se realizan para drenes representativos y para diferentes tramos a lo largo del colector, con el objeto de detectar los puntos donde se requiera incrementar el diámetro de la tubería propuesta.

Frecuentemente en colectores de más de 400 m de longitud, resulta necesario incrementar el diámetro en su parte final. El diámetro requerido para drenes colectores depende del área servida por sus laterales, así como del módulo de drenaje, como se explica más adelante.

En el caso de colectores, en algunas ocasiones resulta más económico utilizar dos tubos de diámetro más pequeño (4" o 6") que un tubo de diámetro grande (6" o 8").

El gasto que debe remover un dren en cualquier sección de su desarrollo, es:

$$Q_r = q A_d \quad (3.7)$$

donde:

Q_r = gasto que debe ser removido (m^3/s).

q = módulo de drenaje ($m/día$).

A_d = área drenada (m^2).

Normalmente las áreas drenadas son rectangulares, entonces:

$$A_d = x_d L \quad (3.8)$$

donde:

x_d = distancia desde el inicio hasta la sección de cálculo (m).

L = espaciamiento entre drenes (m).

El gasto de los drenes y colectores es máximo en la descarga. El gasto de los colectores entubados es la suma del gasto de los drenes que desembocan en ellos.

La capacidad de conducción de las tuberías utilizadas se calcula con fórmulas de la hidráulica, en función de la dimensión, rugosidad y pendiente (Ritzema, 1994):

$$Q_c = 22 d^{2.667} i^{0.5} \quad (3.9)$$

para tubos corrugados, y

$$Q_c = 50 d^{2.714} i^{0.572} \quad (3.10)$$

para tubos lisos, donde:

Q_c = capacidad de conducción (m^3/s).

D = diámetro interno del tubo (m).

i = pendiente de la tubería (adimensional).

El diámetro propuesto para la tubería se acepta si se cumple la condición de que:

$$Q_c \geq Q_r$$

La velocidad de escurrimiento se calcula mediante las siguientes fórmulas (Ritzema, 1994):

$$V = 28 d^{0.667} i^{0.5} \quad (3.11)$$

para tubos corrugados, y

$$V = 64 d^{0.714} j^{0.572} \quad (3.12)$$

para tubos lisos, donde:

V = velocidad de movimiento del agua (m/s).

Esta velocidad debe ser superior a 0.1 m/s para evitar o disminuir los problemas de depósitos de azolves.

3.6. Materiales y accesorios

Además de la tubería en los proyectos de drenaje, deben considerarse otros materiales y accesorios que se describen a continuación.

3.6.1. Tubería de drenaje

Los materiales plásticos más comunes utilizados en la fabricación de tubería son el cloruro de polivinilo (PVC) y el polietileno. Para un mismo peso y tamaño, la tubería de polietileno es más resistente a las presiones externas que la de PVC, aunque ésta es más barata.

Las tuberías plásticas vienen en dos presentaciones: corrugadas y lisas; las primeras son las que se utilizan en México.

Las tuberías lisas son rígidas y su longitud no excede a los 5 metros. Las corrugadas son flexibles, de alta resistencia al aplastamiento, pero oponen una mayor resistencia al flujo del agua, lo que implica una menor capacidad de conducción que la tubería lisa para un mismo diámetro.

La tubería corrugada con diámetro de 4" existe en el mercado en rollos de hasta 900 m de longitud.

Debido a su flexibilidad, las tuberías de plástico son las únicas que pueden colocarse de forma continua en el perfil del suelo.

Los diámetros de tubería de drenaje subterráneo más utilizados en la práctica son de 3", 4", y 6" (foto 4).

El diámetro más utilizado actualmente en México para drenes laterales, es el de 4 pulgadas.

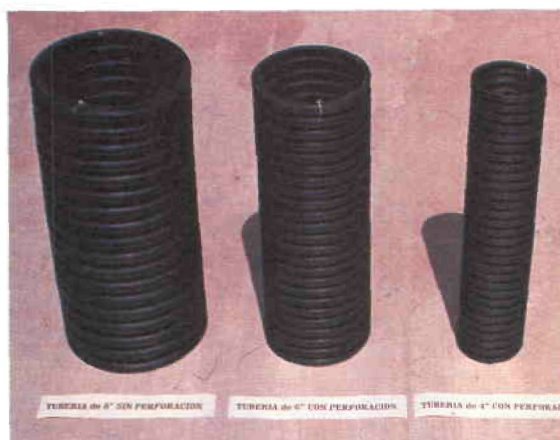


Foto 4. Tubería de drenaje

3.6.2. Accesorios

Los accesorios más utilizados son:

- ◆ Coples tipo "T" o de unión para unir tramos de tubería de igual diámetro (foto 5).
- ◆ Tapones, para cerrar la parte final de la tubería (foto 5).



Foto 5. Coples tipo "T" o de unión y tapones

- ◆ Reducciones para unir tramos de tubería de diferente diámetro.
- ◆ Codos de 90°, coples "T" o "Y" con reducción, para conectar drenes laterales con colectores o para cambios de dirección (foto 6).
- ◆ Rejillas protectoras, para evitar la entrada de animales a la tubería en la descarga (foto 6).
- ◆ Señalamientos de descarga, para evitar daños en la tubería o estructuras de apoyo durante el mantenimiento de los drenes a cielo abierto y para la propia ubicación de la descarga (foto 6).



Foto 6. Diferentes accesorios de drenaje parcelario

3.6.3. Filtros

Los filtros pueden ser como los que se mencionan:

- ◆ Geotextiles: malla de poliéster (calcetín) o trenzado de polipropileno (foto 7).
- ◆ Materiales orgánicos como fibra de coco (foto 7).
- ◆ Arena gruesa y grava.
- ◆ Lámina de fibra de vidrio.



Foto 7. Diferentes tipos de filtros

Estos materiales se colocan alrededor de los tubos de drenaje (Ritzema, 1994), para:

- ◆ Prevenir o restringir la entrada de partículas de suelo a las tuberías, donde pudieran asentarse y eventualmente taponarlas.
- ◆ Proporcionar un medio de alta permeabilidad alrededor de las tuberías para reducir la resistencia de entrada del agua.
- ◆ Brindar una base estable para sostener las tuberías y evitar el daño que pudiera ocasionar el peso de la masa de suelo. En este último caso es necesario que el material filtrante, como la grava, rodee toda la tubería.

A pesar del gran esfuerzo de investigación realizado durante los últimos años, aún no se cuenta con criterios cuantitativos confiables para el diseño o selección de los filtros, por lo que hasta el momento se basa en recomendaciones empíricas y en la experiencia local acumulada.

De la práctica holandesa surgieron las siguientes recomendaciones sobre la selección y uso de filtros (Ritzema, 1994):

- a) Suelos con un contenido de arcilla superior a 25 %, con una alta estabilidad estructural, no requieren filtros.
- b) Suelos de textura gruesa libres de limos y arcillas, de estructura inestable, requieren solamente un filtro como una malla de poliéster.
- c) Suelos con un contenido de arcilla de 5% a 25%, si los drenes se instalan en condiciones secas, no requieren de filtro. Si los drenes se instalan en condiciones húmedas es recomendable el uso de un filtro delgado.
- d) Suelos con un contenido de arcilla inferior a 5 % y con un alto contenido de limos, requieren un filtro que rodee completamente la tubería.

La utilización de filtros de grava y arena se recomienda cuando los tubos se colocan en una trinchera con presencia de agua del nivel freático, aunque su uso está limitado por el alto costo que se incrementa notablemente por la distancia a los bancos de material.

3.7. Justificación económica

La construcción de los sistemas de drenaje requiere la verificación de la rentabilidad económica de las inversiones que representan. Para ello deberán calcularse los costos y estimarse los beneficios del drenaje.

3.7.1. Costos

Los costos de los sistemas están constituidos por:

- ♦ Estudios previos que incluyen estudios topográficos, análisis de suelos, determinación de la conductividad hidráulica, visitas a las parcelas, etcétera.
- ♦ Materiales y accesorios, incluyendo principalmente tubería de diferente diámetro, coples sencillos y en "T", uniones, tapones, rejillas, filtros, etcétera.
- ♦ Instalación: generalmente se cobra por metro lineal, en función de la profundidad. Mientras no se rebase el rango de profundidad en que se puede instalar el equipo disponible por parte de la compañía constructora, el precio puede ser el mismo. Un caso especial puede resultar cuando se requieren dos tractores para la tracción de la maquinaria. Algunas compañías pueden cobrar un precio por metro lineal del orden de tres a cuatro dólares, que incluye materiales e instalación.
- ♦ Operación y mantenimiento durante la vida útil del sistema.
- ♦ Intereses por financiamiento.

3.7.2. Estimación de beneficios

Los beneficios se estimarán en función del incremento de la productividad del terreno por efecto del drenaje. Por la dificultad que esto representa, se recomienda utilizar parcelas de referencia en las que se dé seguimiento a los rendimientos de los cultivos.

3.7.3. Indicadores económicos

Los sistemas de drenaje son justificados, con mucha frecuencia, comparando los costos directos del drenaje con los beneficios derivados de hacer sostenible la productividad del terreno o de aumentarla.

Los parámetros más utilizados para realizar un análisis económico y financiero son: la Relación beneficio costo (RBC) y la Tasa interna de retorno (TIR).

3.7.4. Relación beneficio costo (RBC)

La RBC se define como el cociente de dividir la suma de los valores actualizados de los beneficios, entre la suma de los valores actualizados de los costos. Su expresión matemática es:

$$RBC = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{B_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=1}^n \frac{C_j}{(1+i)^j}} \quad (3.13)$$

donde:

B_j = beneficio neto real debido al drenaje en el año j (\$/ha) que se calcula como:

$$B_j = BCD_j - BSD_j$$

donde:

BCD_j = valor de la producción en áreas con drenaje parcelario (\$/ha) en el año j .

BSD_j = valor de la producción en el área sin drenaje (\$/ha) en el año j .

C_j = costos totales en el año j (\$/ha), que se calculan como:

$$C_j = CP_j + Am_j + Cop_j$$

donde:

CP_j = costos de producción en el año j (\$/ha).

Am_j = amortización anual de la inversión (\$/ha) en el año j .

Cop_j = costo de operación y mantenimiento del sistema de drenaje (\$/ha) en el año j .

i = tasa anual de interés bancario (fracción decimal).

$J = 1, 2, 3, \dots, n$; n es el número de años de evaluación que corresponden a la vida útil del sistema (ejemplo: cincuenta años).

Un proyecto es más redituable, en la medida que el valor de la RBC sea mayor a uno.

3.7.5. Tasa interna de retorno (TIR)

La TIR se define como la tasa de interés que, al aplicarse a los costos y beneficios durante la vida útil de un proyecto, hace que el valor actual de los beneficios sea exactamente igual al valor actual de los costos.

El valor de la TIR, expresado en valor decimal, se encuentra por tanteos en la siguiente igualdad:

$$\sum_{j=1}^n \frac{(B_j - C_j)}{(1 + TIR)^j} = 0 \quad (3.14)$$

Para que un proyecto sea considerado como redituable, la TIR debe ser mayor que la tasa de interés bancario vigente.

Como se sabe, un problema derivado de las crisis económicas es la variación de esta tasa de interés. Además, estos indicadores económicos no toman en cuenta beneficios indirectos como la generación de empleos en el campo.

Los apoyos que otorga el gobierno, a través de diferentes programas, tienden a disminuir los costos de construcción, lo que se refleja en un aumento de la RBC y de la TIR. Sin embargo, para facilitar la toma de decisiones es importante que la estimación de costos y beneficios sea lo más objetiva posible.

La experiencia acumulada y documentada por las autoridades de los distritos de riego o de las asociaciones de usuarios, será de gran valor para mostrar a los agricultores la conveniencia o limitaciones de los sistemas de drenaje parcelario.

3.8. Presentación del proyecto

La presentación del proyecto de drenaje constará de:

3.8.1. Memoria técnica

- a) Antecedentes del proyecto.
- b) Información básica sobre topografía, freaticimetría, salinidad de suelos, texturas y conductividad hidráulica.
- c) Cálculo del espaciamiento entre drenes.
- d) Plano con el diseño detallado del drenaje.
- e) Perfiles longitudinales de los colectores.
- f) Cálculos hidráulicos.
- g) Justificación económica.

3.8.2. Plano de construcción de la red de drenaje (colectores y laterales)

- a) Topografía e infraestructura de riego y drenaje existente.
- b) Ubicación de laterales y colectores e información básica con las convenciones siguientes:
 - ◆ Los colectores se denominarán con letras mayúsculas: A, B, C, etcétera.
 - ◆ Los laterales de la margen izquierda de cada colector se identificarán con la letra del colector correspondiente, seguida de un número non (A1, A3, A5, etcétera).
 - ◆ Los laterales de la margen derecha de cada colector se identificarán con la letra del colector correspondiente, seguida de un número par (A2, A4, A6, etcétera).
 - ◆ Cuando los laterales descarguen por un sólo costado del colector, su numeración será consecutiva (A1, A2, A3, etcétera).
 - ◆ En el inicio y la descarga de cada lateral y cada colector se anotará la profundidad y la elevación de la base del tubo, así como la longitud, pendiente y diámetro de la tubería.

- ◆ En drenes con cambios de pendiente o de diámetro, se deberán anotar los valores correspondientes para cada tramo.

3.8.3. Especificaciones técnicas

Serán concentradas en un cuadro en el que, para cada colector de características similares, se indiquen los siguientes datos: identificación del dren colector, clave o numeración de cada uno de los laterales, cotas topográficas y profundidades al inicio y final de cada tramo de colector y de los laterales; pendiente, longitud y caudal en el tramo de colector y cada lateral, incluyendo el caudal acumulado para el colector; diámetro de tubería y la cantidad de tubería requerida para cada caso.

