

MANEJO DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD EN SUELOS DEL TRÓPICO HÚMEDO CON DRENAJE CONTROLADO

José Rodolfo Namuche Vargas
Heber Eleazar Saucedo Rojas
Carlos Fuentes Ruiz
Pedro Rigoberto Lázaro Chávez



AVANCES EN
RIEGO Y DRENAJE

IMTA
Coordinación de Riego y Drenaje

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado

José Rodolfo Namuche Vargas
Heber Eleazar Saucedo Rojas
Carlos Fuentes Ruiz
Pedro Rigoberto Lázaro Chávez

México 2015

631.62 Namuche Vargas, José Rodolfo.
N32 *Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado* / José Rodolfo Namuche Vargas *et al.* -- Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015.
64 p.

ISBN 978-607-9368-44-9 (obra impresa)
978-607-9368-45-6 (obra digital)

1. Drenaje agrícola controlado 2. Humedad en el suelo 3. Funcionamiento hidráulico 4. México

Autores:

José Rodolfo Namuche Vargas
Heber Eleazar Saucedo Rojas
Carlos Fuentes Ruiz
Pedro Rigoberto Lázaro Chávez

Responsable de la edición:
Rebeca Tavira Gerardo

Coordinación Editorial:
Fátima Sánchez Bonilla

Primera edición: 2015.

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532
62550 Progreso, Jiutepec, Morelos
México
www.imta.gob.mx

ISBN 978-607-9368-44-9 (obra impresa)
978-607-9368-45-6 (obra digital)

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

PRÓLOGO

En un principio el drenaje agrícola fue considerado como una práctica para ayudar a evacuar el agua de lluvia a través del escurrimiento de manera natural sin considerar su estudio con herramientas científicas. Sin embargo, las investigaciones posteriores han demostrado con claridad que el drenaje agrícola implementado en las tierras cultivadas está íntimamente relacionado con la física de los suelos y la agronomía, siendo necesario en terrenos con una irrigación continua. En el presente libro, mucho más que cualquier otro tratado de drenaje, se hace hincapié en las características y comportamiento del suelo y del régimen de humedad, en las características y crecimiento de las plantas y la práctica continua y satisfactoria de la irrigación con relación al drenaje.

En su más amplio sentido, el drenaje del suelo consiste en eliminar el agua libre de la superficie de los campos cultivados y del agua en exceso de la zona de las raíces de las plantas, tan pronto como sea posible después de su acumulación. El agua superficial persistente o anegamiento ahoga a las plantas debido a una aireación deficiente, y lo mismo ocurre en el interior del suelo debido a la saturación de los poros en la zona radical. Mediante la instalación de sistemas de drenaje, ya sean superficiales o subterráneos, se controla la elevación de la superficie libre del manto freático de modo de mantener condiciones óptimas de humedad en la zona de las raíces para obtener los mejores resultados posibles en la producción de cosechas. En particular, en las regiones húmedas el drenaje subterráneo con frecuencia alivia la presión artesiana, intercepta las filtraciones y elimina álcalis de la zona radical.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha desarrollado, adaptado y transferido tecnologías de drenaje subterráneo desde el año de 1992. En las zonas áridas y semiáridas con la finalidad de rehabilitar suelos afectados por salinidad, sodicidad y mantos freáticos someros formados por la práctica del riego. En las zonas tropicales con la finalidad de controlar de manera automática el régimen de humedad de los suelos debido a las intensas lluvias y al riego, permitiendo solamente la evacuación de los excesos de agua. En ambos casos se privilegia el aporte de agua por ascenso capilar a las raíces. En las zonas áridas y semiáridas se cuenta actualmente con una superficie con drenaje subterráneo de aproximadamente 100,000 ha y en zonas tropicales 5,000 ha; la producción agrícola ha aumentado 50% por lo menos.

Este libro es el resultado de las experiencias realizadas en drenaje agrícola subterráneo controlado en regiones tropicales de México; trata aspectos teóricos del drenaje y sobretodo sus aspectos prácticos. Los autores, especialistas todos en el estudio de las trasferencias de masa y energía en sistemas hidroagrícolas, tienen la esperanza de que la obra resulte genuinamente útil a los estudiantes como parte de sus textos de enseñanza, a los profesionales como una guía para sus trabajos de innovación y a los agricultores un texto digno de toda su confianza. El libro es en síntesis un producto de la investigación hidroagrícola orientada al bienestar de la sociedad.

Los autores

ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	2
CAPÍTULO 1.....	3
ESTUDIO AGROCLIMÁTICO.....	3
1.1 BALANCE HÍDRICO.....	3
1.2 ANÁLISIS DE LAS PRECIPITACIONES MÁXIMAS.....	4
1.3 ANÁLISIS Y DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL	9
1.4 DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE DRENAJE	10
CAPÍTULO 2.....	14
MANEJO DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD EN EL SUELO.....	14
2.1 INTRODUCCIÓN	14
2.2 DISTRITO DE TEMPORAL TECNIFICADO 002 ZANAPA-TONALÁ, TABASCO	14
2.3 DISTRITO DE TEMPORAL 018 HUIXTLA, CHIAPAS.....	16
2.3.1 <i>Diagnóstico de áreas con problemas de drenaje y manto freático somero</i>	<i>16</i>
2.3.2 <i>Manejo del régimen de humedad con drenaje subterráneo parcelario controlado</i>	<i>21</i>
2.4 DISTRITO DE TEMPORAL 035 LOS NARANJOS, VERACRUZ	32
2.4.1 <i>Manejo del régimen de humedad con drenaje subterráneo parcelario controlado</i>	<i>32</i>
CAPÍTULO 3.....	39
EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA	39
3.1 METODOLOGÍA.....	39
3.2. RESULTADOS RELEVANTES Y RECOMENDACIONES.....	44
3.3 BENEFICIOS DEL DRENAJE.....	45
CAPÍTULO 4.....	50
REFERENCIAS.....	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Parcela con caña en el Ingenio de Huixtla, Chiapas	3
Figura 1.2 Parcela con caña en el Ingenio de Tres Valles, Veracruz	3
Figura 1.3 Balance hídrico; Ingenio Huixtla, Chiapas	4
Figura 1.4 Balance hídrico; Ingenio Tres Valles, Veracruz.....	4
Figura 1.5 Función probabilística de Gumbel.....	8
Figura 2.1 Diseño de los vertedores en el dren, drenaje superficial semicontrolado	15
Figura 2.2 Manejo del régimen de humedad en el suelo con drenaje superficial semicontrolado.....	15
Figura 2.3 Drenaje superficial parcelario con zanjeadora tipo Dondi.....	15
Figura 2.4 Localización de pozos de observación.....	17
Figura 2.5 Esquema para instalación de un pozo de observación	18
Figura 2.6 Estimación de la conductividad hidráulica por el método del pozo barrenado.....	19
Figura 2.7 Plano de isobatas del manto freático	19
Figura 2.8 Plano de isohipsas.....	20
Figura 2.9 Áreas con problemas de drenaje y manto freático somero	20
Figura 2.10 Determinación del espaciamiento con el programa ESPADREN	22
Figura 2.11 Diseño en planta del sistema de drenaje subterráneo controlado...	24
Figura 2.12 Perfil longitudinal del colector A y el dren A2	25
Figura 2.13 Diseño de la estructura de control para sistemas de drenaje subterráneo controlado.....	26
Figura 2.14 Instalación de drenaje subterráneo parcelario controlado.....	26
Figura 2.15 pH del suelo, no presenta problemas de acidez.....	27
Figura 2.16 Nitrógeno foliar, aprovechamiento eficiente con el drenaje subterráneo parcelario controlado	28
Figura 2.17 Estructura de control para el manejo del régimen de humedad en suelo con drenaje subterráneo parcelario controlado.....	28
Figura 2.18 Rendimiento en caña por zafra para diferentes separaciones entre drenes	29
Figura 2.19 Contenido de sacarosa por zafra para diferentes separaciones entre drenes	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.20 Rendimiento de azúcar por zafra para diferentes separaciones entre drenes	30
Figura 2.21 Diseño de un sistema de drenaje subterráneo controlado	32
Figura 2.22 Instalación de drenaje subterráneo parcelario controlado	33
Figura 2.23 pH del suelo, sin problemas de acidez.....	33
Figura 2.24 Respuesta del suelo, agua y cultivo; con y sin drenaje subterráneo parcelario controlado.....	34
Figura 2.25 Rendimiento en caña y utilidad generada con y sin drenaje	34
Figura 3.1 Medición del gasto en forma volumétrica	39
Figura 3.2 Medición de carga hidráulica	39
Figura 3.3 Esquema general del dren lateral evaluado	40
Figura 3.4 Registro de gastos drenados durante el periodo comprendido del 16 de septiembre al 30 de octubre de 2003	41
Figura 3.5 Hidrograma de salida elaborado a partir de la evaluación del sistema de drenaje. A) detalle para el primer día; B) comportamiento durante diez días	42
Figura 3.6 Dinámica del manto freático, separación entre drenes de 10 m	43
Figura 3.7 Dinámica del manto freático, separación entre drenes de 15 m	43
Figura 3.8 Dinámica del manto freático, separación entre drenes de 20 m	43
Figura 3.9 Parcela con riego pero con mal drenaje, presenta una producción baja o nula	45
Figura 3.10 Drenaje superficial y subterráneo	45
Figura 3.11 En Cantón San Fernando se construyeron 15 km de drenes superficiales y se incrementó la producción de caña.....	46
Figura 3.12 Isobatas en la parcela testigo. Fecha: 26 de noviembre de 2004 y sin precipitación	47
Figura 3.13 Isobatas en la parcela demostrativa. Fecha: 26 de noviembre de 2004 y sin precipitación	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Parámetros de las funciones probabilísticas.....	7
Tabla 1.2 Lluvia máxima para diferentes periodos de retorno.....	9
Tabla 2.1 Muestreos de sazonado y maduración de caña	29
Tabla 2.2 Rendimientos de la zafra 2005-2006 en el Ingenio Huixtla, Chiapas	31
Tabla 2.3 Rendimientos esperados en el Ingenio Huixtla, Chiapas, en 4 000 ha con sistemas de drenaje	31
Tabla 2.4 Rendimientos esperados con relación a la zafra 2005-2006 en el Ingenio Tres Valles, Veracruz.....	35
Tabla 2.5 Rendimientos esperados en el Ingenio Tres Valles, Veracruz, en 8 000 ha con sistemas de drenaje	35
Tabla 3.1 Características hidrodinámicas.....	41

INTRODUCCIÓN

El trópico húmedo en México cubre aproximadamente 46 000 000 hectáreas, de las cuales 7 500 000 tienen potencial agropecuario y se localizan en las planicies y deltas de los ríos Papaloapan, Coatzacoalcos, Grijalva, Pánuco, Usumacinta, y en las costas de Chiapas. Uno de las principales limitantes para su aprovechamiento es la susceptibilidad a inundaciones.

Con la finalidad de incorporar áreas húmedas y subhúmedas tropicales del país a la producción agropecuaria, elevar el nivel de vida de los productores y aprovechar de manera sustentable el recurso agua y suelo fueron creados los Distritos de temporal tecnificado (DTT). La Comisión Nacional del Agua ha construido infraestructura de drenaje principal en los DTT; para aprovecharla plenamente se requiere ejecutar acciones que permitan eliminar los excesos de agua locales que afectan el desarrollo de los cultivos.

En el DTT 018 Huixtla, Chiapas, en el año 2003 se instaló un módulo de drenaje subterráneo parcelario controlado. Hasta la fecha, la instalación y evaluación del sistema de drenaje con cultivo de caña de azúcar ha sido realizada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua a través de convenios de colaboración con la Comisión Nacional del Agua, específicamente con la Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado.

En los últimos años el sector azucarero se ha visto afectado por los precios internacionales del azúcar debido a excesos de producción a nivel mundial en años anteriores. Sin embargo, dicho sector reviste gran importancia no solo por su contribución al desarrollo agrícola e industrial, sino también por su capacidad para crear gran cantidad de empleos, generar y captar divisas. El azúcar es un suplemento calorífico de la dieta alimentaria a partir de cual se puede producir alcohol, bioenergéticos (etanol), componentes alimenticios para animales, bebidas gaseosas, levaduras, papel y dulces.

En México el cultivo de la caña de azúcar genera 440 mil empleos directos y 2.5 millones de empleos indirectos. En la zafra 2005-2006 se cosecharon 659 124 ha a nivel nacional, se molieron 47 290 412 ton, se obtuvo una producción de azúcar de 5 282 088 ton, un rendimiento en fábrica de 11.17% y un rendimiento en campo de 71.75 ton ha de caña.