3.9. Ejemplo del diseño

En el distrito de riego 038, Río Mayo, Sonora, se realizó el proyecto para el diseño del drenaje parcelario en una sección de 72 ha perteneciente al Módulo Dos, con las siguientes características:

- ◆ El terreno tiene solamente un cultivo al año que es trigo y su sistema de riego es por melgas.
- ◆ De acuerdo con los estudios agrológicos, el suelo es franco arcilloso poco permeable.
- ◆ En la capa, hasta 30 cm de profundidad, el suelo tiene relativamente un bajo contenido de sales, principalmente cloruros. La conductividad eléctrica del extracto de saturación en este estrato varía entre 8 dS/m y 10 dS/m, lo que significa que es un suelo con pocos problemas de salinidad.
- ◆ Según la descripción de los perfiles profundos de los pozos de bombeo (hasta 80 m), se infiere que la misma textura se encuentra aproximadamente hasta 5 m de profundidad. A mayor profundidad, la textura del suelo es más arenosa y se supone que la conductividad hidráulica en estos estratos profundos es más alta. No hay datos confiables y detallados sobre la profundidad del hidroapoyo.

3.9.1. Determinación y cálculo de la conductividad hidráulica

Para medir la conductividad hidráulica del terreno, se construyó una serie de pozos, encontrando la profundidad del nivel del manto freático entre 0.5 m y 0.8 m durante el periodo de riegos. Considerando que el nivel freático se encontraba a una profundidad adecuada para determinar la conductividad hidráulica, a continuación se muestran los datos de uno de los sitios seleccionados, basados en la nomenclatura de la ilustración 3-1:

- ◆ Profundidad del pozo: $Y' = 2.2$ m.
- ◆ Radio del pozo: $r_s = 0.0508$ m.
- ◆ Profundidad del nivel freático: $a_f = 0.6$ m.
- ◆ Altura inicial del agua en el pozo: $Y = Y' - a_f$
 $Y = 2.2 - 0.6 = 1.6$ m.
- ◆ Profundidad del abatimiento: $y_0 = 0.8$ m.

Las lecturas obtenidas durante la prueba de campo se presentan en el cuadro 3-4.

Cuadro 3-4. Lecturas de la determinación de la conductividad hidráulica.

Δt_i (seg)	Lectura (m)	y (cm)		Δy_i (cm)
		Inicial	Final	
0	1.400	-----	80.0	-----
30	0.902	80.0	76.0	4.0
30	0.802	76.0	73.0	3.0
30	0.77	73.0	70.5	2.5
30	0.586	70.5	68.0	2.5
30	0.566	68.0	66.0	2.0
30	0.548	66.0	64.2	1.8
30	0.530	64.2	62.4	1.8

$\Delta T = 210$

$\Delta Y = 17.6$

De acuerdo con estos datos y utilizando la fórmula 3.1, la conductividad hidráulica K es igual a:

$$K = C_K \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

donde:

$$C_K = \frac{4000}{\left(20 + \frac{Y}{r_s}\right) \left(2 - \frac{y_s}{Y}\right)} \frac{r_s}{y_s}$$

donde:

$$y_s = y_0 - \Delta h / 2 = 0.8 - 0.176 / 2 = 0.712 \text{ m}$$

$$C_K = \frac{4000}{\left(20 + \frac{1.6}{0.0508}\right) \left(2 - \frac{0.712}{1.6}\right)} \frac{0.0508}{0.712} = 3.575$$

$$K = C_K \frac{\Delta y}{\Delta t} = 3.575 \frac{17.6}{210} = 0.3 \text{ m/día}$$

3.9.2. Cálculo del espaciamiento entre drenes

El cálculo del espaciamiento entre drenes puede ser realizado con fórmulas de régimen permanente y de régimen transitorio. Ambos procedimientos se muestran a continuación:

A. Régimen permanente.

Según las recomendaciones dadas, se utilizaron los siguientes parámetros:

- ♦ Una profundidad de los drenes parcelarios (Pd) igual a 1.7 metros.
- ♦ El módulo de drenaje de acuerdo a los datos obtenidos en las parcelas de prueba, es $q = 2.5 \text{ mm/día} = 0.0025 \text{ m/día}$.
- ♦ La profundidad permisible del manto freático (para cultivos de grano y hortalizas), se considera $a_f = 1.20 \text{ m}$ durante el periodo de riegos.
- ♦ Por lo tanto, la sobre-elevación media del nivel freático con relación al nivel del agua en los drenes durante el periodo de riegos, es $h = Pd - a = 1.70 - 1.20 = 0.5 \text{ m}$.
- ♦ Se propone utilizar tubería de drenaje con un diámetro de 4" (10.16 cm) o el radio del dren $r_0 = 0.0508 \text{ m}$.
- ♦ Las condiciones de textura existente en la zona permiten recomendar el uso de un filtro de poliéster.

Con estos datos, el espaciamiento entre drenes se calculó por medio de la fórmula (3.4):

$$L = 2h \sqrt{\frac{K}{q} \left(1 + \frac{2d}{h}\right)}$$

donde:

$$K = 0.3 \text{ m/día.}$$

$$q = 0.0025 \text{ m/día.}$$

$$h = 0.5 \text{ m.}$$

y el valor de d se obtiene del cuadro 3-3 considerando las siguientes variables:

$$\lambda = L / r_0 = L / 0.05.$$

$$\Delta = D / r_0 = D / 0.05 \text{ y}$$

$$\delta = d / r_0$$

donde:

D es la profundidad del hidroapoyo.

Como el valor de D no está definido, se puede considerar un valor de Δ máximo de $\Delta = 1000$.

Como se explicó, el espaciamiento (L) se calcula por iteraciones. Se propone un valor inicial $L' = 20 \text{ m}$ y se calcula $\lambda = 400$. Para este valor de λ y $\Delta = 1000$, se obtiene:

$$\delta = 32.40 \text{ y,}$$

$$d = 32.40 * 0.05 = 1.62 \text{ m.}$$

Con la ecuación para determinar el espaciamiento, se calcula un segundo valor de $L = 29.96 \text{ metros}$.

Como el valor obtenido de L es mucho mayor que L' , se procede a dar un nuevo valor de L' igual a 30 m, de donde se obtiene un nuevo L de 34.57 metros.

Se continúa con este procedimiento hasta que la diferencia entre los espaciamientos propuesto y calculado sea menor del 5% de L .

Para facilitar los cálculos se puede elaborar un cuadro, como el siguiente:

Cuadro 3-5. Cálculo del espaciamiento entre drenes.

L'	λ	Δ	δ	D	L
20	400	1000	32.40	1.62	29.96
30	600	1000	44.80	2.24	34.57
40	800	1000	56.80	2.84	38.51
35	700	1000	50.80	2.54	36.60

Se acepta un espaciamiento entre drenes de 35 m, con una profundidad mínima de 1.7 m. Este tipo de drenaje debe mantener el nivel freático a una profundidad media no menor de 1.2 m durante el periodo de riegos y no menor de 1.5 m durante el resto del año, lo que permite establecer las condiciones favorables para incrementar el rendimiento de los cultivos.

B. Régimen transitorio.

Las fórmulas de régimen transitorio se aplican cuando se conocen bien las variaciones reales y deseables del nivel freático en función del régimen de riegos. Para el ejemplo que se está desarrollando se parte de las siguientes consideraciones:

- ◆ Normalmente se aplican cuatro riegos al trigo por ciclo de cultivo y la lámina máxima que se aplica al inicio es de 14 cm (0.14 m). Los siguientes riegos se aplican cada 30 días en promedio.
- ◆ Se considera que el nivel freático inmediatamente después de cada riego puede alcanzar una profundidad del orden de 0.9 m (a_f) y que debe abatirse hasta una profundidad no menor de 1.2 m antes del siguiente riego.
- ◆ El nivel freático promedio debe mantenerse a una profundidad mayor a 1.2 metros.

La fórmula (3.6) puede ser utilizada directamente para calcular el espaciamiento entre drenes, cuando se conoce el tiempo t del periodo entre riegos.

Otras veces el espaciamiento se calcula primero mediante una fórmula de régimen permanente y, después, con una variante de las fórmulas (3.6) y (3.7) se calcula el tiempo

requerido para que el nivel freático se abata un cierto valor después de un riego. Si este tiempo es excesivo, el espaciamiento puede ser reducido.

A continuación se muestra el segundo procedimiento, para lo cual es necesario despejar t de la fórmula (3.7) obteniendo:

$$t = \frac{1}{\alpha} \ln 1.16 \frac{h_0}{h_t} \quad (3.17)$$

despejando α de la fórmula (3.6) y sustituyéndola en la (3.17) quedaría:

$$t = \frac{L^2 \mu \ln \left[1.16 \frac{h_0}{h_t} \right]}{\pi^2 K d} \quad (3.18)$$

donde:

$L = 35$ m.

$K = 0.3$ m/día.

$d = 1.62$ m.

$\pi = 3.1416$

$h_0 = Pd - a_f = 1.7 - 0.9 = 0.8$ m.

μ es la porosidad drenable y se obtiene en función de K con la gráfica que se presenta en la ilustración 3-2. Dado que el valor de K es 0.3 m/día, resulta que $\mu = 0.075$.

Por lo tanto:

$$t = \frac{35^2 * 0.075 * \ln \left[1.16 \frac{0.8}{0.2} \right]}{3.14^2 * 0.3 * 1.62} = 29.3 \text{ días}$$

Esto significa que con un espaciamiento entre drenes $L = 35$ m, se requieren 29.3 días después del riego más pesado para que la profundidad del nivel freático descienda desde 0.9 m hasta 1.5 m ($1.7 - 0.2$) y este periodo no supera el intervalo promedio entre riegos.

También indica que el nivel freático promedio durante los periodos entre riegos se mantendrá a la profundidad deseable de $a_f = 1.2$ m.

Por lo tanto, se acepta el valor previamente encontrado de espaciamiento L de 35 metros.

3.9.3. Ubicación de los drenes en el plano

En el plano 6 se muestra la distribución de los drenes en esta sección, la cual se encuentra localizada en las proximidades del Dren Jupateco en el distrito de riego 038.

Los colectores parcelarios se ubicaron en el sentido de la pendiente dominante. Los laterales se diseñaron para que descarguen por el lado izquierdo y en forma perpendicular a la pendiente dominante del terreno.

Se instalarán cuatro colectores parcelarios con longitudes de 1290 m, 1180 m y dos de 110 metros. Los laterales tienen longitudes que varían de 70 m hasta 500 m. En esta sección se debe instalar un total de 16,960 m de tubería de 4 pulgadas.

La longitud propuesta de colectores y drenes obedece a la forma geométrica de la sección y a la existencia de un solo dren a cielo abierto.

Por otra parte, se puede observar en este plano que existen varias regaderas.

La distribución de los laterales y colectores parcelarios se realizó de tal forma que permitiera disminuir en lo posible los cruces con regaderas. Sin embargo, dos colectores marcados con las letras A y B presentan cruces inevitables con una regadera ubicada a lo largo del Dren Jupateco. Además, cinco laterales del colector A atraviesan una pequeña regadera ubicada en el norte de esta sección.

Las pendientes de los laterales y colectores oscilan entre 0.001 y 0.002.

Se presenta en el plano la siguiente información para drenes y colectores:

- ◆ Longitud.
- ◆ Pendiente.
- ◆ Cota inicial y final de cada dren o colector.
- ◆ Numeración.
- ◆ Espaciamiento.

◆ Diámetros.

Además, el plano indica la ubicación de los drenes a cielo abierto con nomenclatura, red de distribución hidráulica y número de sección. Con la información anterior se procede a desarrollar los cálculos hidráulicos, con la finalidad de estimar el gasto, diámetro y velocidad de cada tramo.

3.9.4. Cálculos del gasto, diámetro y velocidad del agua en la tubería

A continuación, se presentan los cálculos hidráulicos de la tubería del colector B y de sus laterales.

El gasto de conducción de cada lateral se calcula a través de la ecuación:

$$Q_r = q * A_d$$

donde:

q - módulo de drenaje, $q = 0.0025$ m/día.

A_d - área que drena cada lateral y se calcula multiplicando el espaciamiento entre laterales (35 m) por la longitud de los mismos.