En el estado de Veracruz se cosecharon 271 349 ha, se molieron 18 512 709 ton, se obtuvo una producción de azúcar de 2 120 063 ton, un rendimiento en fábrica de 11.05% y un rendimiento en campo de 70.73 ton ha de caña. En el Ingenio Tres Valles, Veracruz, se cosecharon 26 768 ha, se molieron 2 120 063 ton, se obtuvo una producción de azúcar de 187 690 ton, con un rendimiento en fábrica de 12.48% y un rendimiento en campo de 56.19 ton ha de caña.

En el estado de Chiapas se cosecharon 26 494 ha, se molieron 2 208 584 ton, se obtuvo una producción de azúcar de 260 959 ton, y se obtuvo un rendimiento en fábrica de 11.43%, así como un rendimiento en campo de 86.17 ton ha de caña. En el Ingenio Huixtla, Chiapas, se cosecharon 11 267 ha, se molieron 836 862 ton y se obtuvo una producción de azúcar de 84 351 ton, con un rendimiento en fábrica de 9.43 % y un rendimiento en campo de 79.43 ton ha de caña.

Estudio agroclimático

1

Capítulo 1

ESTUDIO AGROCLIMÁTICO

1.1 Balance hídrico

El balance hídrico se elabora con los registros de la serie histórica mensual de la precipitación y evaporación y el almacenamiento de la humedad del suelo de 100 mm, y se obtiene como resultado los meses en los que hay que drenar por exceso de humedad en el suelo (figuras **1.1** y **1.2**) y los meses en los que se presenta déficit de humedad, y en los que hay que aplicar riego complementario.



Figura 1.1 Parcela con caña en el Ingenio de Huixtla, Chiapas



Figura 1.2 Parcela con caña en el Ingenio de Tres Valles, Veracruz

En el trópico mexicano, específicamente en los estados de Chiapas y Veracruz, hay dos épocas muy marcadas con respecto al balance hídrico del suelo que presentan las siguientes características (figuras **1.3** y **1.4**):

1. Época con exceso de humedad. Se necesita drenar, va de mayo a octubre para Huixtla, Chiapas, y de junio hasta septiembre para Tres Valles, Veracruz
2. Época con déficit de humedad. Es necesario aplicar riego suplementario; va de noviembre hasta abril para Huixtla, Chiapas, y de octubre hasta mayo para Tres Valles, Veracruz

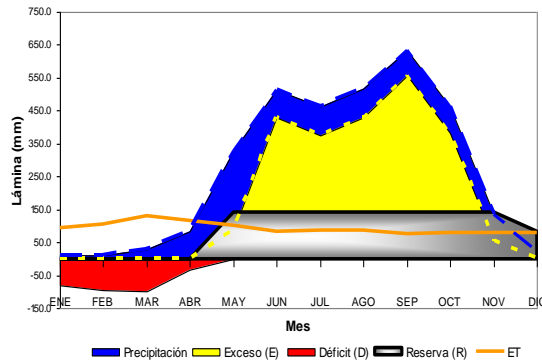


Figura 1.3 Balance hídrico; Ingenio Huixtla, Chiapas

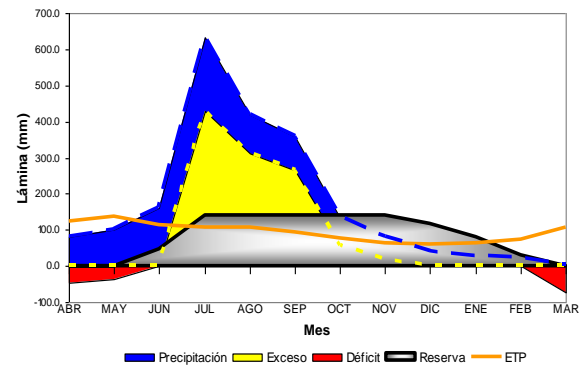


Figura 1.4 Balance hídrico; Ingenio Tres Valles, Veracruz

1.2 Análisis de las precipitaciones máximas

Para determinar la lluvia máxima se tomaron los datos climatológicos de la estación de Huixtla localizada entre la longitud oeste de 92.486 y la latitud norte de 15.141, a una altura sobre el nivel del mar de 40 m, con el periodo de observación de julio de 1954 a mayo de 2008, es decir, 54 años. Los valores de lluvias máximas de las estaciones climatológicas se analizaron con las siguientes funciones probabilísticas:

Distribución lognormal

Esta función asume que los logaritmos naturales de las lluvias máximas siguen una distribución normal. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x)-\alpha}{\beta}\right)^2}; \quad 0 \leq x < \infty \quad (1.1)$$

Con base en el método de momentos el valor de los parámetros es:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n} \quad (1.2)$$

$$\beta^2 = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\ln x_i - \alpha)^2}{n} \right] \quad (1.3)$$

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x\beta} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x)-\alpha}{\beta} \right)^2} dx \quad (1.4)$$

Distribución Pearson III o Gamma de tres parámetros

Esta distribución se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \Gamma(\beta)} \left[\frac{x-\delta}{\alpha} \right]^{\beta-1} e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}}; \quad \delta \leq x < \infty \quad (1.5)$$

donde α , β y δ son los parámetros de escala, de forma y ubicación de la función respectivamente, y $\Gamma(\beta)$ es la función Gamma. Los valores de los parámetros por medio del método de momentos se calculan a partir de los valores de los n datos de la muestra, mediante las siguientes expresiones:

$$\beta = \frac{4}{\gamma^2} \quad (1.6)$$

$$\alpha = \frac{S}{\sqrt{\beta}} \quad (1.7)$$

$$\delta = \bar{x} - S\sqrt{\beta} \quad (1.8)$$

donde \bar{x} y S y γ son la media, desviación estándar y el coeficiente de sesgo, respectivamente, los cuales se calculan como:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1.9)$$

$$S = \left[\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.10)$$

$$\gamma = \sum_{i=1}^n \frac{n(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)(n-2)S^3} \quad (1.11)$$

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \int_0^x e^{-\frac{x-\delta}{\alpha}} \left(\frac{x-\delta}{\alpha}\right)^{\beta-1} dx \quad (1.12)$$

Distribución Gumbel

Si se tienen N muestras en las que cada una contiene n eventos y si se selecciona el máximo valor de los n eventos de cada muestra, entonces la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{(x-\beta)}{\alpha}\right)\right); \quad -\infty \leq x \leq \infty, \quad -\infty \leq \beta \leq \infty, \quad \alpha > 0 \quad (1.13)$$

La función de densidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(-\frac{(x-\beta)}{\alpha} - \exp\left(-\frac{(x-\beta)}{\alpha}\right)\right) \quad (1.14)$$

donde α y β son los parámetros de escala y de ubicación, respectivamente; cuyos valores se pueden estimar con el método de momentos:

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S \quad (1.15)$$

$$\beta = \bar{x} - 0.5772 \alpha \quad (1.16)$$

donde \bar{x} y S son la media y desviación estándar de la muestra, respectivamente.

Distribución Gumbel doble

Debido a la presencia de los ciclones tropicales en el país, las lluvias máximas anuales muestran la presencia de dos grupos de crecientes. El primer grupo se debe a las precipitaciones comunes o normales de la región y el segundo a las precipitaciones ciclónicas, por lo que ajustar las lluvias máximas a una función de distribución resultaría inadecuado, En este caso se puede suponer que cada uno de

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado	1. Estudio agroclimático
---	--------------------------

los dos grupos de avenidas puede ser descrito por separado con una función de distribución Gumbel doble:

$$F(x) = p \exp\left(-\exp\left(-\frac{(x-\beta_1)}{\alpha_1}\right)\right) + (1-p) \exp\left(-\exp\left(\frac{x-\beta_2}{\alpha_2}\right)\right); -\infty \leq x \leq \infty \quad (1.17)$$

donde p es la probabilidad de tener eventos no ciclónicos, α_1 es el parámetro de escala de la población no ciclónica, β_1 es el parámetro de ubicación de la población no ciclónica, α_2 es el parámetro de escala de la población ciclónica y β_2 es el parámetro de ubicación de la población ciclónica.

Para estimar los parámetros de la ecuación anterior se utiliza el error cuadrático mínimo con el algoritmo de Rosenbrock (1960). Dicho método requiere los valores iniciales de los parámetros, que se pueden calcular aplicando las ecuaciones para el cálculo de los parámetros de la función Gumbel para cada una de las dos poblaciones (Aparicio, 1992).

Para determinar la lluvia máxima se tomaron los datos climatológicos de la serie histórica de 1959 a 2003, es decir 45 años de la estación 7077 de Huixtla, Chiapas. Los datos de lluvia se ajustaron a las funciones doble Gumbel, Gumbel, Gamma, lognormal y exponencial. Se seleccionó la que tuvo menor error estándar, que fue la función Gumbel (**Tabla 1.1** y **Figura 1.5**).

Tabla 1.1 Parámetros de las funciones probabilísticas

Función	Momento		Máxima verosimilitud	
	2 parámetros	3 parámetros	2 parámetros	3 parámetros
Lognormal	5.28	4.46	5.75	47.8
Gumbel	4.30		4.00	
Exponencial	6.24		92.81	
Gamma	19.01	4.56	6.30	48.4
Doble Gumbel	5.69			

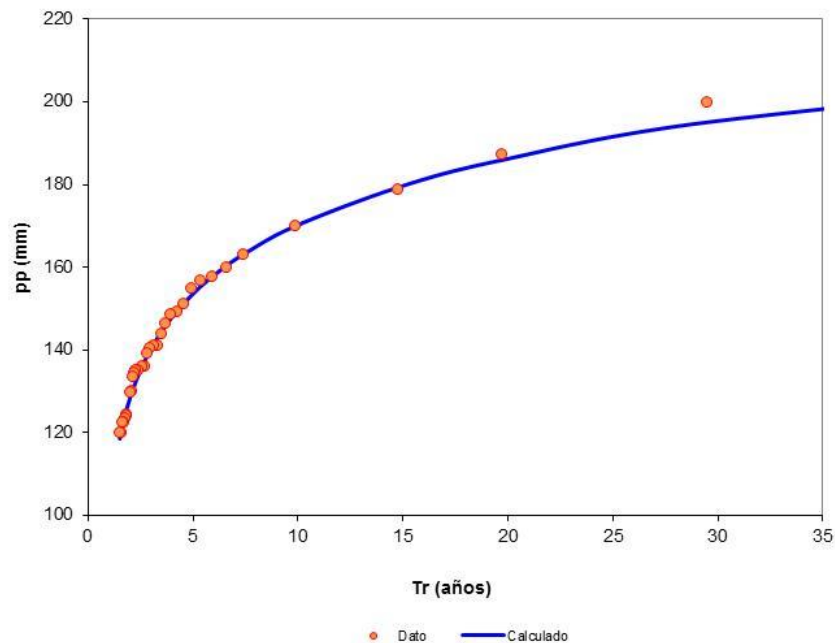


Figura 1.5 Función probabilística de Gumbel

El periodo de retorno (T_r), expresado en años, se define como el número promedio de años en que un evento puede ser igualado o excedido. Por otra parte, la probabilidad de que un evento con un periodo de retorno (T_r) ocurra en cualquier año es igual a:

$$p(x) = \frac{1}{T_r} \quad (1.18)$$

En un conjunto de eventos máximos anuales, ya sean gastos o lluvias, el periodo de retorno que se asocia a cada uno de ellos puede ser estimado con la fórmula de Weibull:

$$T_r = \frac{(n+1)}{m} \quad (1.19)$$

donde m es el número de orden y n el número total de años del registro.

Con la lluvia máxima obtenida con la función de Gumbel se estimaron los periodos de retorno seleccionando el periodo de 25 años para los sistemas de drenaje subterráneo parcelario (**Tabla 1.2**).

Tabla 1.2 Lluvia máxima para diferentes periodos de retorno

Periodo de retorno (Tr, años)	Lluvia máxima (mm)
5	153.62
10	170.29
25	191.36
50	206.99
100	222.50

1.3 Análisis y determinación del escurrimiento superficial

En cuencas que no cuentan con información de aforos de corrientes superficiales para la estimación de la escorrentía total, el método más generalizado, flexible y fácil de aplicar es el del número de curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS, 1972). El método se desarrolló utilizando información de un gran número de cuencas experimentales pequeñas y se ha validado en áreas con clima y condiciones geográficas tropicales. Los registros de precipitación y otros parámetros de las cuencas de drenaje son necesarios para su aplicación. La ecuación con la que se calcula el escurrimiento superficial es la siguiente:

$$R_e = \frac{\left(P + 5.08 - \frac{508}{CN}\right)^2}{\left(P - 20.32 + \frac{2032}{CN}\right)} \quad (1.20)$$

donde R_e es el escurrimiento (cm), P es la precipitación máxima (cm) y CN es el número de curva.

La zona de estudio se ubica en una región de clima subtropical, lo cual permite identificar el número de curva (CN) del método del Servicio de Conservación de Suelos (EUA), y a partir de su aplicación se estimó el escurrimiento superficial en $R_e = 140.5$ mm, considerando un NC de 83 para el cultivo de la caña de azúcar.

1.4 Determinación del módulo de drenaje

En forma general el módulo de drenaje se puede expresar como un gasto por unidad de tiempo y área. Es una función de la escorrentía y del tiempo de drenaje. Para drenaje superficial:

$$q = \frac{\eta R_e}{T_d} \quad (1.21)$$

Para drenaje subterráneo:

$$q = \frac{\eta(P - R_e)}{T_d} \quad (1.22)$$

donde R_e es la escorrentía total (mm), P es la precipitación máxima (mm), T_d es el tiempo de drenaje (horas), y η es una constante con un valor de 2.78.

Para una lluvia máxima de 191.36 mm, escorrentía total de 140.5 mm y un tiempo de drenaje de 72 horas corresponde a un módulo de drenaje para drenaje superficial de 5.43 l/s/ha; para drenaje subterráneo corresponde un módulo de drenaje de 1.96 l/s/ha.

**Manejo del régimen de
humedad en el suelo**

2

Capítulo 2

MANEJO DEL RÉGIMEN DE HUMEDAD EN EL SUELO

2.1 Introducción

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) ha desarrollado investigación y tecnologías eficientes que permiten superar la problemática asociada a los excesos de agua en los terrenos productivos, así como detener la degradación de los recursos agua, suelo y bosque, contando con la participación directa de los productores. A continuación se presenta la tecnología generada y adaptada por el IMTA para el manejo del régimen hídrico de los suelos aplicada en el sureste de México.

2.2 Distrito de temporal tecnificado 002 Zanapa-Tonalá, Tabasco

Se llevó a cabo el manejo del suelo y agua con drenaje superficial semicontrolado utilizando la infraestructura hidroagrícola del DTT y sus drenes y estructuras de paso en caminos. Se levantó el perfil longitudinal del dren y se diseñaron vertedores con la finalidad de mantener el nivel del agua 60 cm abajo del nivel del suelo, lo que permitió evacuar sólo los excesos sin poner en riesgo la infraestructura (**Figura 2.1**).

Se logró mantener un contenido de humedad en el suelo apto para el desarrollo del cultivo de pasto durante 45 días después de haber terminado el periodo de lluvias (**Figura 2.2**). También se evaluó la máquina zanjeadora tipo Dondi en la construcción de 10 km de drenes superficiales parcelarios, con un rendimiento de 200 metros por hora. La capacitación en servicio ha permitido que a la fecha se hayan construido aproximadamente 80 km de drenes, se hayan obtenido buenas cosechas y se hayan evitado enfermedades en las pezuñas del ganado vacuno (**Figura 2.3**).

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado

2. Manejo del régimen de humedad en el suelo

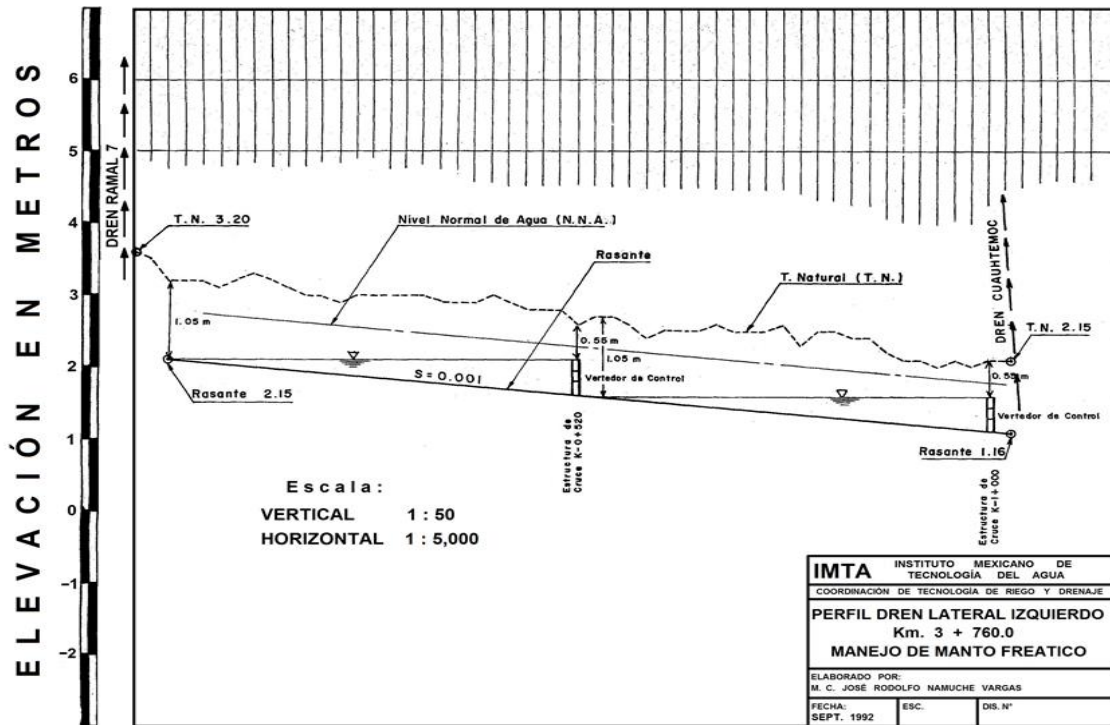


Figura 2.1 Diseño de los vertedores en el dren, drenaje superficial semicontrolado



Figura 2.2 Manejo del régimen de humedad en el suelo con drenaje superficial semicontrolado



Figura 2.3 Drenaje superficial parcelario con zanjeadora tipo Dondi

2.3 Distrito de temporal 018 Huixtla, Chiapas

El Distrito de temporal tecnificado 018 Huixtla, Chiapas, se encuentra localizado en el municipio de Huixtla, Chiapas. Se ubica en las coordenadas geográficas 14°59′-15°18′ de latitud norte y 92°25′-92°43′ de longitud oeste con respecto al meridiano de Greenwich, a una altitud promedio de 50 msnm. Limita al norte con los municipios de Villa Comaltitlán, Escuintla y Motozintla; al este con Motozintla y Tuzantán; al sur con Huehuetán, Mazatán y el Océano Pacífico; y al oeste con el Océano Pacífico y Villa Comaltitlán.

Pertenece a la región fisiográfica de la planicie costera del Pacífico Sur, en la provincia terrestre del grupo de los Mames (caracterizado por volcanes y materiales extrusivos), región terrestre Fb1 (planicies con áreas de lomeríos), subregión Ciudad Hidalgo y a la región hidrológica 23, costa de Chiapas, en la cuenca Río Huixtla y otros, y a las subcuencas Río Huixtla, Río despoblado y Laguna del viejo y Tembladera.

La clasificación climática de Köppen modificada por García (1988) permite identificar tres tipos de clima en el municipio de Huixtla:

- Am: cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, que cubre el 45% de la superficie del municipio
- Aw2: subhúmedo con lluvias en verano, abarca el 53% del área del municipio
- Acm: semicálido húmedo con abundantes lluvias en verano, se presenta en el resto de la superficie.

La temperatura anual promedio en Huixtla es de 28.4°C y la precipitación anual promedio de 2 346 mm, correspondientes a 15 años de observación en la estación climatológica de Huixtla.

2.3.1 Diagnóstico de áreas con problemas de drenaje y manto freático somero

Debido a la necesidad de contar con una agricultura competitiva es necesario implementar acciones enfocadas a realizar un mejor uso y manejo del agua y el suelo, tanto en la red principal de drenaje como en el nivel parcelario. Parte de la solución consiste en detectar y atender las áreas con problemas de drenaje, cuidar el funcionamiento de los sistemas de drenaje y determinar la presencia de alcalinidad o acidez en el suelos, así como analizar la calidad del agua freática.

El nivel freático (NF) lo constituye el nivel superior de las aguas subterráneas libres que tiene una presión igual a la presión atmosférica. Para un tratamiento

adecuado de problemas de drenaje es necesario conocer la profundidad del nivel freático en el espacio y en el tiempo. En el Distrito de temporal tecnificado 018 Huixtla, Chiapas, se localizaron y construyeron 120 pozos de observación del manto freático (figuras 2.4 y 2.5).

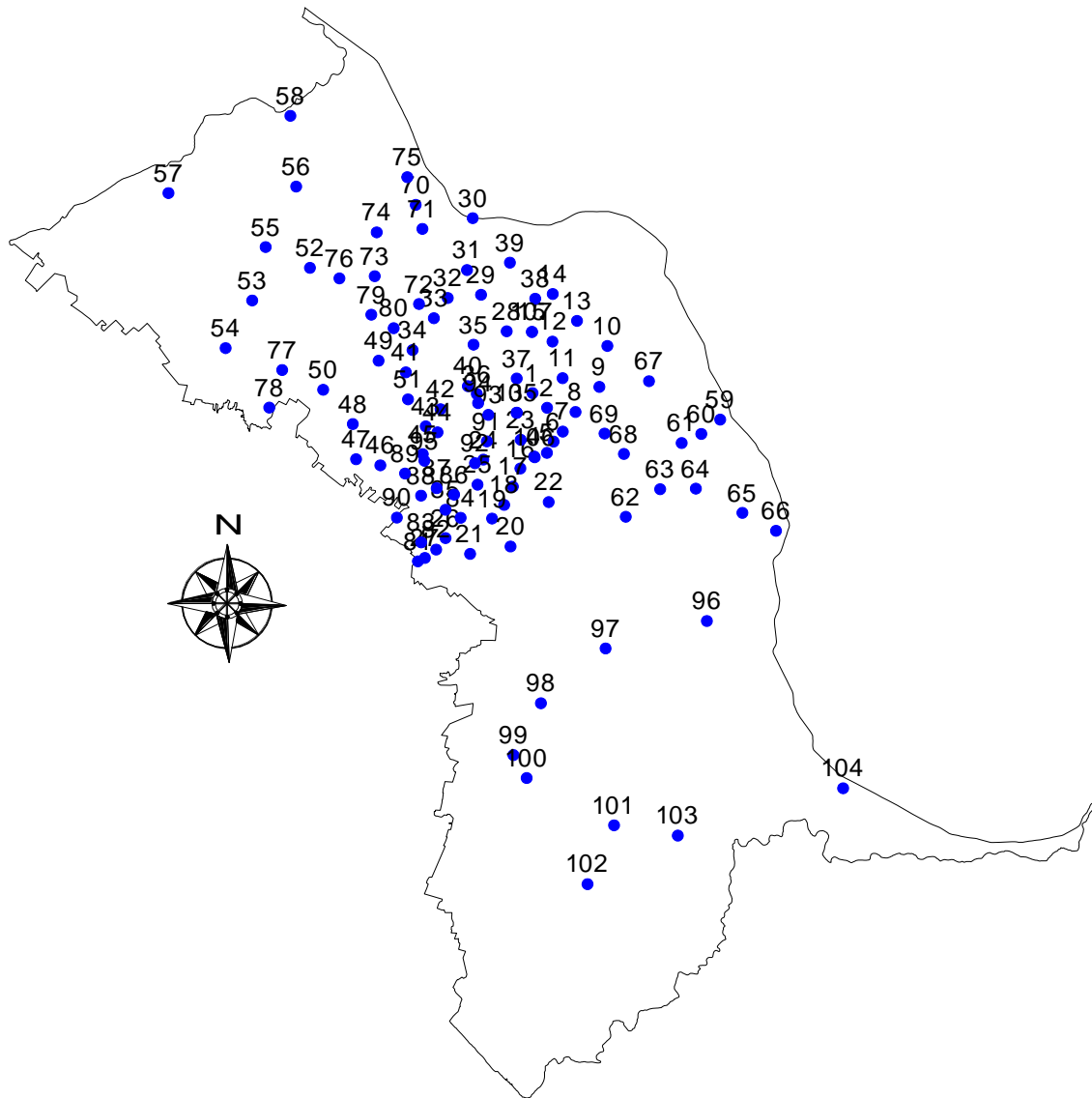


Figura 2.4 Localización de pozos de observación

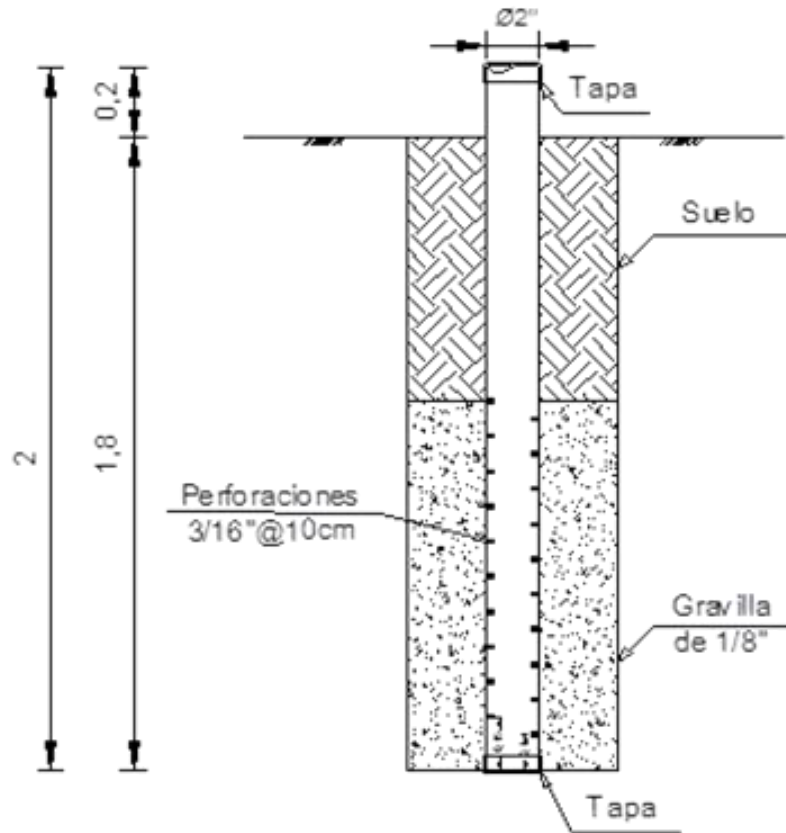


Figura 2.5 Esquema para instalación de un pozo de observación

La conductividad hidráulica es una propiedad muy importante de los medios porosos, pues indica la movilidad del agua dentro del suelo y depende del grado de saturación y la naturaleza del mismo. Las utilidades del conocimiento del valor de la conductividad hidráulica son innumerables. Entre los beneficios se puede resaltar que sirve para elaborar el diseño de sistemas de drenaje agrícola ya sea superficial o subterráneo.