El gasto a conducir por el lateral (Q_r) es función directa de su longitud, que en este caso es de 210 m y representa un volumen de:

$$Q_r = 0.0025 * 210 * 35 / 86,400$$

$$Q_r = 2.12 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 0.212 \text{ l/s.}$$

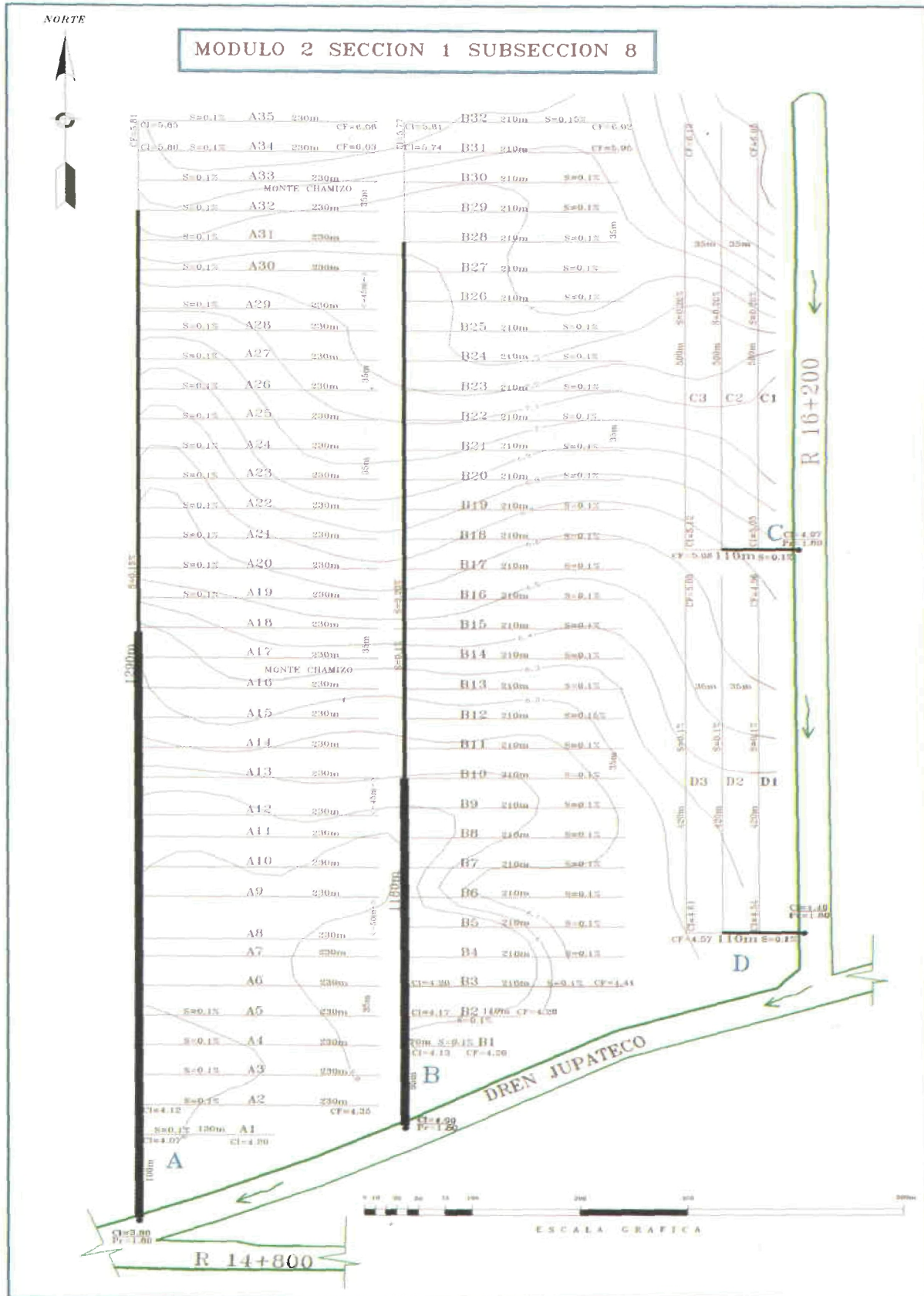
Los tubos de 4" de diámetro (0.1016 m) con pendientes mínimas de 0.001, pueden conducir hasta:

$$Q_c = 22 * 0.1016^{2.687} * 0.001^{0.5}$$

$$Q_c = 1.53 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} = 1.53 \text{ l/s.}$$

Esta capacidad de conducción es muy superior al gasto a remover obtenido con una longitud de 210 m. Esto significa que se podría reducir el diámetro de los laterales. Además, el uso de tubería de 4" permite disminuir los posibles efectos negativos durante la instalación de la misma, así como presentar un mejor funcionamiento hidráulico de la red de drenaje a largo plazo.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL DRENAJE PARCELARIO



Plano 6. Diseño detallado de drenaje parcelario

Con la finalidad de evitar problemas de erosión o azolves en los drenes laterales, se calcula la velocidad del agua de acuerdo con la pendiente y el diámetro seleccionado:

$$V = 28 * 0.1016^{0.667} * 0.001^{0.5}$$

$$V = 0.19 \text{ m/s.}$$

Este valor de velocidad es mayor que el límite mínimo de 0.15 m/s, lo que disminuye el peligro de azolvamiento del dren; y es menor del límite máximo de 2 m/s, lo que asegura que no hay ningún peligro de erosión de la

tubería.

El aumento en la pendiente de 0,001 hasta 0.002 en el tramo superior del colector, provoca un incremento de la velocidad de 1.42 veces ($2^{0.5}$) que equivale a 0.27 m/s, lo que significa que este colector funcionará adecuadamente también en este tramo.

En el cuadro 3-6 se presentan la hoja de especificaciones técnicas con los resultados de cálculo de diámetros, gastos en el colector B y en los drenes laterales.

Cuadro 3-6. Especificaciones técnicas del proyecto.

Proyecto Ejecutivo para la recuperación de 5,000 ha con problemas de salinidad y drenaje en el distrito de riego 038 Río Mayo, Sonora.														
HOJA DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS														
Módulo 2, sección 2, subsección B														
SUBSECCIÓN DE DRENAJE: B														
NÚM. DE INTERCEPTORES: 32														
ESPACIAMIENTO ENTRE DRENES: 35 m														
DREN DE DESCARGA: Jupateco														
Dist. al origen (m)	Clave	Cotas topográficas y profundidad (m)						Pend.	Long. (m)	Caudal (l/s)	Caudal acum. (l/s)	Cantidad de tubería según diámetro (m)		
		Iniciales			Finales							4"	6"	8"
		Dren	Terreno	Prof.	Dren	Terreno	Prof.							
Colector														
0	B	4.00	5.90	1.90	4.41	6.14	1.73	0.001	4.10	2.0028	6.501			41
410	B	4.41	6.14	1.73	5.49	7.33	1.84	0.001 0.002	630	3.834	4.473		630	
1040	B	5.49	7.33	1.84	5.77	7.65	1.88	0.002	140	0.639	0.639	140		
Laterales														
95	B1	4.13	5.89	1.76	4.20	5.96	1.76	0.001	70	0.071	6.501	70		
130	B2	4.17	5.87	1.70	4.28	5.97	1.69	0.001	110	0.111	6.430	110		
165	B3	4.20	5.98	1.78	4.41	6.15	1.74	0.001	210	0.213	6.390	210		
200	B4	4.24	6.05	1.81	4.45	6.16	1.71	0.001	210	0.213	6.177	210		
235	B5	4.27	5.95	1.68	4.48	6.16	1.68	0.001	210	0.213	5.964	210		
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1110	B30	5.67	7.45	1.78	5.88	7.53	1.65	0.001	210	0.213	0.639	210		
1145	B31	5.74	7.58	1.84	5.95	7.58	1.63	0.001	210	0.213	0.426	210		
1180	B32	5.81	7.81	1.89	6.02	7.58	1.56	0.001	210	0.213	0.213	210		
Total de tuberías (m)											6620	630	41	

Estos cálculos señalan que, para instalar el drenaje en esta parcela, es necesario utilizar lo siguiente:

- ◆ 6,620 m de tubería perforada de 4 pulgadas con filtro de poliéster para los deenes laterales y la parte final del colector.

- ◆ 630 m de tubería de 6 pulgadas y 410 m de 8 pulgadas, sin perforar, para el colector parcelario.

Se espera que el gasto máximo del colector durante los periodos de riego, sea de 6.5 l/s, que corresponde al módulo de drenaje de 0.0025 m/día.

Capítulo 4

Instalación y supervisión de la obra en campo

En este capítulo se describen los diferentes tipos de maquinaria y equipo que se utilizan para instalar un sistema de drenaje parcelario, indicando sus ventajas y desventajas; se explican los procedimientos de instalación y supervisión en campo.

4.1. Maquinaria y Equipo

4.1.1. Maquinaria

La maquinaria utilizada para instalar sistemas de drenaje es básicamente de dos tipos y se clasifica de acuerdo con el implemento utilizado para la instalación:

- a) Zanjadoras, que abren una trinchera o excavación de unos 20 a 50 cm de ancho, con una profundidad de hasta 2.5 m, con un dispositivo que consiste en una rueda o una cadena giratoria con cuchillas o

cucharones (foto 8).

- b) Arados de drenaje, que instalan normalmente la tubería hasta una profundidad de 1.8 m sin necesidad de abrir una trinchera, y son de dos tipos:

- ◆ Los que tienen una cuchilla vertical similar a la de un arado de subsuelo llamados cincel o subsuelo, pero que van colocando la tubería en la parte inferior (foto 9).
- ◆ Los que utilizan una cuchilla en forma de "V" llamados arados delta, que van cortando al suelo con una sección triangular y colocando la tubería en el vértice inferior, que se introduce por uno de los soportes que forman la "V", que es hueco. Estos son de fabricación más reciente (foto 10).



Foto 8. Zanjadora de cadena



Foto 9. Arado de drenaje tipo cincel o subsuelo



Foto 10. Arado de drenaje tipo "V" o delta

En general, las máquinas para instalar drenes se caracterizan por tener:

- ◆ Un dispositivo para controlar la profundidad y pendiente del dren en forma manual o automática. En este último caso, actualmente el más difundido, se usa un receptor que capta la señal proporcionada desde una torreta por un equipo emisor de rayos láser, que describe un plano a una altura de alrededor de 3 metros.
- ◆ Un dispositivo para almacenar un rollo de tubería. Otras veces la tubería se coloca en el terreno a lo largo de los sitios donde se construirán los drenes.
- ◆ Un dispositivo para colocar la tubería.
- ◆ Un dispositivo (opcional) para rellenar la trinchera cuando se utilizan máquinas zanjadoras.
- ◆ Un tanque de agua (opcional) para lavar las cuchillas y evitar que se pegue la arcilla cuando se utilizan máquinas zanjadoras.

- ◆ Una tolva (opcional) para almacenar y colocar el material utilizado como filtro (grava, arena, etcétera).

Los arados de drenaje, presentan las siguientes ventajas ante las zanjadoras:

- ◆ No abren trinchera, por lo que se ahorra el tiempo para rellenarlas.
- ◆ Mayor velocidad de instalación de los drenes.
- ◆ Son más productivos porque tienen menos desgaste y descomposturas, debido a que poseen menos partes móviles en relación con las zanjadoras.
- ◆ Están mejor adaptados para la instalación de drenes en suelos pedregosos.
- ◆ La instalación de drenes hasta 1.3 m o 1.4 m de profundidad, es más económica. Las ventajas de la instalación con arados de drenaje, decrecen a medida que aumenta la profundidad de instalación.

Por otro lado, los arados de drenaje tienen las siguientes desventajas:

- ◆ Debido a la mayor velocidad en la instalación de la tubería, existe más variación en su pendiente y, por lo tanto, menor calidad en la construcción.
- ◆ Tienen limitaciones para instalar drenes a más de 1.80 m de profundidad.
- ◆ No se puede verificar visualmente la calidad de la instalación de los drenes.
- ◆ Se requiere que el suelo no esté muy húmedo (saturado), como podría estarlo después de una lluvia o un riego, porque las orugas de los tractores son menos eficientes para la tracción.
- ◆ Requieren tractores de mayor potencia y peso para su tracción y homogeneidad en la pendiente de colocación, por lo que en algunos casos se usa otro tractor para jalar al que instala, lo que incrementa el costo (foto 11).



Foto 11. Uso de dos tractores durante la instalación del drenaje parcelario

Una desventaja específica de los arados de drenaje tipo cincel en relación con el tipo delta, es que en los primeros se ha observado que en suelos arcillosos la cuchilla compacta el suelo alrededor del sitio donde se colocará el dren, lo que disminuye la captación de agua por la tubería de drenaje.

4.1.2 Equipo de apoyo

Para la instalación del sistema de drenaje es necesario disponer del siguiente equipo de apoyo:

- ◆ Un receptor de rayos láser adicional para calibrar el receptor láser de la máquina al momento de la instalación.
- ◆ Una retroexcavadora con cargador frontal para remover bermas o bordos en drenes a cielo abierto, así como para efectuar las excavaciones en los sitios de las conexiones de drenes laterales y colectores, etcétera.
- ◆ Un tránsito para localizar bancos de nivel y ubicar las descargas.

Los recursos humanos sugeridos son los siguientes: un ingeniero supervisor, un topógrafo, tres obreros y un operador experimentado en este tipo de maquinaria, de quien depende en gran medida la calidad de la instalación.

4.2. Trazo en campo

El trazo de campo se realizará de acuerdo con el diseño propuesto para el sistema de drenaje. En sistemas compuestos por drenes laterales y colectores entubados, el trazo consta de las siguientes fases:

4.2.1. Localización de las descargas en planta y en perfil

Para localizar los sitios donde descargarán los drenes se ejecutan los siguientes pasos:

- ◆ Ubicar un banco de nivel específico para el proyecto.
- ◆ Localizar en el dren a cielo abierto la ubicación de la descarga del colector, utilizando el banco de nivel o una estructura.
- ◆ Verificar la cota de la plantilla y el nivel máximo del agua en el dren a cielo abierto, para asegurar la descarga libre del colector.
- ◆ Detectar si existe algún obstáculo que impida la instalación.
- ◆ Verificar que el colector se instale a la elevación topográfica indicada en el plano detallado de diseño.

4.2.2. Trazo de colectores

Para marcar en el campo los drenes colectores se realiza lo siguiente:

- ◆ Estacionar el nivel topográfico en el punto de descarga.
- ◆ Señalar en el terreno la ubicación del colector de acuerdo con el diseño.
- ◆ Verificar el trazo topográfico del colector y sus profundidades.
- ◆ Correr una nivelación sobre el eje del colector, señalando puntos a intervalos de 50 m con una estaca o bandera. Además, es indispensable marcar los puntos donde haya cambios de pendiente del colector de acuerdo con el diseño.
- ◆ Se deben señalar también los sitios de intercepción con los drenes laterales,

considerando el espaciamiento entre drenes conforme con el diseño.