Se realizaron pruebas de conductividad hidráulica saturada por el método del pozo barrenado. Los valores obtenidos varían de 0.62 a 1.84 m día, con un valor medio de 1.23 m día (**Figura 2.6**). Los registros de profundidad del manto freático obtenidos se utilizaron para elaborar planos de isobatas, isohipsas y gráficas área-tiempo, así como para detectar los problemas de drenaje y manto freático somero en aproximadamente 20 000 ha (figuras **2.7** a **2.9**).



Figura 2.6 Estimación de la conductividad hidráulica por el método del pozo barrenado

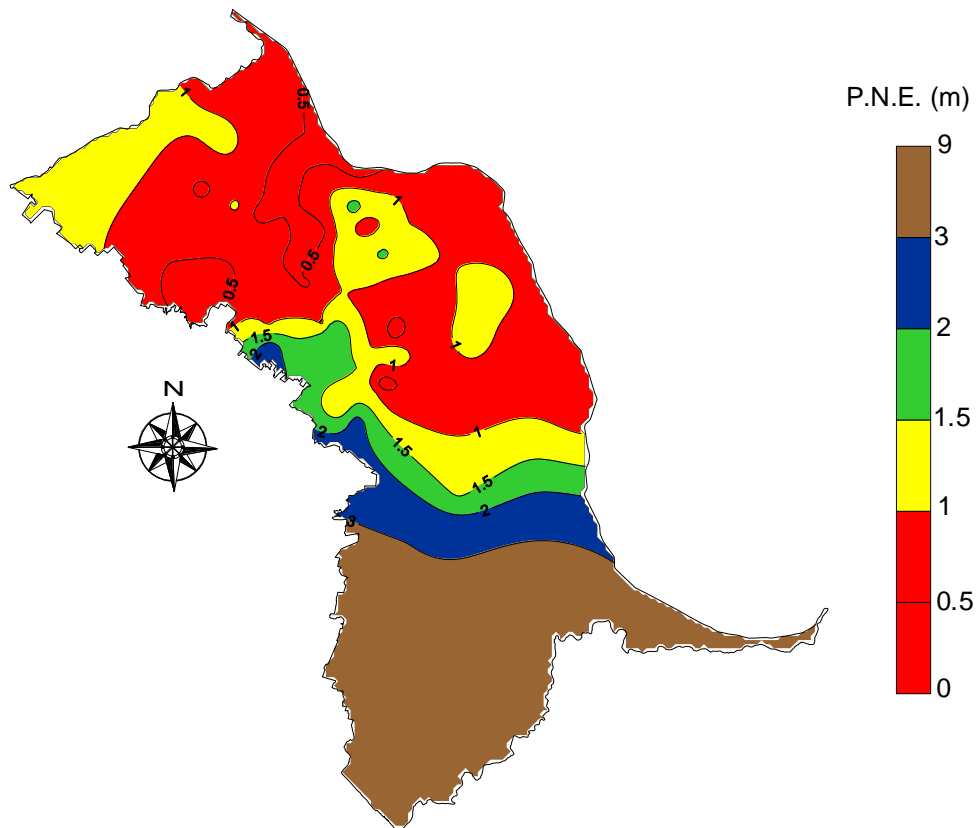


Figura 2.7 Plano de isobatas del manto freático

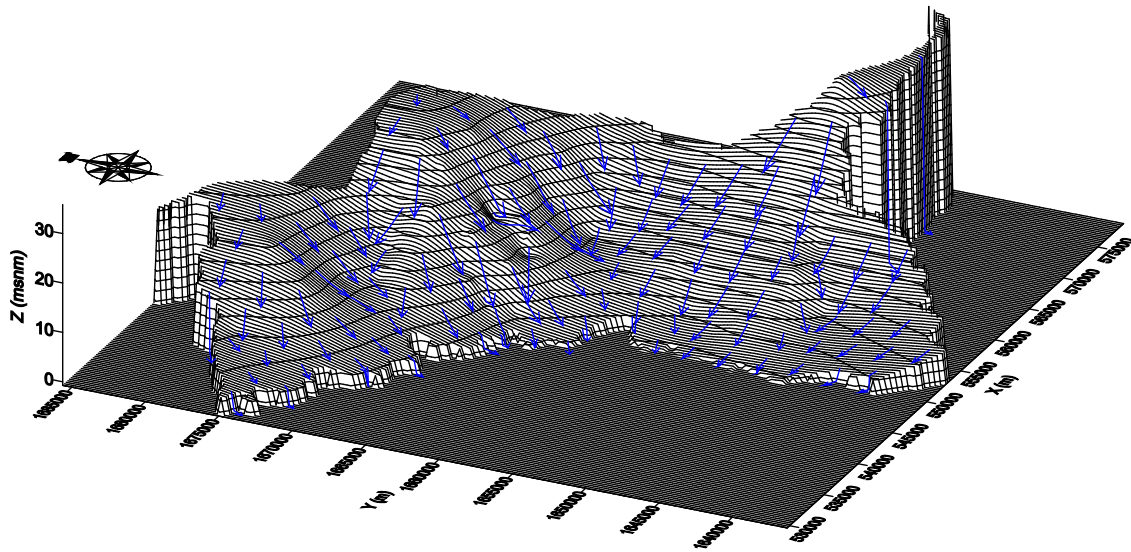
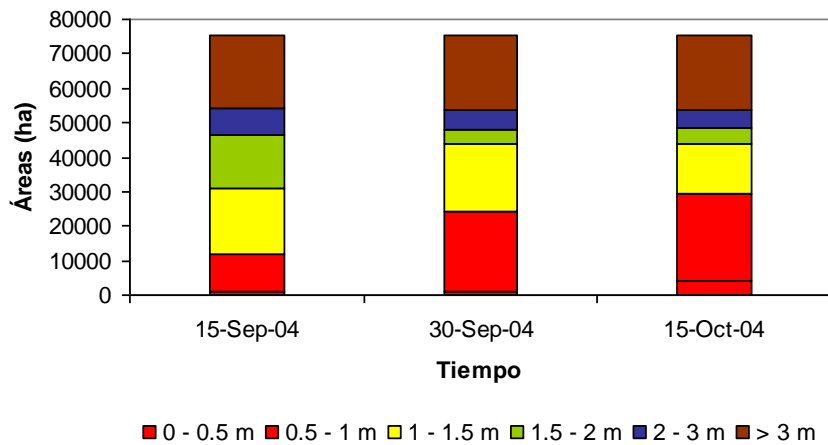


Figura 2.8 Plano de isohipsas



Profundidad (m)	Áreas (ha)			
	15-Sep-04	30-Sep-04	15-Oct-04	Promedio
0-0.5	1,276.128	969.735	3,894.083	2,046.649
0.5-1	10,782.507	23,434.995	25,748.527	19,988.676
1-1.5	18,908.095	19,267.373	14,354.871	17,510.113
1.5-2	15,521.989	4,517.662	4,589.660	8,209.770
2-3	7,481.640	5,376.399	5,105.583	5,987.874
3-9	21,410.870	21,815.064	21,688.503	21,638.146
Total	75,381.228	75,381.228	75,381.228	

Figura 2.9 Áreas con problemas de drenaje y manto freático somero

2.3.2 Manejo del régimen de humedad con drenaje subterráneo parcelario controlado

2.3.2.1 Diseño

En condiciones tropicales, para determinar el espaciamiento generalmente se utilizan las ecuaciones de régimen transitorio, que 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 de la lluvia, hasta la profundidad deseada antes de que caiga la siguiente lluvia. La fórmula más utilizada en este caso es la de Glover-Dumm (Ritzema, 1994):

$$L = \pi \sqrt{\frac{K_s D}{\mu \alpha}} \quad (2.1)$$

donde L es el espaciamiento entre drenes (m), π es una constante con valor de 3.1416, K_s es la conductividad hidráulica del suelo (m/d), D es el espesor saturado equivalente (m) y μ es la porosidad drenable (m^3/m^3). Puede usarse la fórmula propuesta por Van Beers para la estimación:

$$\mu = \sqrt{K_s (cm/d)} / 100 \quad (2.2)$$

= factor de reacción (1 día), que se determina con la fórmula:

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln \left(1.16 \frac{h_o}{h_t} \right) \quad (2.3)$$

donde t es tiempo en el cual debe abatirse el nivel del manto freático (días), h_o es la elevación media del nivel freático con respecto al nivel del agua de los drenes inmediatamente después del riego o lluvia, es decir, el nivel inicial del manto freático (m), h_t es la elevación media del nivel freático con respecto al nivel del agua en los drenes después de t días del riego (antes del siguiente riego) (m).

El diseño se realizó utilizando el programa ESPADREN (Programa para el cálculo de espaciamiento de drenes) para un tiempo de drenaje de tres días. El máximo que soporta la caña de azúcar inundada, obteniendo un espaciamiento de 20 m (**Figura 2.10**). Este trabajo se llevó a cabo en un módulo experimental por lo que se optó por instalar también a espaciamientos de 10 y 15 m. Así mismo se usaron estructuras de control para los espaciamientos de 10 y 20 m, dejando el espaciamiento de 15 m libres para realizar la evaluación hidráulica.

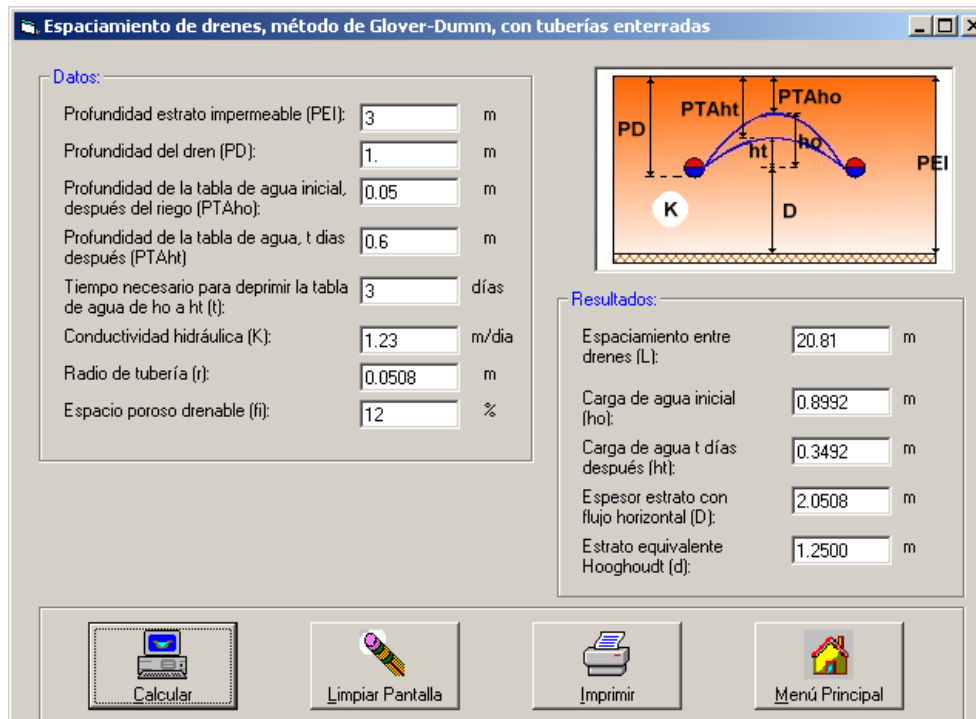


Figura 2.10 Determinación del espaciamiento con el programa ESPADREN

Los cálculos hidráulicos consisten en:

1. Calcular el gasto que debe ser removido por drenes y colectores
2. Verificar que la capacidad de conducción con las pendientes y diámetros propuestos sea suficiente para desalojar los gastos que deben ser removidos
3. Verificar que la velocidad del agua en sitios críticos sea superior a 0.15 m/s para evitar el riesgo de azolvamiento

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

$$Q_r = q A_d \quad (2.4)$$

donde Q_r es el gasto que debe ser removido (m^3/s), q es el módulo de drenaje (m/d) y A_d es el área drenada (m^2).