4.2.3. Trazo de los drenes laterales

El trazo de los drenes laterales se lleva a cabo de acuerdo a lo siguiente:

- ◆ Localizar la intersección del lateral con el colector de acuerdo con el plano de diseño, colocando en ella el aparato utilizado (nivel topográfico o tránsito).
- ◆ Señalar en el terreno la ubicación del lateral de acuerdo con el diseño.
- ◆ Correr una nivelación sobre el eje del lateral, señalando puntos a intervalos de cada 50 m con una estaca o banderita. Además, es indispensable marcar los puntos donde haya cambios de pendiente en el dren lateral de acuerdo con el diseño.

Después de realizar el trazo en campo del sistema de drenaje, pueden requerirse modificaciones leves al diseño original. Estos cambios deben consultarse, aprobarse y validarse, en la oficina de ingeniería de riego y drenaje del distrito de riego correspondiente.

Una vez aceptados los cambios, se levantará un acta técnica donde se asienten las modificaciones al diseño original, conforme al nuevo trazo. Por tanto, deberán actualizarse los archivos correspondientes a efecto de que, posteriormente, se utilicen con propósitos de mantenimiento, conservación y supervisión del sistema de drenaje.

4.3. Instalación y supervisión de la obra en campo

Tomando como base el trazo en campo, se procederá a la instalación y supervisión del sistema de drenaje.

4.3.1. Instalación del sistema de drenaje

a) Preparativos:

- ◆ Realizar una prueba de compactación o dureza del suelo, que consiste en efectuar un paso de la maquinaria sin colocar tubería en aproximadamente 10 m, para observar si la máquina avanza debidamente. Si hay problemas para su

desplazamiento, se pasará la maquinaria con el cincel sin tubería a un metro de profundidad, y posteriormente se instalará ésta con un segundo paso de maquinaria. Otra solución sería que la instalación se realice con dos tractores en serie (foto 11).

- ◆ Emparejar el terreno para borrar los bordos de melgas o surcos que puedan crear

problemas al paso de la máquina instaladora.

- ◆ Quitar el bordo formado sobre las bermas por los sedimentos extraídos durante la conservación del dren a cielo abierto, para que la máquina se pueda acercar al dren abierto para iniciar la colocación del dren lateral o colector (foto 12).



Foto 12. Borrado de la berma de un dren a cielo abierto

- ◆ Colocar la torreta que emite las señales de rayo láser, en una posición que permita el proceso de instalación hasta distancias de 400 m. En terrenos muy grandes, la torreta se cambia de ubicación, conforme a las necesidades del proceso de instalación. Cuando haya vientos fuertes deberán tomarse precauciones adicionales, para asegurar la estabilidad de la torre con el emisor.

b) Instalación:

- ◆ Se proporcionará al operador de la máquina instaladora una copia del plano de diseño detallado del sistema de drenaje, donde se indiquen los cambios de diámetro y pendiente, las conexiones, etcétera.

- ◆ Se instalarán primero los drenes colectores y después, los laterales. En ambos casos la instalación se inicia por el punto de descarga (foto 13).

- ◆ Para conectar un dren lateral al colector se debe hacer una fosa utilizando una retroexcavadora o la maquinaria que se tenga disponible, teniendo mucho cuidado de no averiar o romper la tubería durante esta operación (foto 14).

- ◆ Se cuidará que la base de la zanjadora o del "arado de drenaje" quede colocada a la elevación de diseño (foto 15). De este punto, depende la calidad de la instalación.

- ◆ La instalación se debe suspender temporalmente para hacer los ajustes



Foto 13. Inicio de la instalación de un colector



Foto 14. Zanja para conectar un lateral al colector



Foto 15. Zanjadora iniciando la instalación de un lateral

necesarios, sólo cuando se tengan cambios en el diámetro en la dirección de la tubería o un cambio fuerte en la pendiente. El dispositivo con que cuenta la máquina para ir midiendo la longitud instalada de la tubería, le permite al operador saber cuándo debe detenerse para hacer cualquiera de estos cambios.

- ◆ Durante la instalación, la máquina deberá seguir, en lo posible, una línea recta.
- ◆ Se debe detener la máquina antes de terminar de instalar la tubería de drenaje, para cortarla y poner el tapón (foto 16).
- ◆ Cuando los drenes son instalados por máquinas zanjadoras, las trincheras deberán ser rellenadas con el material extraído.
- ◆ Para evitar el derrumbe de las paredes de la trinchera se recomienda terminar la instalación de tramos de dren o colector en el mismo día que se inician.

4.3.2. Supervisión de la obra en campo

De acuerdo con la experiencia mundial (*Drainage Manual*, 1993), una de las causas más frecuentes por las que se presentan fallas de los sistemas de drenaje es la falta de control de calidad durante la instalación, más que por un diseño incorrecto.

La experiencia obtenida en varios países de Europa, en Estados Unidos y en Canadá, muestra que la instalación de redes de drenaje parcelario a gran escala, sin supervisión, ha incrementado los problemas derivados de una inadecuada instalación de los colectores y laterales.

Para llevar un control de la calidad durante la instalación se recomienda que se contrate a una empresa particular, o se solicite apoyo a la oficina de riego y drenaje del distrito de riego.

Es importante que los contratistas sepan que los defectos en la instalación deberán ser corregidos por su cuenta.



Foto 16. Colocación del tapón al final de un lateral

Es recomendable que la supervisión se realice en la mayor parte de los colectores y en un 10% a 20% de los laterales tomados al azar. Estos porcentajes serán mayores al inicio de los programas de construcción y podrán reducirse en la medida en que las propias verificaciones indiquen que se ha mejorado la calidad de la instalación.

Para supervisar la instalación del sistema de drenaje, se recomienda disponer por lo menos de los siguientes recursos humanos y equipo:

a) Recursos humanos:

- ◆ Un ingeniero supervisor.
- ◆ Un topógrafo.
- ◆ Tres obreros.

b) Equipo:

- ◆ Un nivel láser.
- ◆ Un receptor de rayos láser.
- ◆ Una varilla de 180 cm de largo en forma de "T" con punta roma.

- ◆ Una retroexcavadora (opcional).

La supervisión puede realizarse durante o después de la instalación del sistema de drenaje, de acuerdo con las siguientes recomendaciones:

- ◆ Aprovechar las fosas que se realizaron para conectar los drenes laterales al colector, con el propósito de verificar la pendiente y la profundidad del mismo. Se coloca el receptor de rayo láser sobre el colector y se toma la cota; se traslada el receptor a la fosa siguiente y se repite la operación. Esto permitirá calcular la pendiente y profundidad del colector y, por lo tanto, verificar si la instalación se ajusta a las especificaciones del plano de diseño.
- ◆ El cálculo de la pendiente de un dren lateral se realiza colocando el receptor láser sobre una varilla enterrada que esté en contacto con la tubería de drenaje, y tomando la cota correspondiente en diversos puntos a lo largo del lateral. Se recomienda realizar esta operación a intervalos de 20 metros a 50 metros. Se calculan la profundidad y la pendiente y se comparan con las del diseño.

El rango de variación permisible en la verificación de profundidades, pendientes de drenes laterales y colectores, es del 50% del diámetro de la tubería, por arriba o por debajo de la línea de pendiente de diseño.

Algunos constructores verifican la pendiente de colectores parcelarios entubados mediante un nivel topográfico, sin confiarse completamente en el sistema de control del láser. Esta medida tiene particular importancia cuando el área servida por el colector es grande.

Es claro que un error de pendiente en un dren lateral sólo afectará una pequeña área de influencia; en cambio, un error en la colocación de un colector puede afectar a un área mucho mayor, donde sería muy costoso tener que reinstalar todos los drenes.

4.4. Métodos modernos para supervisar la instalación de drenaje

De acuerdo con la experiencia holandesa, tres aspectos deben considerarse con especial atención (Van Zeijts, 1990):

- ◆ La mala calidad de los materiales utilizados, en particular de la tubería de drenaje.

- ◆ La falta de alineamiento y el posible colapso de la tubería durante la instalación.
- ◆ Las variaciones en la profundidad y pendiente de las tuberías.

Estos problemas dieron lugar a los métodos y medidas que se describen a continuación.

4.4.1. Uso de materiales de calidad certificada

Actualmente en Europa y en Estados Unidos, los constructores sólo utilizan materiales de calidad certificada por un organismo gubernamental, lo cual ha disminuido la incidencia de problemas provocados por la mala calidad de los materiales.

En México se están estudiando las normas de calidad de los materiales y se está gestionando la creación de un organismo que las certifique.

4.4.2. Método *rodding*

El método más utilizado en Holanda para verificar la buena colocación de la tubería y la ausencia de aplastamientos, es el método conocido como *rodding*, de la palabra *rod* que significa varilla en inglés (Van Zeijts and Zijlstra, 1990). El aparato consta de las siguientes partes (foto 17):

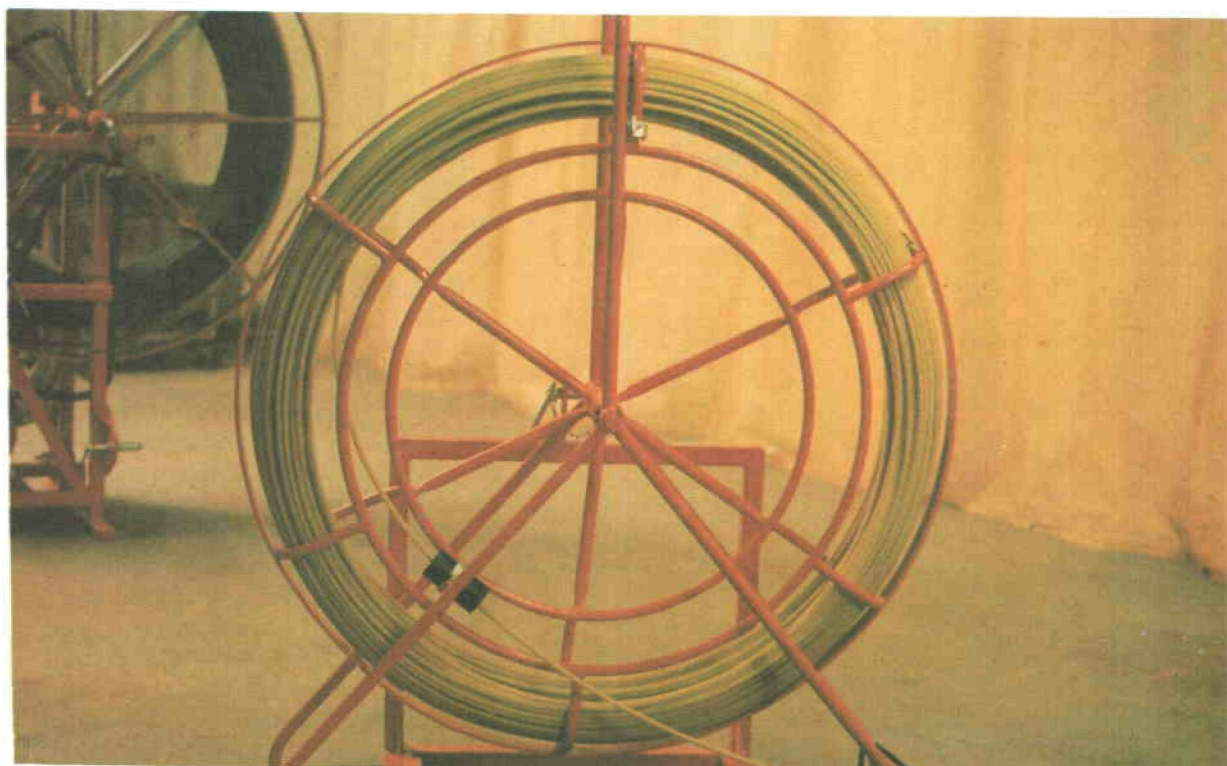


Foto 17. Equipo *rodding*

- ◆ Un soporte para enrollar el cable de 400 m de fibra de vidrio.
- ◆ Un dispositivo para medir la resistencia al empuje.
- ◆ Una varilla de 0.9 m, compuesta por un cabezal en forma de torpedo de 15 cm de largo y con un diámetro un poco menor que el de la tubería que se verifica (foto 18).

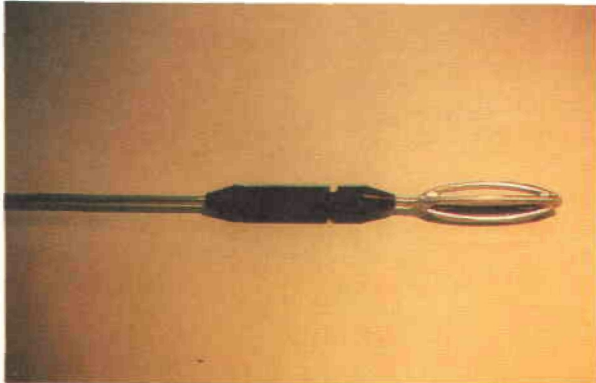


Foto 18. Cabezal del rodding

El *rodding* se utiliza principalmente en laterales con descarga directas al dren a cielo abierto y consiste en empujar la varilla con el cable dentro de la tubería de drenaje y medir la resistencia al movimiento mediante un dispositivo que se une al cable.

Un aumento en la resistencia indica que el dren no está alineado o que existe una obstrucción. El sitio donde esto ocurre puede localizarse por las marcas de distancia que tiene el cable, o utilizando un receptor que capta la señal de radio enviada por un emisor que se puede colocar en el cabezal. En caso necesario, este sitio deberá ser abierto para reemplazar el tramo dañado de tubería.