Normalmente las áreas drenadas son de forma rectangular y entonces:

$$A_D = L X_D \quad (2.5)$$

donde x_D es la distancia desde el inicio hasta la sección de cálculo (m) y L es el 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; para tubos corrugados (Ritzema, 1994):

$$Q_c = 22 d^{2.667} i^{0.5} \quad (2.6)$$

donde Q_c es la capacidad de conducción (m^3/s), d es el diámetro interno del tubo (m) e i es la pendiente de la tubería (adimensional).

El diámetro propuesto para la tubería se acepta si se cumple la condición $Q_c \geq Q_r$. La velocidad de escurrimiento se calcula mediante las siguientes fórmulas para tubos corrugados (Ritzema, 1994):

$$V = 28 d^{0.667} i^{0.5} \quad (2.7)$$

donde V es la velocidad de movimiento del agua (m/s). Esta velocidad debe ser superior a 0.15 m/s para evitar o disminuir los problemas de depósitos de azolves.

Con base en el módulo de drenaje obtenido de 1.96 l/s/ha y las fórmulas en 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 se determinan los gastos a remover, los gastos de conducción y la velocidad de escurrimiento. El diámetro propuesto para los drenes y colectores se acepta debido a que cumple la condición $Q_c \geq Q_r$, y la velocidad es superior 0.15 m/s.

2.3.2.1.1 Diseño del sistema de drenaje en planta

En un plano se indica la separación entre drenes, la longitud de los drenes, la pendiente, el diámetro de la tubería, si es ranurada o ciega, con filtro o sin filtro, las cotas del terreno y las cotas de rasante, al inicio y final del dren. Estos drenes descargan a un colector parcelario, que se indicará de la misma manera que los drenes subterráneos. Todo el sistema debe ser georreferenciado (coordenadas X, Y, Z). El colector parcelario descarga a la estructura de control, el vertedor de esta estructura se colocará a una profundidad que no afecte la raíz del cultivo (**Figura 2.11**).

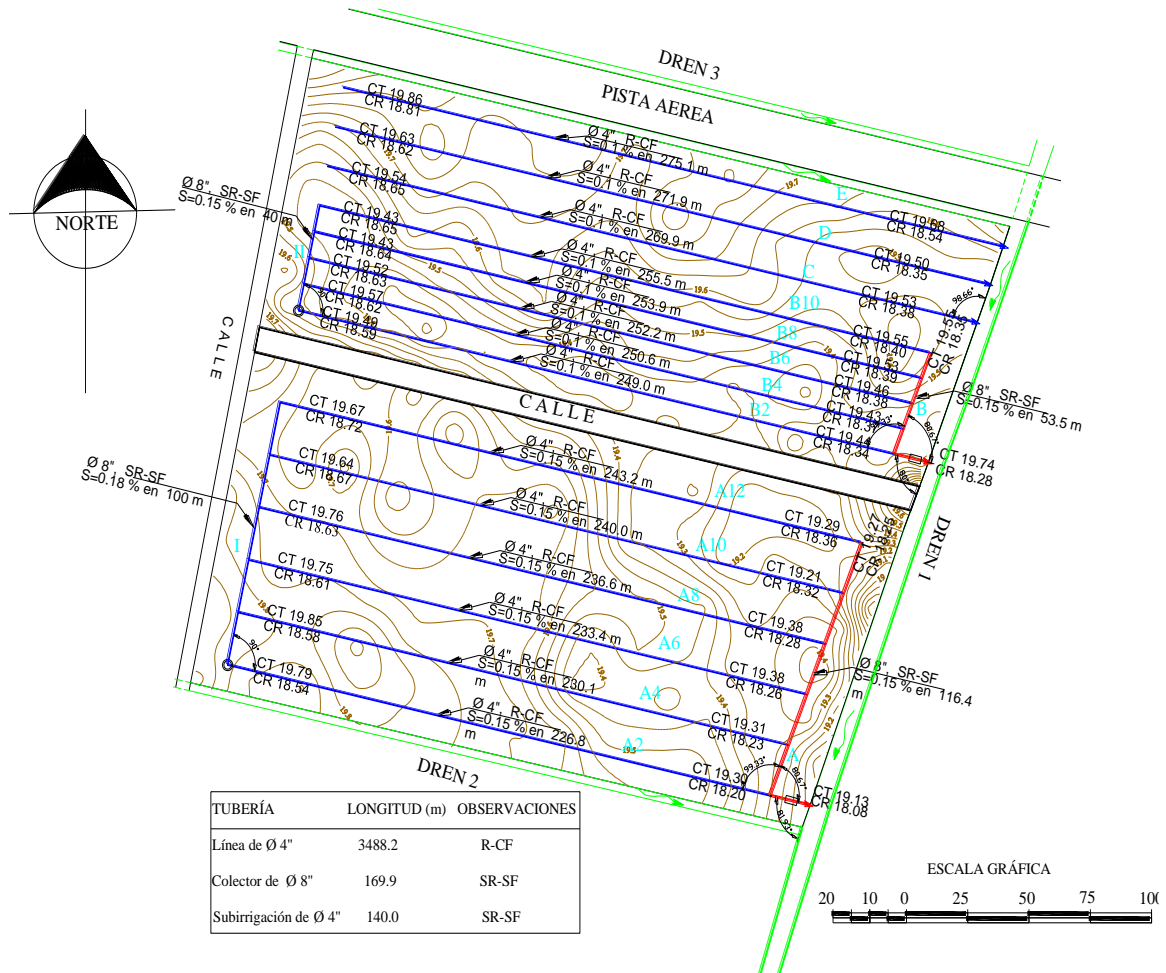


Figura 2.11 Diseño en planta del sistema de drenaje subterráneo controlado

2.3.2.1.2 Diseño del perfil longitudinal de los drenes

El plano indicará lo mismo para el drenaje subterráneo, pero hay que considerar que la descarga de la estructura de control al dren superficial debe estar mínimo a 30 cm sobre la rasante de dicho dren (Figura 2.12).

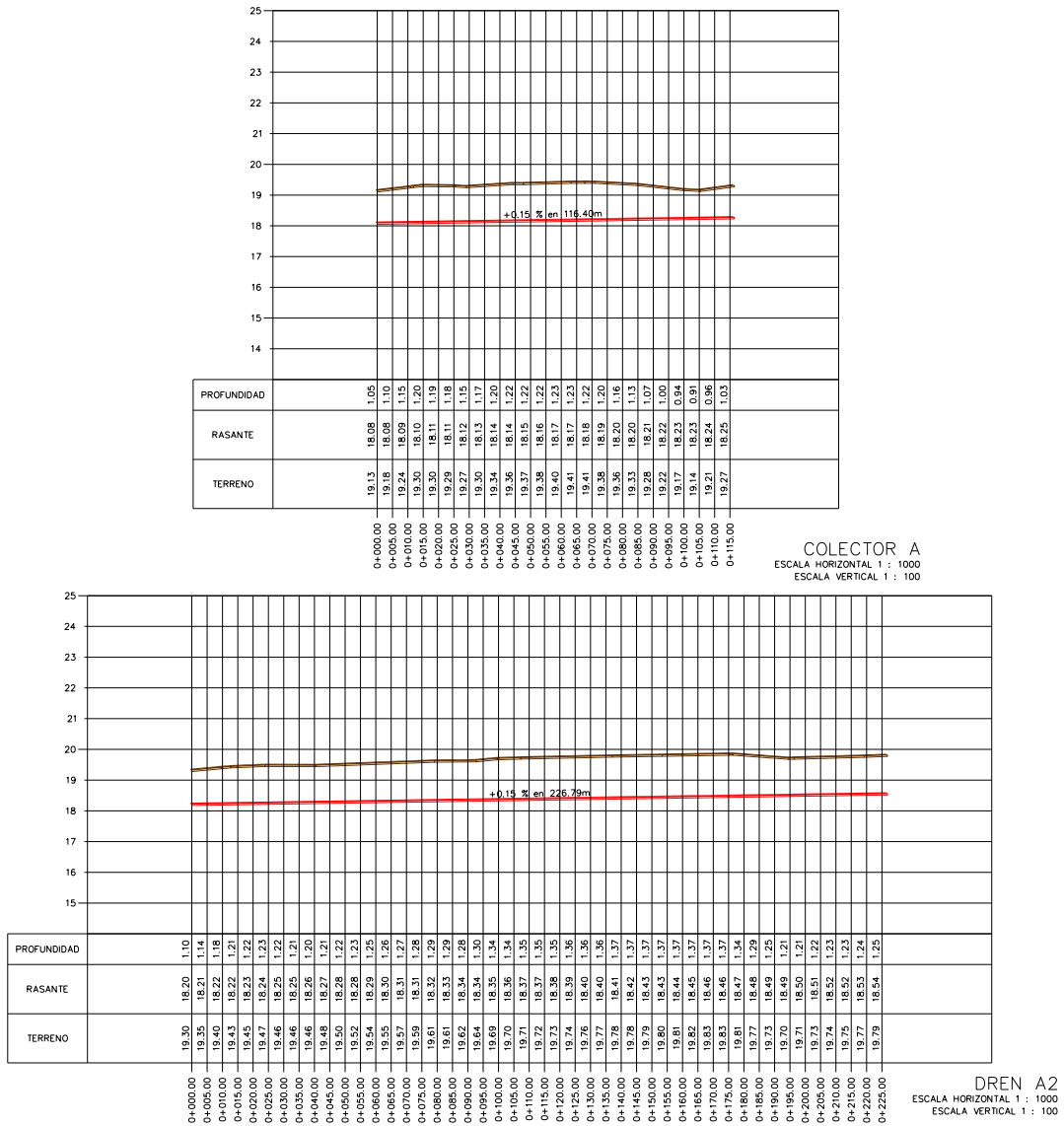


Figura 2.12 Perfil longitudinal del colector A y el dren A2

2.3.2.1.3 Estructuras de control

El diseño consiste en realizar un plano estructural muy acotado. Considerando el cultivo a establecer se debe indicar la profundidad a la cual debe estar el vertedor, que además debe estar a 60 cm debajo de la superficie del suelo para que la raíz de la plantas tenga aireación. En el caso del cultivo de arroz el vertedor se debe localizar a 20 cm debajo de suelo (**Figura 2.13**).

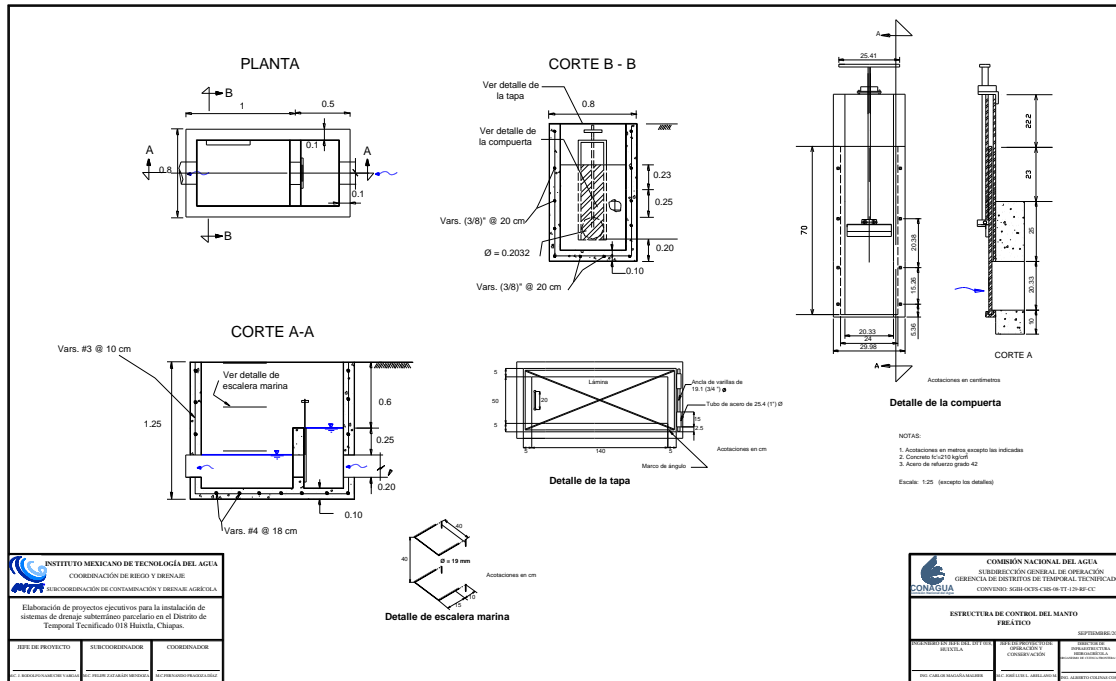


Figura 2.13 Diseño de la estructura de control para sistemas de drenaje subterráneo controlado

2.3.3.2 Instalación

La instalación del sistema de drenaje se lleva a cabo con una zanjadora tipo cincel que permite el control de la pendiente mediante un sistema láser (Figura 2.14).



Figura 2.14 Instalación de drenaje subterráneo parcelario controlado

2.3.2.3 Manejo del suelo, agua y cultivo

Se ha monitoreado la evolución del pH del suelo; se ha verificado durante tres años que su valor se encuentra en el rango óptimo para el desarrollo del cultivo de caña (Figura 2.15).

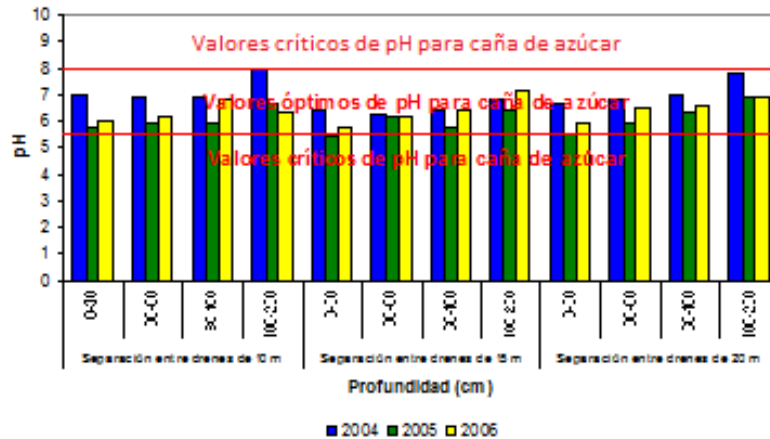


Figura 2.15 pH del suelo, no presenta problemas de acidez

A partir de muestreos de hojas del cultivo de la caña de azúcar se determina el nitrógeno foliar. En la Figura 2.16 pueden apreciarse los resultados de los análisis que se efectuaron con una periodicidad anual en cada una de las separaciones entre drenes. Durante 2005 no se realizó control del régimen de humedad y se observa que existe un efecto directo de la separación entre drenes sobre el aprovechamiento del nitrógeno.

Durante 2006 se realizó el control del régimen de humedad (Figura 2.17) y se observa que dicho control (separaciones de 10 y 20 m) induce un mayor aprovechamiento del nitrógeno. En otras palabras, el control del régimen de humedad puede utilizarse con fines de planeación de la zafra sin afectar el nivel del porcentaje de sacarosa (Tabla 2.1). De esta manera, para el caso del DTT 018, si se programa la zafra en diciembre, entonces no debe realizarse el control del régimen de humedad en el suelo. Para fechas de zafra posteriores es recomendable regular el régimen de humedad del suelo.

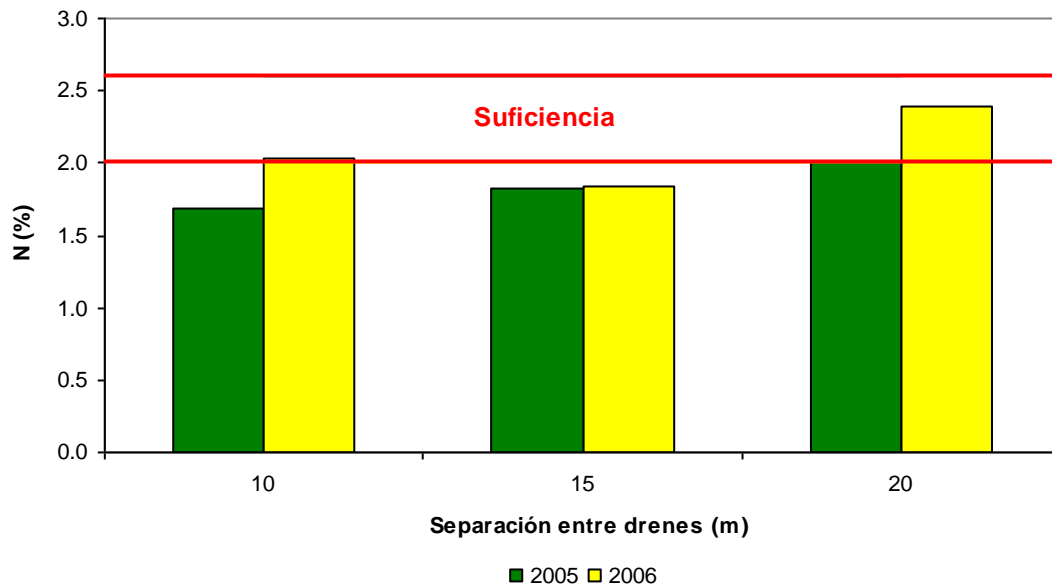


Figura 2.16 Nitrógeno foliar, aprovechamiento eficiente con el drenaje subterráneo parcelario controlado

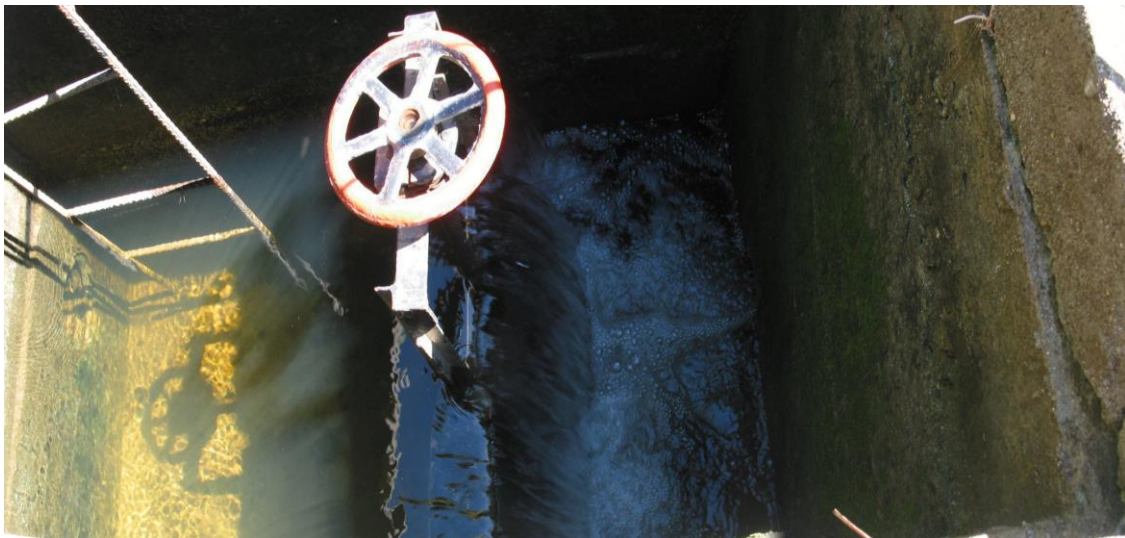


Figura 2.17 Estructura de control para el manejo del régimen de humedad en suelo con drenaje subterráneo parcelario controlado

Tabla 2.1 Muestreos de sazonado y maduración de caña

Separación (m)	10, con estructura de control		15, sin estructura de control		20, con estructura de control	
	Humedad (%)	Sacarosa (%)	Humedad (%)	Sacarosa (%)	Humedad (%)	Sacarosa (%)
01/11/2006	79.0	11.3	78.9	12.2	81.3	10.9
15/11/2006	78.8	11.3	78.4	11.9	80.2	10.0
30/11/2006	79.8	11.9	78.6	12.5	79.4	10.8
15/12/2006	79.0	11.5	73.9	12.8	79.3	10.7
30/12/2006	76.2	12.6	75.5	12.7	79.2	11.5
15/01/2007	78.1	12.7	79.1	12.0	77.5	12.7
08/03/2007	72.4	13.6	75.0	11.7	71.6	13.0
Rendimiento (ton/ha)	103.90		91.64		120.72	

2.3.2.4 Rendimientos y evaluación económica

Las figuras 2.18, 2.19 y 2.20 muestran los rendimientos en caña, sacarosa y azúcar, respectivamente. Se puede apreciar que la separación entre drenes a 20 m es la más recomendable para los tipos de suelo y clima del DTT 018.

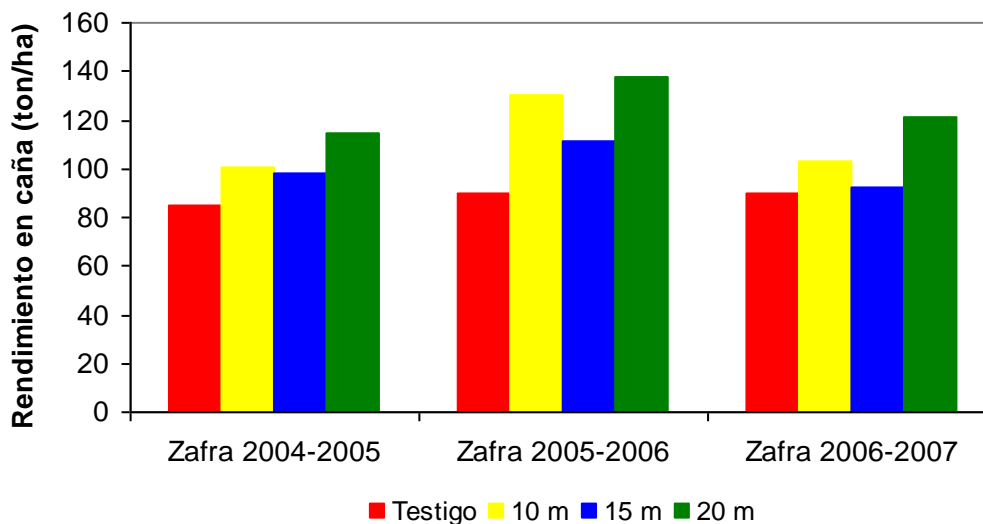


Figura 2.18 Rendimiento en caña por zafra para diferentes separaciones entre drenes

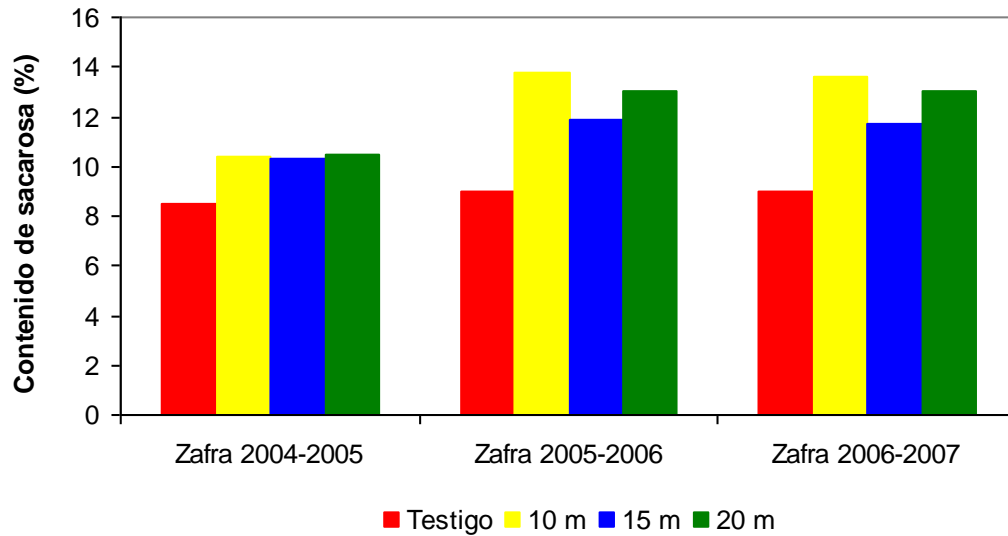


Figura 2.19 Contenido de sacarosa por zafra para diferentes separaciones entre drenes

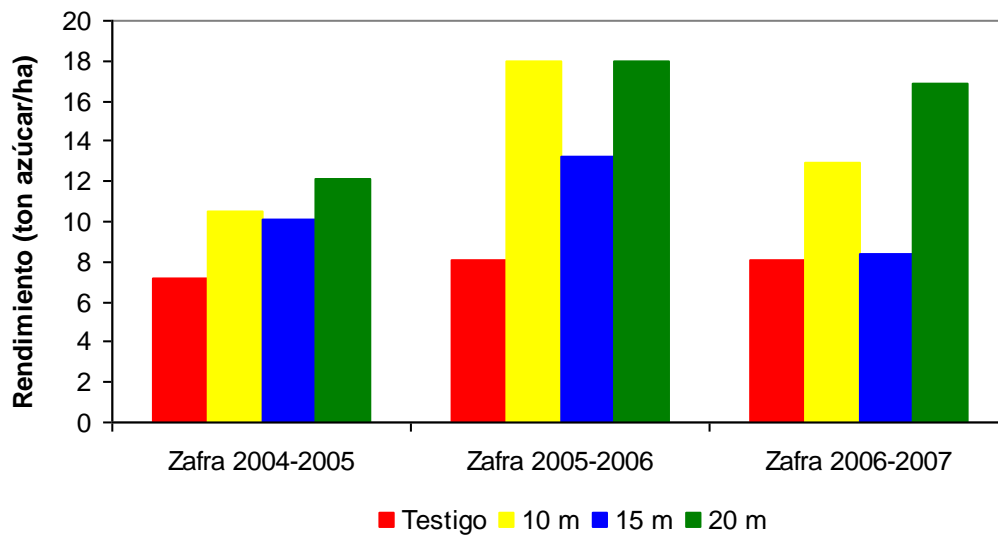


Figura 2.20 Rendimiento de azúcar por zafra para diferentes separaciones entre drenes

Para mostrar la viabilidad económica de los sistemas de drenaje agrícola, se toma como base la información de la **Tabla 2.2**, que corresponde a los indicadores globales del DTT 018 en la zafra 2005-2006.