4.4.3. Método de Collins-Schaffer y *Consoil profiling*

El método Collins-Schaffer consiste en medir las variaciones de la profundidad de la tubería mediante un dispositivo que registra la presión hidrostática a lo largo de la tubería de drenaje (de Boer, 1987). El equipo utilizado consta de las siguientes partes (foto 19):



Foto 19. Equipo Collins-Schaffer

- ◆ Una manguera flexible de 200 m llena de agua, sellada en un extremo y conectada en el otro a un depósito de agua de nivel fijo.
- ◆ Un cabezal con un piezómetro electrónico (transductor), localizado en el extremo sellado de la manguera que registra la presión hidrostática debida a la diferencia de nivel entre el agua en el depósito y la posición de la manguera dentro de la tubería. Estas presiones son registradas en forma digital, a su vez, por una

computadora. La manguera se introduce a la tubería y después se extrae a velocidad constante. Mientras se saca, se realizan las mediciones de las variaciones de la profundidad.

Otro dispositivo similar, basado en el mismo principio pero más sencillo, denominado *Consoil profiling* ha sido desarrollado por una firma sueca y es operado por la firma holandesa Homburg (foto 20).

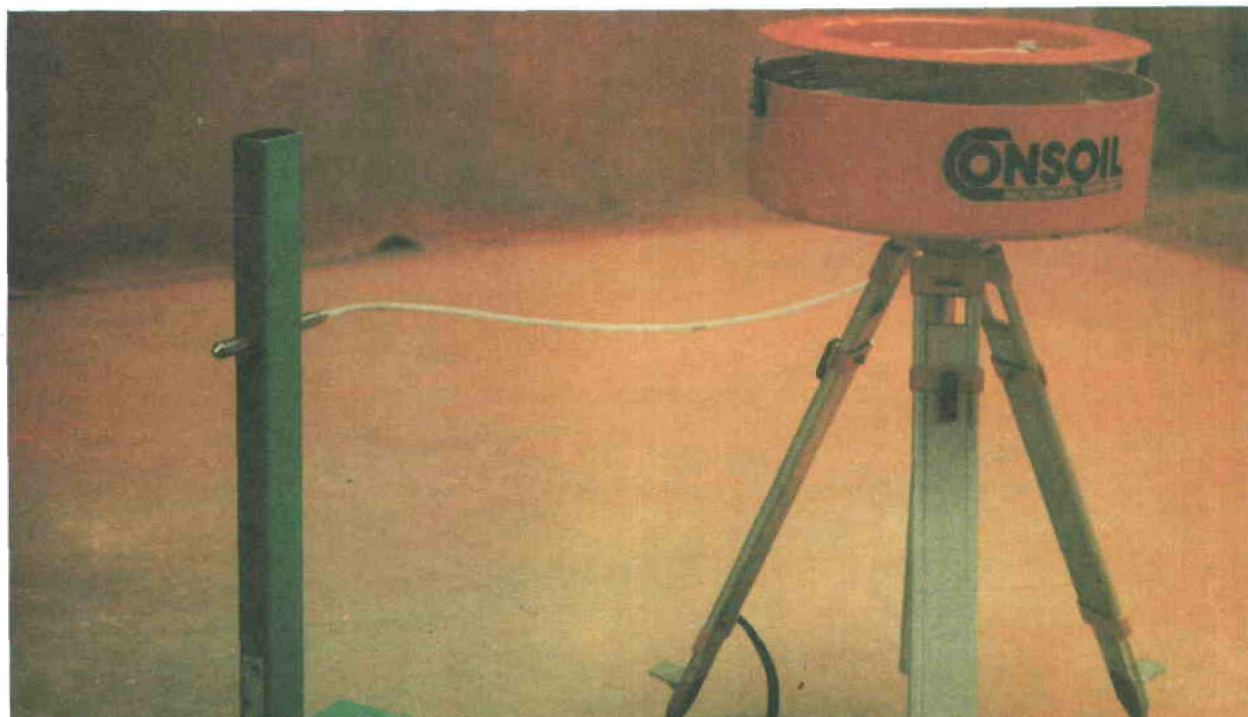


Foto 20. Equipo *Consoil profiling*.

De acuerdo con el criterio de permitir variaciones de profundidad y pendiente de 50% del diámetro de la tubería, en pruebas hechas en Holanda para tuberías de 50 mm (2 pulgadas), en 1983 y 1984, se comprobó que sólo el 19% y 38 % respectivamente, de los sistemas de drenaje, habían sido instalados correctamente. Esto trajo como consecuencia un estudio cuidadoso de las causas de esta baja eficiencia, lo que permite hacer las siguientes recomendaciones (de Boer, 1987):

- ◆ Revisar los mecanismos hidráulicos que controlan la profundidad de la zanjadora o del arado de drenaje, debido a que su desajuste puede ocasionar que la base del arado de drenaje quede inclinada, provocando fluctuaciones en la profundidad de colocación del dren.
- ◆ Verificar periódicamente los emisores de rayos láser, al igual que los equipos de topografía.

* La mención de nombres comerciales sólo se realiza con el propósito de proporcionar al lector la información completa, pero de ninguna manera debe interpretarse este hecho como recomendación, a favor o en contra de los productos.

Capítulo 5

Prácticas culturales asociadas con el drenaje parcelario

En este capítulo se describen las acciones complementarias, conocidas como prácticas culturales asociadas al drenaje parcelario, necesarias para mejorar su funcionamiento y facilitar la rehabilitación de los suelos salinos.

Las prácticas asociadas al drenaje se clasifican en: mecánicas, hidrotécnicas, químicas y biológicas. Es recomendable aplicar estas prácticas en forma combinada.

5.1. Prácticas mecánicas

Tienen como objetivo mejorar la estructura del suelo y corregir problemas de topografía en la parcela, mediante la utilización de maquinaria agrícola.

Las prácticas mecánicas incluyen:

- ◆ Barbecho para aflojar el suelo.
- ◆ Rastreo para romper los terrones y uniformar la superficie.
- ◆ Subsoleo o cinceleo para romper los estratos compactos existentes y mejorar la capacidad de drenaje interno del suelo. La profundidad recomendable para realizar el subsoleo es de 70 cm y de 50 cm para el cinceleo (foto 21).
- ◆ Empareje de la superficie del terreno, para mejorar la distribución del agua al momento del riego.

En el cuadro 5-1 se presentan las prácticas mecánicas más comunes recomendadas para diferentes tipos de textura del suelo y grados de afectación por salinidad.



Foto 21. Subsoleo

Cuadro 5-1. Prácticas mecánicas recomendadas para diferentes condiciones de textura y salinidad del suelo (Llerena, 1996)

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO		LABORES CULTURALES			
TEXTURA	SALINIDAD	SUBSOLEO	CINCELEO	BARBECHO	RASTREO
Arcillosa	Ligera	No	Sí	Sencillo	Doble
	Media	Sí	No	Sencillo	Doble
	Alta	Sí	No	Doble	Doble
Media	Ligera	No	Sí	No	Sencillo
	Media	Sí	No	No	Doble
	Alta	Sí	No	Sencillo	Doble

Como un ejemplo del uso de las recomendaciones dadas en el cuadro 5-1, se puede mencionar el caso de una parcela abandonada por problemas de salinidad y drenaje, localizada en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa.

El extracto de saturación del suelo presentaba una conductividad eléctrica media (CE) de 27.1 dS/m y el suelo era de una textura arcillosa (48% de arcilla). Según el cuadro 5-1, se recomienda un subsoleo a 60 cm, barbecho doble, rastreo cruzado y empareje del suelo.

5.2. Prácticas hidrotécnicas

Las prácticas hidrotécnicas tienen como objetivo lixiviar los excesos de sales solubles en el perfil del suelo.

Consisten en la aplicación de sobrierigos en parcelas cultivadas para mantener un nivel de salinidad deseado en el suelo, de acuerdo con la tolerancia del cultivo por establecer; o de la aplicación lavados en parcelas improductivas por problemas de salinidad o drenaje de los suelos.

5.2.1. Sobreriego o fracción de lavado

El sobreriego o fracción de lavado, es la cantidad de agua que se adiciona a la lámina de riego neta del cultivo, para lixiviar los excesos de sales solubles. hacia estratos inferiores del perfil de suelo.

Se calcula con la siguiente expresión (Aceves, 1979):

$$FL = \frac{CE_{ar} * Lr}{CE_{sf} - CE_{ar}} \quad (5.1)$$

donde:

FL = fracción de lavado (cm).

CE_{ar} = conductividad eléctrica del agua de riego (dS/m).

Lr = lámina de riego neta del cultivo (cm).

CE_{sf} = conductividad eléctrica permisible en el suelo (dS/m).

La CE_{sf} se obtiene de acuerdo con el cultivo y con su rendimiento potencial según el cuadro 5-2.

Cuadro 5-2. Efecto de la salinidad del suelo (CE_{st}) en el rendimiento potencial de algunos cultivos (Aceves, 1979)

CULTIVO	RENDIMIENTO POTENCIAL				
	100%	90%	75%	50%	0%
	CE_{sf}				
Cebada	8.0	10.0	13.0	18.0	28.0
Algodón	8.0	10.0	12.0	16.0	26.0
Trigo	6.0	7.4	9.5	13.0	20.0
Sorgo	6.8	7.4	8.4	9.9	13.0
Tomate	2.5	3.6	4.4	6.0	12.6
Maíz	2.0	2.5	3.8	5.9	10.0

En el cuadro 5-3, se muestran algunos valores de la fracción de lavado calculados con la fórmula (5.1) para diferentes cultivos en el distrito de riego 041, Río Yaqui, Sonora.

Cuadro 5-3. Valores de la fracción de lavado y de la lámina de riego total neta ($Lrt_n=Lr+FL$)

CULTIVO	CE_{ar} (dS/m)	Lr (cm)	CE_{sf} (dS/m)	FL (cm)	Lrt_n (cm)
Cebada	1.5	44	8.0	10.2	54.2
Igodón	1.5	64	8.0	14.8	78.8
Trigo	1.2	42	6.0	10.5	52.5
Sorgo	1.0	54	6.8	9.3	63.3
Tomate	1.0	68	2.5	45.3	113.3
Maíz	0.6	58	2.0	24.9	82.9

Para que la lámina de sobreriego cumpla su función, debe aplicarse uniformemente en la parcela de cultivo y debe ser removida por la red de drenaje.

5.2.2. Lámina de lavado

La lámina de lavado es la cantidad de agua que se aplica en el suelo para remover el exceso de sales solubles que se ha acumulado en el mismo.

Para estimar la lámina de lavado se utiliza la fórmula propuesta por Volobuyev (Aceves, 1979):

$$L_v = \alpha Lr \left(\frac{CE_{al}}{CE_{dl}} \right) \quad (5.2)$$

donde:

L_v = lámina de lavado para un metro de profundidad de suelo (cm).

α = coeficiente que depende de la textura del suelo y del contenido de cloruros solubles respecto a la suma de aniones (cm). Se estima según el cuadro 5-4.

CE_{al} = conductividad eléctrica del suelo antes del lavado (dS/m).

CE_{dl} = conductividad eléctrica deseable del suelo después del lavado (dS/m). Es recomendable que este valor corresponda al CE_{sf} de la fórmula (5.1) y se determine con el cuadro 5-2.

Cuadro 5-4. Valores de α para diferentes contenidos de cloruros y textura del suelo (cm)

EXTURA	CONTENIDO DE CLORUROS CON RESPECTO A LA SUMA DE ANIONES (%)			
	60 - 40	40 - 20	20 - 10	< 10
Pesada	53	57	62	77
Media	40	44	48	64
Ligera	27	31	36	51

La lámina de lavado calculada con la fórmula (5.2) debe suministrarse en varias aplicaciones con intervalos de 8 a 15 días, teniendo en cuenta que la primera aplicación debe realizarse con la mayor cantidad de agua posible (Foto 22). El lavado debe hacerse en melgas, siguiendo las curvas de nivel.

Cuando la conductividad eléctrica se reduzca hasta un valor cercano a 20 dS/m, es recomendable suspender el proceso de lavado e introducir un cultivo para complementar y hacer más eficiente la rehabilitación del suelo (ver sección 5.5, p 52).



Foto 22. Aplicación de lavados

Si se trata de recuperar suelos sódicos, en el proceso de lavado pueden usarse aguas salinas provenientes de drenaje agrícola, cuando presentan altos contenidos de sulfatos o cloruros de calcio y magnesio.

Ejemplo de cálculo de lámina de lavado:
Para la parcela del ejemplo anterior, se obtuvo un promedio de $CE_{ef} = 27.1$ dS/m y un valor medio del contenido de cloruros respecto a la suma de aniones de 52%; estos valores se determinaron a partir del análisis químico de muestras de suelo de 24 sitios.

Usando el cuadro 5-4 se determinó un valor de α igual a 53 cm.

Se seleccionó un valor de $CE_{ef} = 6$ dS/m utilizando el cuadro 5-2 para un rendimiento potencial de 100% del cultivo de trigo.

La lámina de lavado estimada con la fórmula (5.2) resultó:

$$L_v = 53 \text{ Ln} \left(\frac{27.1}{6} \right) = 80 \text{ cm}$$

La aplicación de los lavados se realizó de la manera siguiente:

- ♦ El 15 de agosto de 1995, 25 centímetros.
- ♦ El 29 de agosto, 15 centímetros.
- ♦ El 15 de septiembre, 20 cm aportados por el ciclón Ismael.
- ♦ El 15 de noviembre, 20 cm como riego de presiembra del cultivo de trigo.