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado

2. Manejo del régimen de humedad en el suelo

Tabla 2.2 Rendimientos de la zafra 2005-2006 en el Ingenio Huixtla, Chiapas

Zafra 2005-2006 Ingenio Huixtla, Chiapas		
Superficie cosechada (ha) 11 267	Caña molida (ton) 894 938	Rendimiento en fábrica (%) 9.43
Rendimiento en caña (ton ha) 79.43	Rendimiento en azúcar (ton) 84 393	
Costo ton de caña = \$344	\$307 858 607 pesos m.n.	
Costo de ton azúcar estándar = \$6 677	\$563 489 627 pesos m.n.	

Si se considera la instalación de, por ejemplo, 4 000 ha de sistemas de drenaje, con un incremento del 51% en la producción de caña y del 2% en la producción de sacarosa según lo obtenido en el módulo demostrativo, resulta que no invertir en los sistemas de drenaje hace que los productores cañeros dejen de ganar \$55,824,320 y el ingenio, \$166,277,358 (**Tabla 2.3**). Si se tiene en cuenta que el costo del sistema de drenaje es de 25,000 \$/ha, entonces la inversión se pagaría en dos años, incluyendo la rehabilitación de la red de drenaje principal.

Tabla 2.3 Rendimientos esperados en el Ingenio Huixtla, Chiapas, en 4 000 ha con sistemas de drenaje

Rehabilitación o construcción de sistemas de drenaje		
Superficie cosechada (ha) 4 000	Caña molida (ton) 480 000	Rendimiento en fábrica (%) 11.43
Rendimiento en caña (ton ha) 120	Rendimiento en azúcar (ton) 54 864	
Incremento en caña (%) 51	Incremento en fábrica (%) 2.0	
Costo ton de caña=\$344	Se dejan de ganar \$55 824 320 pesos m.n..	
Costo de ton azúcar estándar=\$6 677	Se dejan de ganar \$166 277 358 pesos m.n.	

2.4 Distrito de temporal 035 Los Naranjos, Veracruz

Para realizar los estudios que permitan establecer sistemas de drenaje en el Distrito de Temporal Tecnificado 035 Los Naranjos, Veracruz, se sigue el mismo procedimiento realizado en el Distrito de Temporal Tecnificado 018 Huixtla, Chiapas.

2.4.1 Manejo del régimen de humedad con drenaje subterráneo parcelario controlado

2.4.1.1 Diseño

El sistema de drenaje subterráneo parcelario controlado consta de drenes de tubería de polietileno ranurados y con filtro geotextil. La separación entre drenes es de 15, 20, 30 y 40 m, con una profundidad media de 1.10 m y una pendiente típica de 0.001. Para las separaciones de 20, 30 y 40 m el sistema de drenaje cuenta con estructuras de control para el manejo del régimen de humedad en el suelo, mientras que para la separación de 15 m se tiene descarga libre al dren a cielo abierto (**Figura 2.21**).



Figura 2.21 Diseño de un sistema de drenaje subterráneo controlado

2.4.1.2 Instalación

La instalación del sistema de drenaje se lleva a cabo con una zanjadora tipo cincel que permite el control de la pendiente mediante un sistema láser (**Figura 2.22**).



Figura 2.22 Instalación de drenaje subterráneo parcelario controlado

2.4.1.2 Manejo del suelo, agua y cultivo

Se ha monitoreado la evolución del pH del suelo y durante tres años se ha verificado que su valor se encuentra en el rango óptimo para el desarrollo del cultivo de caña de azúcar (**Figura 2.23**). En la **Figura 2.24** se puede apreciar la respuesta del suelo, agua y cultivo con y sin drenaje subterráneo parcelario controlado.

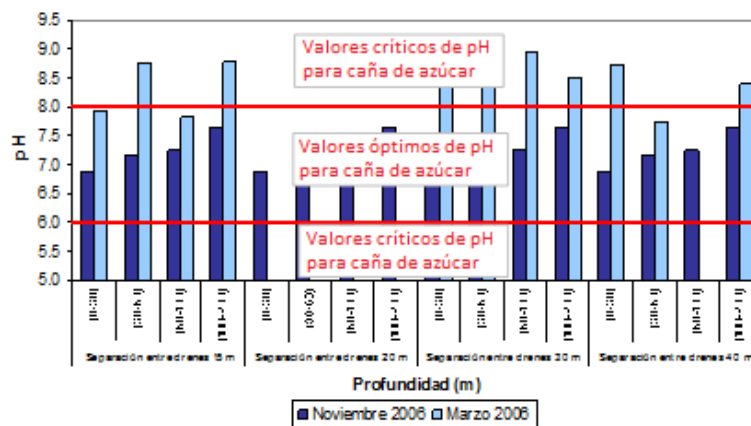


Figura 2.23 pH del suelo, sin problemas de acidez

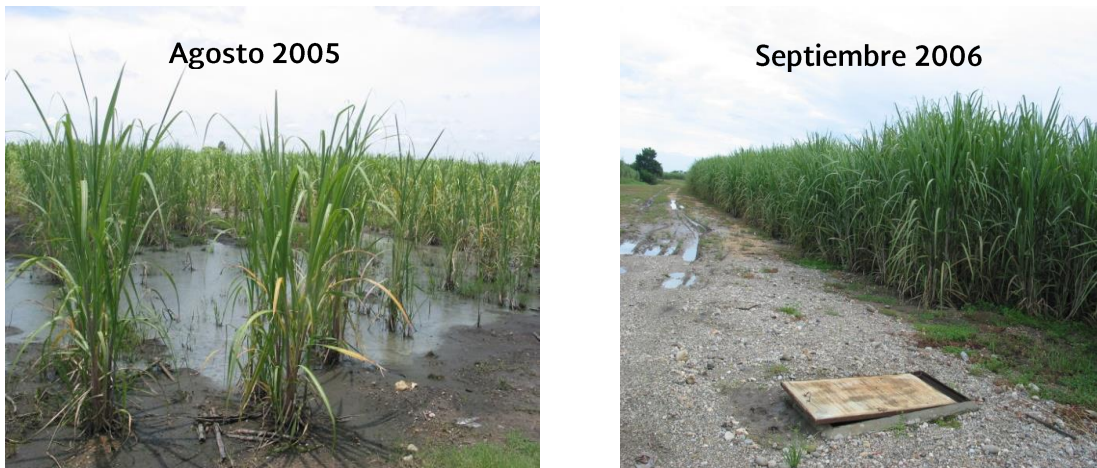


Figura 2.24 Respuesta del suelo, agua y cultivo; con y sin drenaje subterráneo parcelario controlado

2.4.1.3 Rendimientos y evaluación económica

Se realizó una evaluación económica de la inversión en sistemas de drenaje, en la **Figura 2.25** se muestran los resultados considerando la producción para semilla del ciclo 2005-2006. Se aprecia que para la separación entre drenes de 20 m se obtiene el mayor rendimiento, que en este caso supera considerablemente la media registrada en el DTT 035. Para mostrar la viabilidad económica de los sistemas de drenaje agrícola se toma como base la información de la **Tabla 2.4**, que corresponde a los indicadores globales del DTT 035 en la zafra 2005-2006.

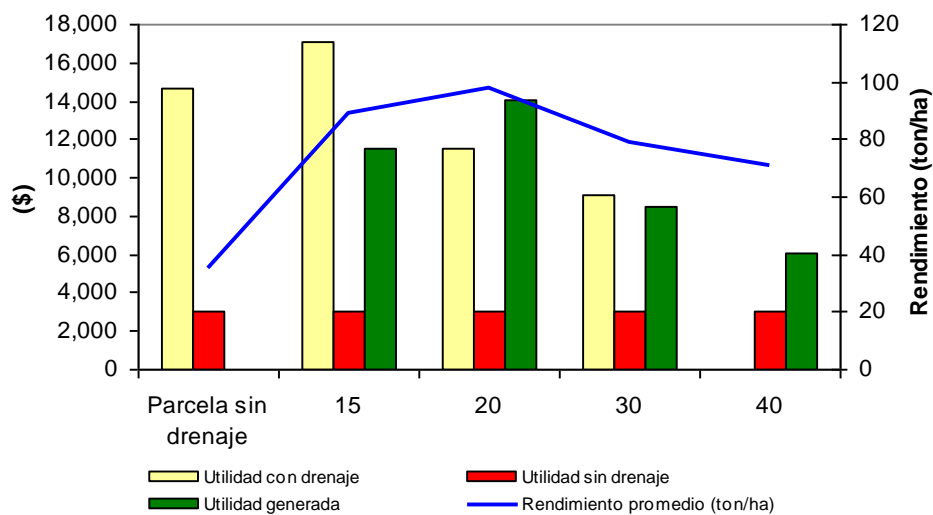


Figura 2.25 Rendimiento en caña y utilidad generada con y sin drenaje

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado	2. Manejo del régimen de humedad en el suelo
---	--

Tabla 2.4 Rendimientos esperados con relación a la zafra 2005-2006 en el Ingenio Tres Valles, Veracruz

Zafra 2005-2006 Ingenio Tres Valles, Veracruz		
Superficie cosechada (ha)	Caña molida (ton)	Rendimiento en fábrica (%)
26 768	1 504 094	12.48
Rendimiento en caña (ton/ha)	Rendimiento en azúcar (ton)	
56.19	187 711	
Costo ton de caña =\$420	\$ 631 719 446 pesos m.n.	
Costo de ton azúcar estándar =\$6 677	\$1 253 345 821 pesos m.n.	

Si se considera la instalación de, por ejemplo, 8 000 ha de sistemas de drenaje, con un incremento del 78% en la producción de caña y del 1% en la producción de sacarosa, según lo obtenido en el módulo demostrativo la falta de inversión en los sistemas de drenaje hace que los productores cañeros dejen de ganar \$147 201 600, y el ingenio \$345 467 339 (**Tabla 2.5**). Si se tiene en cuenta que el costo del sistema de drenaje es de aproximadamente 25 000 \$/ha, entonces la inversión se pagaría en dos años, considerando que es necesario rehabilitar la red de drenaje principal.

Tabla 2.5 Rendimientos esperados en el Ingenio Tres Valles, Veracruz, en 8 000 ha con sistemas de drenaje

Rehabilitación o construcción de sistemas de drenaje		
Superficie cosechada (ha)	Caña molida (ton)	Rendimiento en fábrica (%)
8 000	800 000	13.48
Rendimiento en caña (ton/ha)	Rendimiento en azúcar (ton)	
100	107 840	
Incremento en caña (%)	Incremento en fábrica (%)	
78	1.0	
Costo ton de caña =\$420	Se dejan de ganar \$147 201 600 pesos m.n.	
Costo de ton azúcar estándar=\$6 677	Se dejan de ganar \$345 467 339 pesos m.n.	

**Evaluación del funcionamiento
hidráulico del sistema**

3

Capítulo 3

EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA

3.1 Metodología

La evaluación hidráulica del sistema de drenaje se realiza analizando el comportamiento de las cargas hidráulicas registradas en los pozos de observación y los gastos de drenaje medidos en las descargas. Estas variables fueron monitoreadas durante el periodo comprendido entre el 16 de septiembre y el 30 de noviembre de 2003.