5.3. Prácticas químicas

Las prácticas químicas consisten en la aplicación de sustancias denominadas mejoradores químicos que se utilizan para la recuperación de algunos suelos sódicos y salino-sódicos, con la finalidad de intercambiar sodio por calcio en la solución del suelo.

Algunos de los mejoradores más utilizados son el yeso, los polisulfuros de calcio y, en menor escala, el ácido sulfúrico.

Una vez clasificado el suelo como sódico o salino-sódico, es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones para decidir sobre la aplicación del mejorador:

- a) Verificar que el contenido de arcilla en el suelo sea mayor de 30% o el contenido de arena menor de 40%. En suelos de textura media o ligera no se requiere aplicación de mejoradores, debido a que en ellos difícilmente se presentan problemas por exceso de sodio.
- b) Aplicar el mejorador cuando el suelo presente una conductividad eléctrica menor de 12 dS/m y un pH mayor de 8.5.
- c) Determinar el cociente del contenido de sodio entre la suma de calcio y magnesio presentes en forma soluble en el suelo. Cuando este cociente es mayor que 1 se recomienda aplicar el mejorador.
- d) Determinar el cociente de la suma de carbonatos y bicarbonatos entre el contenido de sulfatos. Si este cociente es mayor que 1 se recomienda aplicar el mejorador.
- e) El tipo de mejorador químico se selecciona

según su costo y disponibilidad en el mercado.

La cantidad de mejorador para aplicar se calcula con la siguiente fórmula (Aceves, 1979):

$$D_m = \left[\frac{PSI_{aa} - PSI_{da}}{100} \right] (CIC) P_e h Da \quad (5.3)$$

donde:

D_m = dosis del mejorador (kg/ha).

PSI_{aa} = porcentaje de sodio intercambiable antes de la aplicación (%).

PSI_{da} = porcentaje de sodio intercambiable deseable después de la aplicación (%).

CIC = capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr de suelo).

P_e = peso equivalente del mejorador (mol).

h = espesor de suelo que se desea recuperar (cm).

Da = densidad aparente del suelo (g/cm^3).

El mejorador se incorpora al suelo con un rastreo y se debe aplicar una lámina de agua adicional a la de riego para disolverlo. Esta lámina se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$LRA = \frac{NMH}{SM} \cdot 10^{-5} \quad (5.4)$$

donde:

LRA = lámina de riego adicional para disolver el mejorador químico (cm).

NMH = necesidad de mejorador (meq/ha). Esta cantidad se obtiene al multiplicar la dosis de mejorador (D_m) por los miliequivalentes contenidos en un kilo del mismo.

SM = solubilidad del mejorador (meq/l).

La solubilidad y los miliequivalentes por tonelada que tienen cada mejorador deben consultarse con el proveedor. Para el caso del

yeso estos valores son de 30 meq/litro y 11.6×10^3 meq/kg, respectivamente.

Dado que el efecto de los mejoradores químicos es gradual, debido a que requieren de láminas adicionales de agua para disolverlo y de cierto tiempo para actuar, generalmente la cantidad total calculada se aplica de manera dosificada, con el fin de verificar la respuesta del suelo con cada aplicación del mejorador.

Esto se hace debido a que en el cálculo del mejorador, no se toman en cuenta las concentraciones de calcio y magnesio solubles presentes en el agua y en el suelo, que colaboran en la eliminación del sodio intercambiable. Además, evitará el uso de grandes cantidades de mejorador que pueden hacer no redituable el proceso de

rehabilitación del suelo.

Ejemplo de cálculo de mejorador químico:

A partir de los análisis de laboratorio del suelo de la parcela de los ejemplos anteriores, se obtuvo: $PSI_{sa} = 23.6\%$, $CIC = 29.7$ meq/100 g y una $Da = 1.3$ g/cm³ y los valores deseados: $PSI_{da} = 15.0$ en un espesor h de suelo de 30 centímetros. Debido a su bajo costo y disponibilidad en el mercado, se decidió aplicar yeso ($P_e=86$ mol).

La dosis calculada del mejorador con la fórmula (5.3), fue de 8.56 ton/ha de yeso puro, por lo que se aplicó un total de 45.65 toneladas de yeso con pureza del 75% en una superficie de 4 ha (foto 23). La lámina de agua para disolver el mejorador -adicional a la de lavado- fue de 30.6 centímetros.



Foto 23. Aplicación de yeso

5.4. Prácticas biológicas

Las prácticas biológicas consisten en incorporar materia orgánica al suelo (estiércol, abonos verdes y rastrojo) y tienen como propósito mejorar la estructura del suelo y aumentar la conductividad hidráulica para acelerar el proceso de rehabilitación.

En la foto 24 se muestra la incorporación de materia seca en el lote 17 del distrito de riego

076, Valle del Carrizo, Sinaloa. Se estimó que la cantidad aportada fue de 9.2 toneladas por hectárea.

5.5. Selección y manejo de cultivos en suelos en proceso de mejoramiento o rehabilitación

El mejoramiento de los suelos se lleva a cabo cuando se trata de una parcela cultivada que presenta una CE que generalmente varía entre



Foto 24. Incorporación de materia orgánica al suelo

4 dS/m y 16 dS/m. Para este caso, se seleccionan un cultivo como cebada, trigo, avena, sorgo, arroz, maíz o algodón.

La rehabilitación de los suelos consiste en reincorporar al proceso productivo mediante lavados, una parcela abandonada por problemas severos de salinidad (CE generalmente mucho mayor de 20 dS/m).

En algunos casos el proceso de rehabilitación se puede complementar y hacer más eficiente, introduciendo durante su desarrollo (cuando la CE es de alrededor de 20 dS/m), un cultivo que reúna los siguientes requisitos:

- ◆ Debe ser tolerante a las sales.
- ◆ Debe ser de alta densidad y regarse por inundación, preferentemente en curvas a nivel.
- ◆ Tener un bajo costo de producción.

- ◆ Ser preferentemente de la región.

Los cultivos más utilizados que cumplen con estas condiciones son: cebada, trigo, arroz y avena. Sin embargo, también pueden cultivarse algunos pastos como el *bermuda* y el *rye grass*. Para el manejo del cultivo durante el proceso de mejoramiento o rehabilitación se recomienda lo siguiente:

- ◆ Incrementar la densidad de siembra.
- ◆ Aplicar un riego de presembrado pesado.
- ◆ Incrementar el número de riegos disminuyendo el intervalo de riego.
- ◆ Fertilizar durante los riegos de auxilio.

En las fotos 25 y 26 se presentan diferentes etapas de desarrollo del cultivo de trigo, en la parcela utilizada para los ejemplos presentados en este capítulo.



Foto 25. Desarrollo del cultivo de trigo



Foto 26. Etapa final del cultivo

Capítulo 6

Evaluación de sistemas de drenaje parcelario

En este capítulo se presentan los procedimientos generales para evaluar el sistema de drenaje respecto al funcionamiento hidráulico, el impacto en la producción y la rentabilidad económica.

6.1. Verificación del funcionamiento de sistemas de drenaje

El funcionamiento no satisfactorio del sistema de drenaje se manifiesta cuando no existe, o es muy pequeño el flujo en la descarga, los mantos freáticos no descienden al nivel esperado, persisten los síntomas de salinidad en el suelo, o el desarrollo de los cultivos no es adecuado. Algunas causas del mal funcionamiento pueden ser:

- a) Espaciamiento entre drenes muy grande.
- b) Profundidad insuficiente del dren.
- c) Selección inadecuada del filtro que propicia su taponamiento con partículas de suelo, con la consecuente pérdida de la capacidad de dejar pasar el agua.
- d) Obstrucción de drenes laterales o colectores parcelarios, como resultado de:
 - ◆ Aplastamiento de la tubería de drenaje
 - ◆ Acumulación de sedimentos o depósitos bioquímicos.
 - ◆ Instalación defectuosa de las conexiones.
 - ◆ Uso de tubería dañada por intemperismo o mal manejo.
 - ◆ Entrada de suelo al tubo durante el proceso de construcción.

- ◆ Filtros que permiten la entrada de muchas partículas de suelo a los tubos.
 - ◆ Fracturas en los tubos o en los filtros.
 - ◆ Pendiente de la tubería insuficiente o contrapendientes, que propician la acumulación de azolves.
 - ◆ Cambios bruscos en la dirección de los tubos que propician azolvamiento.
 - ◆ Bloqueo en la descarga del drenaje.
- e) Subestimación del módulo de drenaje que da lugar a la selección de un diámetro insuficiente de drenes laterales o colectores.
- f) Presencia de un manto freático suspendido debido a capas de suelo someras de baja permeabilidad (ejemplo, piso de arado).

Las mediciones de gastos en las descargas para evaluar el funcionamiento de los sistemas de drenaje entubado en grandes extensiones, deben realizarse por lo menos, dos veces por año. Este caudal debe aumentar después de un riego o una lluvia; si esto no sucede, entonces el sistema de drenaje no está funcionando adecuadamente en algunas partes.

Es conveniente que, en las zonas donde se han instalado sistemas de drenaje, se continúen los estudios freáticos que permitan verificar el funcionamiento de los mismos. Cuando no existan pozos de observación permanentes, se deben realizar barrenaciones temporales para conocer la posición del manto freático.

La presencia de niveles freáticos elevados puede también detectarse por la apariencia y el color de la superficie del suelo. El manto freático está elevado si la superficie se ve oscura y húmeda; esto debe verificarse mediante una excavación de al menos 30 cm. El nivel freático somero, también está asociado con el crecimiento de vegetación.

La existencia de zonas hundidas y húmedas también puede ser un indicador de que el drenaje no está trabajando adecuadamente.

Estos hundimientos deben rellenarse y, si se repiten, debe investigarse la causa del problema para corregirla.

En algunos drenes, inmediatamente después de su construcción aparece una señal de funcionamiento inadecuado que se revela cuando no sacan agua estando los niveles freáticos elevados. Esto significará que los materiales empleados estaban defectuosos o que la instalación fue incorrecta debido por ejemplo, a ondulaciones, contrapendientes o aplastamientos de la tubería.

Para identificar los tramos de tubería que no funcionan adecuadamente se requiere obtener medidas de la profundidad del nivel freático y observar el nivel del agua en los drenes, lo cual, a su vez, requiere de excavaciones para identificar la causa precisa del funcionamiento inadecuado. Estos tramos deberán reconstruirse.

Cuando los drenes funcionan bien inmediatamente después de su construcción, pero dejan de hacerlo cierto tiempo después, pueden indicar que existen taponamientos, los cuales pueden ser en algunos casos eliminados mediante el empleo de chorros de agua a presión, como se explica en el capítulo 7 sobre **Mantenimiento de sistemas de drenaje parcelario**.

6.2. Evaluación agronómica

La respuesta que se tenga en el incremento del rendimiento de los cultivos, como resultado de la instalación del sistema de drenaje, es el factor que más interesa al agricultor. Esta respuesta es el mejor indicador del funcionamiento del sistema de drenaje (fotos 27 y 28).

Debe tenerse en cuenta que el rendimiento de un cultivo depende de muchos factores, además del funcionamiento correcto de los drenes. Por esta razón, la obtención de bajos rendimientos de los cultivos no puede ser automáticamente atribuida a problemas de funcionamiento del drenaje.

Esto sólo puede sospecharse cuando se han atendido correctamente otros aspectos del proceso productivo, como la aplicación de fertilizantes, el control de plagas y enfermedades, etcétera.



Foto 27. Estado de un lote antes de instalarse el drenaje parcelario



Foto 28. Estado del lote de la foto 27 después de instalarse el sistema de drenaje parcelario

Para la correcta atención de estos factores de la producción, es recomendable seguir las indicaciones de los paquetes tecnológicos desarrollados por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias (INIFAP).

La insuficiencia del espaciamiento de los drenes se detecta cuando el cultivo no se desarrolla adecuadamente en la zona central entre los drenes, donde el sistema no responde con la rapidez deseada en el abatimiento del manto freático o en la lixiviación de las sales en el perfil de suelo. En estos casos se recomienda construir drenes intercalados entre los ya existentes, como la manera empírica de ir ajustando el espaciamiento entre drenes.

Sin embargo, debe cuidarse de no confundir el efecto del funcionamiento inadecuado del sistema con algún otro derivado, por ejemplo, de la presencia de manchones de sales, acuíferos semiconfinados, lentes de arcilla compactos, plagas y enfermedades, etcétera.

6.3. Evaluación económica

La práctica del drenaje agrícola se difundirá en la medida en que los agricultores estén convencidos de la rentabilidad de las inversiones en drenaje. Por eso es importante que en la medida en que se vaya acumulando información sobre rendimientos de diferentes cultivos y costos reales de los sistemas de drenaje, se realicen evaluaciones económicas de los sistemas construidos.

Existen diferentes parámetros que permiten realizar estas evaluaciones, como la relación beneficio-costos (RBC) y la Tasa interna de retorno (TIR) explicados en el capítulo 3, que son los más utilizados.

La principal diferencia es que, mientras en los estudios de justificación económica los beneficios son estimados, en los estudios de evaluación estos beneficios pueden haber sido observados.

Además, en los sistemas ya construidos se tendrá información sobre los costos reales de mantenimiento de los sistemas de drenaje, así como sobre los costos reales del financiamiento, los cuales son supuestos

cuando se elabora el proyecto de drenaje y se realiza la justificación económica.

La evaluación económica puede efectuarse con mayor control de la información proveniente de parcelas de referencia que sean representativas de las condiciones del distrito de riego, donde no solamente se han construido los sistemas de drenaje bajo la supervisión cuidadosa de personal especializado, sino que también se ha dado un seguimiento a la evolución de los niveles freáticos, a la salinidad de los suelos y, lo más importante, a la respuesta de los cultivos.

6.4. Evaluación hidráulica

Esta sección está especialmente dirigida a los diseñadores de sistemas de drenaje, ya que tiene como finalidad proporcionar los lineamientos generales para verificar los criterios de diseño, como el módulo de drenaje y la profundidad del manto freático y, consecuentemente, el espaciamiento entre drenes.

Debido a las dificultades y alto costo que implica realizar las operaciones para la evaluación hidráulica, deben ser llevadas a cabo, de preferencia, por una institución relacionada con el distrito de riego y en convenio con los agricultores.

Es muy importante la selección de los agricultores cooperantes, porque de ellos depende en buena medida el éxito del proyecto.

La verificación del espaciamiento entre drenes se realiza una sola vez durante el primer año de funcionamiento del sistema.

Es recomendable continuar la verificación de los gastos y las profundidades del nivel freático por lo menos una vez por año, durante los primeros cinco años de vida útil del sistema, coincidiendo con la aplicación de un riego.

También es adecuado realizar un seguimiento del cambio en el tiempo en el contenido de sales en el perfil de suelo.

Es conveniente que las parcelas de referencia, donde se realizará la evaluación, reúnan las siguientes características:

- ◆ Debe ser representativa de las áreas con problemas de drenaje y salinidad del distrito de riego correspondiente.
- ◆ La instalación y verificación del sistema de drenaje que se va a evaluar deben supervisarse conforme con el diseño.
- ◆ La descarga de los laterales debe ser directa y libre a un dren a cielo abierto.
- ◆ La superficie de la parcela debe ser menor de 5 hectáreas y la longitud de los laterales menor de 300 metros.
- ◆ Por conveniencia para la evaluación, es indispensable efectuar el riego en el sentido de los laterales y el método de riego debe ser por melgas.
- ◆ Para espaciamientos de hasta 50 m, deben construirse dos melgas de un ancho igual a la mitad del espaciamiento entre drenes.
- ◆ El bordo que separa las melgas debe quedar sobre la línea de drenaje y, ambas melgas, deben regarse al mismo tiempo.
- ◆ Es conveniente que la prueba coincida con un riego dentro del calendario de riegos del cultivo.
- ◆ Debe aplicarse una lámina de 20 cm utilizando sifones calibrados, de tal forma que sea posible calcular el volumen de agua proporcionado en el área de influencia del lateral que se va a evaluar.

Es deseable contar con parcelas con drenes laterales a diferentes espaciamientos, y se requiere un plano de la parcela que muestre la localización de laterales, colectores y piezómetros, así como canales, drenes a cielo abierto, alcantarillas, caminos, etcétera.

Para efectuar la evaluación, debe realizarse una prueba de riego en la que se tomen en cuenta las siguientes indicaciones:

6.4.1. Medición del gasto en los laterales

Para la medición del gasto en la descarga de los laterales es necesario disponer de dos recipientes, de 1 l y 10 l y un cronómetro.

Un observador debe estar en la descarga del lateral antes de que el agua empiece a drenar, a fin de iniciar los aforos oportunamente (foto 29).



Foto 29. Medición del gasto en la descarga

Se recomienda realizar los aforos con intervalos de 10' a 15' durante el inicio de la prueba, y posteriormente aumentar el intervalo conforme disminuya el gasto en la descarga. El objetivo de esta operación es medir de la manera más precisa posible el hidrograma de la descarga.

6.4.2. Medición de la posición del manto freático

Se deben instalar dos baterías de piezómetros por cada lateral a evaluar; la primera debe ubicarse a un tercio de la longitud del lateral y la segunda en el siguiente tercio. Por ejemplo, si la longitud es de 240 m, las baterías se localizan a 80 m y 160 m de la descarga.

Un piezómetro se construye haciendo un pozo de 3 m de profundidad e insertando un tubo de PVC sin ranurar de 3 pulg.; el relleno del espacio entre el tubo y la pared del suelo debe hacerse con un material muy arcilloso. En la parte inferior se coloca una capa de 30 cm de grava fina y en la parte superior se instala un tapón de mortero de cemento, teniendo en cuenta que el tubo debe sobresalir 30 cm desde la superficie. Si la parcela está cultivada, debe colocarse una bandera de 2 m de altura en cada piezómetro, para facilitar su localización.

Los piezómetros de una batería deben localizarse en el sentido perpendicular al dren lateral de la siguiente manera:

- ◆ El primero sobre el dren lateral.
- ◆ El segundo a 50 cm del dren lateral.
- ◆ El tercero a 1/8 de la separación entre los drenes.
- ◆ El cuarto en el centro entre drenes.

Los piezómetros se instalan simétricamente de tal forma que cada batería debe constar de siete piezómetros.

Para la medición de la posición del nivel freático es necesario disponer de una varilla de 2.5 m de largo.

Es recomendable efectuar las mediciones de la posición del manto freático atendiendo los siguientes intervalos (foto 30):

- ◆ Lecturas cada 6 horas durante los dos días siguientes a la aplicación del riego.
- ◆ Lecturas cada 24 horas desde el cuarto día, hasta el siguiente riego.



Foto 30. Medición del nivel freático

6.4.3. Estimación del módulo de drenaje

Para el cálculo del módulo de drenaje se grafican los datos observados de gasto (eje y) contra el tiempo (eje x). Se traza una curva que compense los datos observados y se determina el área bajo esta curva que representa el volumen drenado (V_d).

El módulo de drenaje se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$q = \frac{V_d}{A_i * T_d} * 1000$$

donde:

q = módulo de drenaje (mm/día).

V_d = volumen drenado (m^3).

T_d = tiempo de drenaje (día) y corresponde al tiempo que dura la evaluación.

A_i = área de influencia de la línea de drenaje (m^2) y se calcula:

A_i = separación (m) x longitud de la línea (m)

Ejemplo:

En la ilustración 6-1 se muestra el hidrograma de descarga correspondiente a un dren lateral instalado en el Centro Nacional de Transferencia de Riego y Drenaje (Cenatryd), en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa. La separación entre los drenes y la longitud de las líneas son 50 m y 220 m, respectivamente.

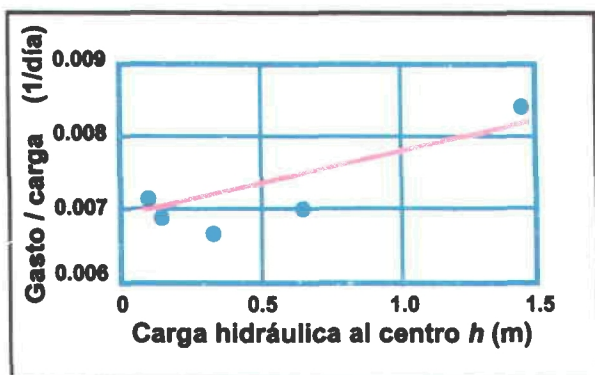


Ilustración 6-1. Gráfica de gasto contra tiempo en un dren subterráneo

El volumen drenado es $V_d = 209.33 m^3$.

El área de influencia de la línea de drenaje es:

$$A_i = 50 * 220 = 11,000 m^2$$

El módulo de drenaje promedio durante 10 días resulta igual a:

$$q = \frac{209.33}{11,000 * 10} * 1000 = 1.90 mm / día$$

6.4.4. Estimación de la conductividad hidráulica a saturación

Para calcular la conductividad hidráulica a saturación del suelo mediante el análisis del funcionamiento hidráulico de un sistema de drenaje, se procede de la siguiente manera:

a) Convertir el gasto observado de litros por segundo a mm/día:

$$q (mm/día) = \frac{86400 * q (lps)}{A_i (m^2)}$$

donde: A_i es el área de influencia de la línea de drenaje.

b) Convertir las lecturas de profundidad del manto freático (P) al centro entre los drenes, a cargas hidráulicas (h). Esto se hace restando al valor de la profundidad de los drenes la profundidad del nivel freático.

c) Se divide el gasto (q) expresado en (mm/día) entre la carga hidráulica (h) determinada en el inciso anterior, expresada en mm. Se obtiene de esta manera el cociente q/h .

d) Se grafica el valor de la carga hidráulica (h) contra su cociente correspondiente (q/h) obtenido en el inciso anterior.

e) Se realiza una regresión lineal entre la carga hidráulica (h) y el cociente (q/h), y se obtiene una expresión del tipo siguiente:

$$\frac{q}{h} = A + B h$$

f) Se calcula la conductividad hidráulica a saturación K como:

$$K = \frac{B L^2}{4}$$

donde: L es la separación entre drenes que se está evaluando.

En la ilustración 6-2 se muestra el gráfico de la carga hidráulica en el centro entre drenes (h) contra el cociente (q/h). Los datos se obtuvieron a partir del registro de profundidad del nivel freático en un lote del Cenatryd.

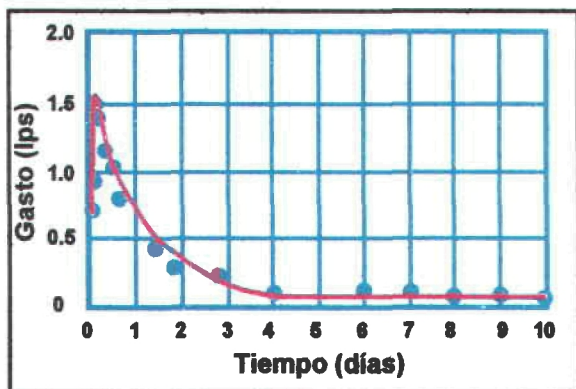


Ilustración 6-2. Gráfica de h contra q/h .

Se realiza una regresión lineal y se determina la relación entre h (expresada en metros) y q/h (expresada en día⁻¹).

$$\frac{q}{h} = 0.0069 + 0.0009 h$$

por lo tanto, el valor de la conductividad hidráulica a saturación es:

$$K_s = \frac{0.0009 \cdot (50)^2}{4} = 0.56 \text{ m / día}$$

6.4.5. Criterios de evaluación

Los módulos de drenaje obtenidos con la evaluación son valores más representativos de las condiciones locales y deberán usarse para el diseño de sistemas de drenaje en áreas similares.

Por otra parte, si los valores obtenidos para la conductividad hidráulica resultan diferentes de los utilizados en el diseño, significará que los procedimientos empleados y el número de repeticiones, no han sido adecuados o suficientes para caracterizar las propiedades hidrodinámicas de las masas de suelo drenadas.

Estas experiencias deben tenerse en cuenta para la realización de trabajos futuros de diseño de sistemas de drenaje, en parcelas cuyas características sean similares a aquellas evaluadas.

6.5. Régimen de salinidad del suelo

Como se recordará, el propósito fundamental de los sistemas de drenaje en zonas áridas de riego es prevenir el ensalitramiento de los suelos y contribuir a su desalinización, removiendo de manera más eficiente las aguas que se percolan lixiviando sales de las capas superiores de los suelos.

Por lo anterior, es recomendable realizar un seguimiento del cambio en el tiempo del contenido de sales en el perfil del suelo, a través de muestreos periódicos que permitan relacionar los resultados con los rendimientos de los cultivos.

Capítulo 7

Mantenimiento de sistemas de drenaje parcelario

Los sistemas de drenaje, como cualquier otra obra de ingeniería, requieren trabajos de mantenimiento para conservar sus características de diseño y asegurar su adecuado funcionamiento a un mayor plazo. Cuando estos trabajos no se efectúan con la periodicidad que el sistema requiere, pueden presentarse fallas mayores que impliquen trabajos de rehabilitación, es decir, trabajos para restablecer las características de diseño, que representan erogaciones más fuertes que las propias de conservación.

Aunque el diseño e instalación del drenaje parcelario debe asegurar que el sistema funcione bien por mucho tiempo, se requiere que el sistema sea inspeccionado regularmente y que las reparaciones y limpieza de drenes, descargas, estructuras de control y registros se hagan cuando el estado del sistema así lo indique.

7.1. Inspección del sistema de drenaje

Es recomendable que la inspección del sistema de drenaje se realice al menos una vez por año, bajo las siguientes consideraciones:

- ◆ Verificar que los colectores o laterales descarguen libremente a los drenes a cielo abierto.
- ◆ Observar si el gasto medio en los drenes subterráneos disminuye con respecto al observado en inspecciones anteriores. Las inspecciones periódicas deberán efectuarse en un mismo dren entubado y, de preferencia, en un día determinado después de la aplicación de un riego. Esta operación se facilita si se realizan aforos en forma regular.

- ◆ Recorrer la parcela después de un riego o una lluvia pesada para detectar sitios con encharcamientos. Si se presenta este problema, debe medirse la profundidad del manto freático y observar el gasto en los drenes con el fin de precisar la causa.

7.2. Principales causas que afectan el funcionamiento de un sistema de drenaje

Las fallas de un sistema de drenaje generalmente se deben a una o varias de las siguientes causas:

a) Deficiencias en la instalación por:

- ◆ Fallas en la alineación del dren.

- ◆ Variaciones de la profundidad de instalación con respecto a la del diseño.
- ◆ Juntas desensambladas.
- ◆ Aplastamiento de la tubería.
- ◆ Mala selección del filtro.

b) Inestabilidad de los suelos.

c) Concentraciones elevadas de manganeso o fierro en el agua de riego o en el suelo.

Los principales problemas que ocasionan estas causas:

- ◆ Azolvamiento en la tubería (foto 31).



Foto 31. Tramo de dren lateral con filtro geotextil mostrando taponamiento con partículas finas

- ◆ Formación de una capa compacta de suelo alrededor de la tubería.
- ◆ Taponamiento del material envolvente.
- ◆ Taponamiento de las perforaciones de la tubería de drenaje.

7.3. Tipos de taponamiento

El taponamiento de la tubería de drenaje es causado principalmente por compuestos

bioquímicos, partículas minerales del suelo y raíces de las plantas.

7.3.1. Taponamiento bioquímico

El taponamiento bioquímico se debe a la actividad bacteriana y se manifiesta en los drenes entubados en forma de depósitos semejantes al lodo, con colores rojo o negro. Los depósitos pueden obstruir el flujo del agua hacia los drenes y, dentro de éstos, sellar el calcetín o las perforaciones de la tubería y en algunos casos, bloquear totalmente el dren.

El taponamiento bioquímico está asociado con ciertos flujos ascendentes y descendentes del manto freático.

7.3.2. Taponamiento mineral

El taponamiento mineral es causado por las partículas del suelo que se encuentran en contacto con las paredes de la tubería de drenaje, y puede presentarse tanto en el interior del dren como en los filtros y en las perforaciones del tubo.

7.3.3. Taponamiento por raíces

Este taponamiento ocurre cuando las raíces de las plantas se introducen en la tubería a través de sus perforaciones, obstruyéndolas y alterando el funcionamiento del sistema.

Para prevenir la entrada de raíces a los drenes subterráneos por la descarga, es necesario mantener libre de malezas los taludes de los drenes abiertos.

7.4. Métodos de limpieza

La institución o persona responsable del mantenimiento del sistema de drenaje, debe contar con el plano de diseño actualizado que incluya los cambios efectuados durante la instalación.

Para eliminar los sedimentos acumulados en el interior de los drenes entubados, así como las partículas que taponan las perforaciones de los mismos se pueden usar chorros de agua a presión así como algunas soluciones químicas.

7.4.1. Inyección de agua a presión

El equipo necesario para llevar a cabo esta operación consta de las siguientes partes (foto 32):

Un tractor o un camión.

Una bomba para inyección del agua.



Foto 32. Equipo de inyección de agua a presión para limpieza de drenes entubados

- ◆ Una manguera reforzada de goma o de polietileno con longitud de 300 metros.
- ◆ Una boquilla (foto 33).
- ◆ Una bomba adicional con manguera para extraer el agua con sedimentos (opcional).



Foto 33. Boquillas para inyectar agua a presión

Las funciones principales de la inyección de agua a presión en los drenes entubados son:

- ◆ Aflojar las partículas depositadas en el interior del dren y eliminar las obstrucciones en la tubería.
- ◆ Limpiar las perforaciones de la tubería y remover las partículas que obstruyen la entrada de agua.
- ◆ Desalojar partículas en suspensión y otros materiales.

La inyección de agua en los drenes laterales puede presentar dos variantes:

a) Cuando los drenes laterales descargan a un colector a cielo abierto, se procede de la siguiente manera:

- ◆ Se pone en funcionamiento la bomba por la toma de fuerza del tractor o el motor del camión.
- ◆ Se introduce la boquilla a través de la descarga del dren. Generalmente, la manguera unida a la boquilla tiene una longitud de hasta 300 metros.
- ◆ El agua utilizada en la inyección, se tomará del dren a cielo abierto o de un canal.

b) Cuando los drenes laterales descargan a un colector entubado.

- ◆ Se excavan fosas a intervalos de 250 m hasta cubrir la longitud de los laterales o colectores que serán limpiados (foto 34).



Foto 34. Fosa para limpieza con inyección de agua

- ◆ Se perfora la tubería para introducir la boquilla de la manguera de presión.
- ◆ Se pone en funcionamiento la bomba por la toma de fuerza del tractor o el motor del camión.
- ◆ Se introduce la boquilla a través de la perforación.
- ◆ El suministro de agua para la inyección se realiza con un tanque o una cisterna.
- ◆ Al finalizar la operación de limpieza, se cierra la abertura en el dren lateral o colector.

La limpieza de los drenes se realiza de aguas abajo hacia aguas arriba, con la finalidad de que el agua inyectada pueda salir por gravedad llevándose el material removido. Los equipos de inyección de agua se clasifican de acuerdo a la presión que desarrolla la bomba (Bons y Van Zeijts, 1991), se distinguen los siguientes tipos:

- ◆ De baja presión, hasta 20 bar (290 psi).
- ◆ De presión intermedia, de 20 a 50 bar (290 a 725 psi).

- ◆ De alta presión, entre 50 y 100 bar (725 a 1450 psi).

Los equipos de alta presión han entrado en desuso debido a que se ha detectado que en algunos casos destruyen la estructura del suelo que circunda a la manguera, ocasionando la entrada de partículas de suelo a la tubería que terminan por taponarla más rápidamente.

Debido a las pérdidas por fricción en la manguera, la presión en la boquilla es aproximadamente 50% de la presión en la bomba.

La boquilla de estos equipos emite chorros de agua hacia atrás, con una fuerza de reacción lo suficientemente grande como para impulsar la manguera hacia adentro del dren lateral o colector, hacia aguas arriba.

En los equipos de baja presión la manguera necesita ser empujada, por lo que es recomendable utilizar mangueras de polietileno que resisten hasta 100 bar.

Durante el proceso de inyección, la boquilla se introduce hacia el interior del dren tan rápido como sea posible y posteriormente se saca a una velocidad aproximada de 20 m por minuto.

Los gastos que comúnmente tienen este tipo de bombas varían entre 3 y 4 litros por segundo.

La inyección de agua a alta presión puede provocar la sedimentación de partículas finas dentro del dren, en los siguientes casos:

- ◆ Cuando se usan equipos de alta presión en suelos arenosos.
- ◆ Cuando esta operación se efectúa durante los primeros cuatro años después de la instalación del sistema de drenaje
- ◆ Cuando se dañan tubos de drenaje y envolventes.

7.4.2. Limpieza con soluciones químicas

Para evitar el taponamiento de las perforaciones de los drenes por deposición de fierro, Winger (1979), recomendó el uso de soluciones de ácido sulfúrico al 0.3% y de bisulfato sódico al 2%. Esta solución se aplica con el equipo de inyección de agua a presión. La mezcla necesaria para obtener estas concentraciones, se realiza en la pipa que suministra el agua para la limpieza.

7.5. Conservación de estructuras auxiliares del drenaje entubado

Tanto las entradas de agua hacia los colectores abiertos como los registros de inspección, deben conservarse en buen estado.

Los tubos de las entradas de agua y las rejillas para impedir la entrada de roedores, pueden requerir ocasionalmente de reposición si son dañados durante los trabajos de conservación de los colectores abiertos. Igualmente, la protección contra la erosión en las desembocaduras requiere de limpieza periódica, así como de reponer la protección que se haya empleado para evitar la erosión o lavado que ocasione la salida del agua de drenaje.

Los registros de inspección en cierta forma también sirven como trampas de azolve, por lo que éste debe retirarse periódicamente sin esperar a que bloquee la salida.

7.6. Conservación de drenes abiertos

Considerando que el funcionamiento de las redes de drenaje parcelario está condicionado a una buena operación de la red de drenaje a cielo abierto, es indispensable que ésta se mantenga en las mejores condiciones posibles. Los trabajos de conservación de la red de drenaje a cielo abierto, incluyen desazolve y limpieza de taludes y bermas.

Estos trabajos de mantenimiento que a continuación se describen, se realizarán de acuerdo con los resultados de las inspecciones periódicas.

- ◆ Existen muchos métodos de control de la vegetación, tanto manuales como mecánicos. La frecuencia de las labores de limpieza depende en buena medida de las condiciones climáticas y debe ajustarse de acuerdo con la experiencia local.
- ◆ La remoción de azolve del fondo de las zanjas generalmente se realiza con medios mecánicos, de manera muy similar a como se procede en los canales de riego no revestidos. Debe prestarse especial cuidado en los lugares donde los azolves se acumulan más frecuentemente, como en las confluencias de drenes, cambios de dirección, cambios de pendiente, etc. Es de igual importancia reparar los taludes tan pronto como se detecten deslaves o derrumbes.

La importancia de la conservación de la red de colectores abiertos difícilmente puede ser sobre-estimada. Por un lado, se ha observado que las tierras que se localizan a los lados de los colectores abiertos mejoran sus condiciones de drenaje y disminuyen su salinidad cuando son rehabilitados, a tal grado que en muchas ocasiones se hace innecesario el drenaje parcelario.

Por otro, la construcción de drenaje parcelario, como se ha mencionado en este manual, requiere de la disposición de un dren colector abierto bien conservado y con la profundidad suficiente (alrededor de 2.5 m a 3 m) para que pueda recibir, sin ahogarse o saturarse, a los efluentes de los drenes parcelarios.

Referencias bibliográficas

1. Aceves N., E. (1979). *El ensaltramiento de los suelos bajo riego (Identificación, control, combate y adaptación)*. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
2. Barocio F., C. (1998). *Criterios y lineamientos para la programación, presupuestación y ejecución de las actividades de Ingeniería de Riego y Drenaje en los Distritos de Riego de México*. Documento interno, Gerencia de Distritos y Unidades de Riego, CNA, México.
3. Bons A. and van Zeijts T., E. J. (1991). *Jet flushing, a method for cleaning subsurface drainage systems*. Information paper No. 28, Government Service for Land and Water Use, Utrecht, The Netherlands.
4. Bos M., G. and Boers M. (1994). *Land Drainage: Why and how?*. In: Ritzema, H. P. (ed.). *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16, Second Edition (Completely Revised), Wageningen, The Netherlands.
5. De Boer K., S. (1987). *Grading precision of subsurface drains*. Report 158 (English edition) Government Service for Land and Water Use. 3502 LA Utrecht, The Netherlands.
6. De la Peña de la T., I. (1980). *Salinidad de los suelos agrícolas. Su origen, clasificación, prevención y recuperación*. Boletín técnico No. 10, Distrito de Riego No. 41, SARH, Cd. Obregón, Sonora, México.
7. De la Peña de la T., I. (1996). *Salinidad y drenaje en la Región Noroeste en el Marco Nacional. Problemática y soluciones*. Subgerencia de Riego y Drenaje, Gerencia Estatal de Sonora, CNA, Cd. Obregón, Sonora, México.
8. Dregne H., Kassas M. and Razonov B. (1994). *A new assessment of the world status of desertification*. Desertification Control Bulletin, United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenia.
9. *Drainage Manual*. (1993). A Water Resources Technical Publication Revised Reprint, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation.
10. FAO, (1980). "*Drainage Design Factors*", Irrigation and Drainage Paper, No.38, Rome, Italy.
11. González C., A. (1997). *Informe Ejecutivo del proyecto de diseño e instalación de drenaje parcelario en 5,000 ha del distrito de Riego 038, Río Mayo, Son.* Informe interno, IMTA, Jiutepec, Morelos, México.
12. González C., A. (1998). *El drenaje agrícola en México. Estrategias y lineamientos generales para instalación de drenaje parcelario*. Publicación interna del IMTA, Jiutepec, Morelos.
13. IMTA, (1992). *Manual de Drenaje Parcelario de Distritos de Riego*. Publicación del IMTA, Jiutepec, Morelos, México.
14. IMTA, (1995). *Guía práctica y simplificada del drenaje parcelario de distritos de riego*. Publicación del IMTA, Jiutepec, Morelos, México.
15. Llerena V., F. A., (1993). *Inventario de tierras bajo riego afectadas por salinización y/o niveles freáticos en los Distritos de Riego en México*. Reporte para la Representación de la FAO en México, 1993.
16. Llerena V., F. A. (1996). *Apuntes de la cátedra de salinidad agrícola*. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, México.
17. Llerena V., F. A. y González C. A. (1997). *Informe Ejecutivo del proyecto de diseño e instalación de drenaje parcelario en 2,200 ha del distrito de Riego 018, Colonias Yaquis, Son.* Informe interno, IMTA, Jiutepec, Morelos.
18. Martínez B., J. (1986). *Drenaje agrícola, vol.1, Manual técnico, No.5*, Ministerio de Agricultura Pesca Alimentación, Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, España.

19. Namuche V., R. (1997). *Informe Ejecutivo del proyecto de diseño e instalación de drenaje parcelario en 2,800 ha del distrito de Riego 076, El Carrizo, Sin.* Informe interno, IMTA, Jiutepec, Morelos, México.

20. Ritzema H., P. (Editor in Chief, 1994). *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16. Second Edition (Completely Revised). Wageningen, The Netherlands.

21. Schilfgarde J., V. (1974). *Drainage for Agriculture*. American Society of Agronomy. Inc. Publisher. Madison, Wisconsin, U.S.A.

22. Van Hoom J., W. and Van Alphen J., G. (1994). *Salinity Control*. In: Ritzema, H. P. (ed.). *Drainage Principles and Applications*. ILRI Publication 16, Second Edition (Completely Revised), Wageningen, The Netherlands.

23. Van Zeijts T., E. J. (1990). *Quality control of subsurface drainage works in The Netherlands*. In: *Installation of pipe drains*. Information paper 21. Government Service for Land and Water Use. Utrecht, The Netherlands.

24. Van Zeijts T., E. J. and Zijlstra L. (1990). *Rodding, a simple method for cheking mistakes in drain installation*. In: *Installation of pipe drains*. Information paper 21. Government Service for Land and Water Use. Utrecht, The Netherlands.

25. Winger R., J. (1979). *Construction and maintenace technique for subsurface pipe drainage systems in irrigated land*. Proceedings of the International Drainage Workshop. May 16-20, 1978. ILRI Publication 25, Wageningen, The Netherlands.



CENTRO DE CONOCIMIENTO DEL AGUA

PAPELETA DE DEVOLUCIÓN

El lector se obliga a devolver este libro a la fecha del vencimiento del préstamo señalado en el último sello.

--	--	--