Se utilizó el método volumétrico para aforar la descarga de los drenes (**Figura 3.1**) y para medir la carga se utilizó una sonda eléctrica diseñada para tal fin (**Figura 3.2**). El intervalo de medición fue diario, excepto cuando se presentó una precipitación mayor a 100 mm, en cuyo caso la toma de datos se realizó con un intervalo de una hora durante el primer día después del evento y posteriormente con frecuencia diaria. En la operación futura del sistema de drenaje debe considerarse la aplicación del riego como punto de partida para monitorear cargas y gastos de manera similar a cuando se presenta una lluvia copiosa.



Figura 3.1 Medición del gasto en forma volumétrica



Figura 3.2 Medición de carga hidráulica

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado	3. Evaluación del funcionamiento hidráulico del sistema
---	---

El subsistema compuesto por tres drenes identificados como dren C, D y E en la **Figura 3.3** fue seleccionado como elemento representativo del sistema de drenaje. El dominio de interés tiene 45 m de ancho y 273 m de largo; la separación entre drenes es de 15 m y la profundidad media es de 1.2 m. Las líneas C y D muestran la posición de las baterías de piezómetros utilizadas para medir las cargas hidráulicas y corresponden con las mostradas en la **Figura 3.3**.

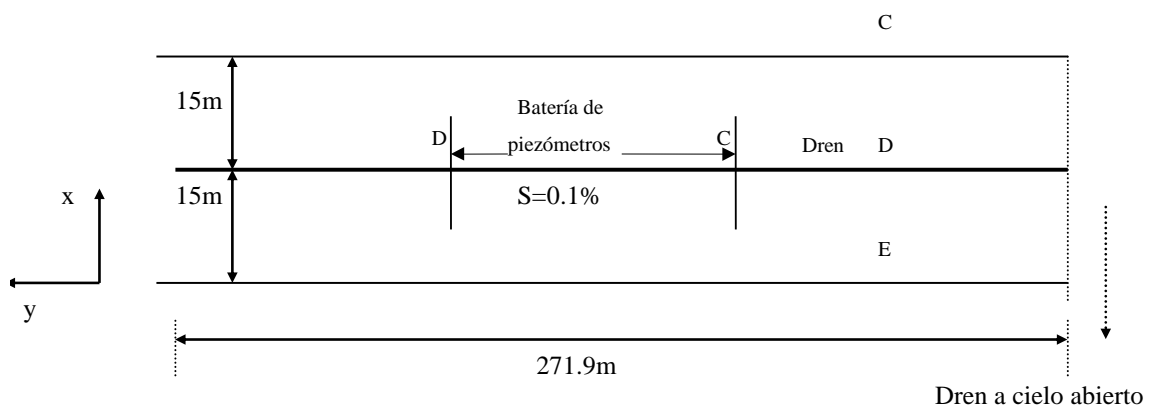


Figura 3.3 Esquema general del dren lateral evaluado

Dentro del periodo en el cual fueron tomados los datos se presentó un evento de precipitación máxima con una lámina acumulada de 113 mm. El hidrograma de descarga asociado a dicho evento se seleccionó para efectuar la evaluación hidráulica del sistema y comprende del 1 al 10 de octubre de 2003 (**Figura 3.4**).

Para la evaluación hidráulica se utilizó un procedimiento inverso similar al presentado por Saucedo *et al.* (2002), haciendo uso de la ecuación bidimensional de Boussinesq y la fórmula de cálculo de la porosidad drenable de Fragoza *et al.* (2003) para reproducir el hidrograma de drenaje observado en campo. Para utilizar la ecuación de Boussinesq es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

1. Las características hidrodinámicas del suelo
2. El coeficiente de conductancia en la interfaz suelo-dren
3. La recarga

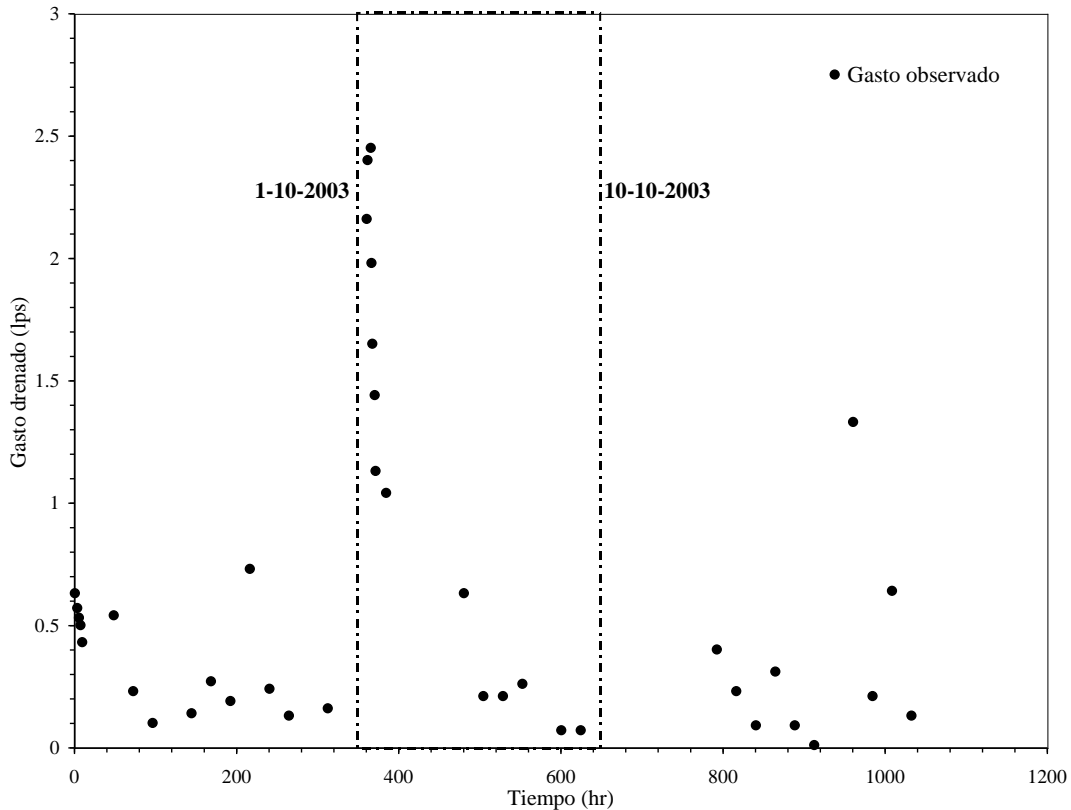


Figura 3.4 Registro de gastos drenados durante el periodo comprendido del 16 de septiembre al 30 de octubre de 2003

Las características hidrodinámicas del suelo se determinaron con base en su textura media haciendo uso del *Manual para diseño de zonas de riego pequeñas* del IMTA (1997) y se muestran en la **Tabla 3.1**. Pueden apreciarse los valores del contenido volumétrico de agua a saturación θ_s , el contenido volumétrico de agua residual θ_r , el parámetro de Fujita α y la escala de Bouwer λ_c (Fragoza *et al.*, 2003).

Tabla 3.1 Características hidrodinámicas

Textura media	θ_s [cm ³ cm ⁻³]	θ_r [cm ³ cm ⁻³]	α [-]	λ_c [m]
Franco-areno-arcilloso	0.453	0.0	0.90	0.37

El coeficiente de conductancia en la interfaz suelo-dren, necesario para aplicar la condición de frontera de radiación fractal en los drenes (Zavala *et al.*, 2003), se estimó analizando la relación entre las cargas hidráulicas y el gasto drenado. La entrada se asignó como la precipitación efectiva para el periodo de registro de los datos (1 al 11 de octubre de 2003). El cálculo correspondiente se realizó con el método del USDA, que es aplicable porque se cuenta con datos de precipitación acumulada por día y con series históricas de precipitación (Estación Huixtla, Chiapas, clave 07077, elevación 40 m, latitud 15° 8", longitud 92° 28"). Se determinó un valor medio de la duración de la lluvia que propició el evento de drenaje de 6 horas y por lo tanto un valor de precipitación efectiva de 66 mm/d. La salida se asignó como el valor de la evapotranspiración; el análisis de los datos históricos permitió determinar un valor ponderado para la evaporación de 4.5 mm/d y debido a la duración del evento la transpiración se consideró despreciable.

El método inverso, basado en la aplicación de la ecuación de Boussinesq, permite determinar el valor global de conductividad hidráulica a saturación que caracteriza al suelo. Se obtiene como resultado 1.23 m/d. En la figura 3.5 se presenta la evolución del gasto drenado para los datos experimentales y los resultados de la evaluación hidráulica. Aplicar la fórmula de Glover-Dumm con el nuevo valor de conductividad a saturación permite corroborar la necesidad de utilizar, desde un punto de vista hidráulico, un espaciamiento entre drenes de 20 m, sujeto a la evaluación de contenidos de sacarosa que se obtengan una vez efectuada la cosecha.

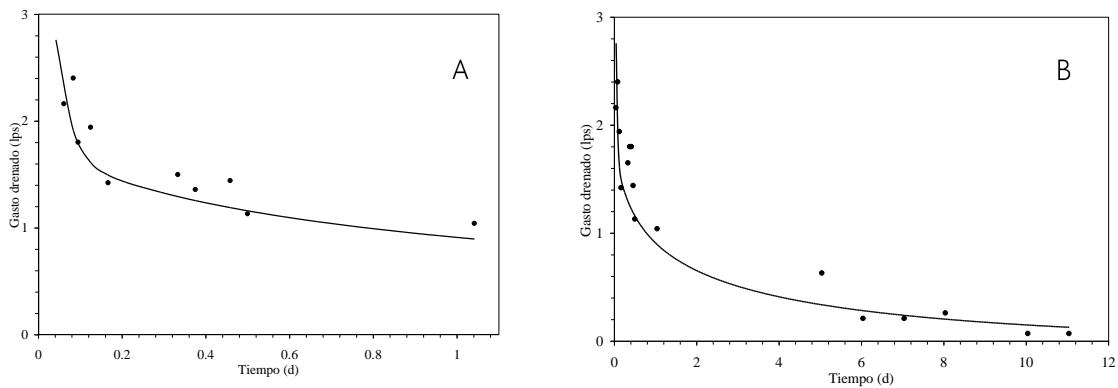


Figura 3.5 Hidrograma de salida elaborado a partir de la evaluación del sistema de drenaje. A) detalle para el primer día; B) comportamiento durante diez días

El hidrograma obtenido mediante la evaluación del sistema de drenaje puede utilizarse para calcular el módulo de drenaje, que da como resultado $q = 8.3 \text{ mm/día}$. El comportamiento del manto freático en la parcela puede visualizarse en las figuras 3.6, 3.7 y 3.8.

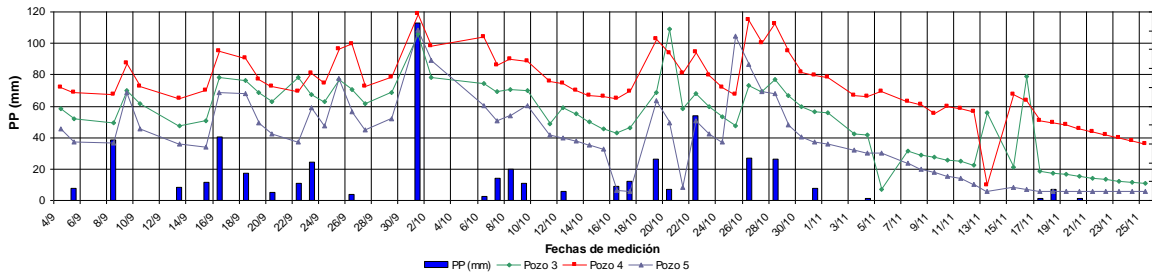


Figura 3.6 Dinámica del manto freático, separación entre drenes de 10 m

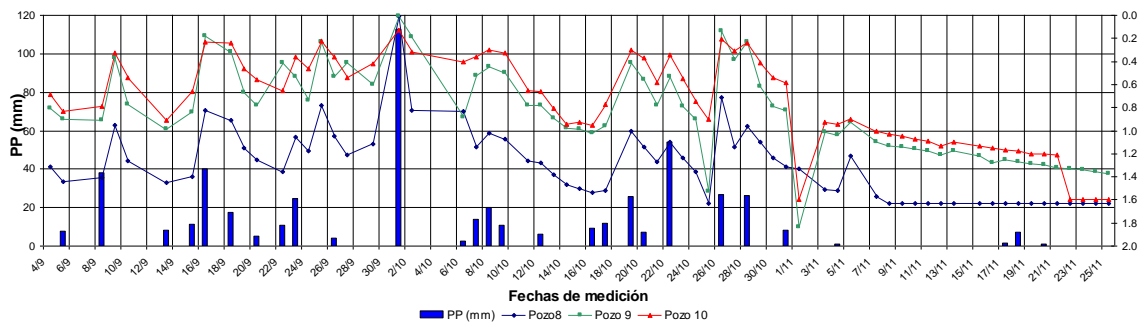


Figura 3.7 Dinámica del manto freático, separación entre drenes de 15 m

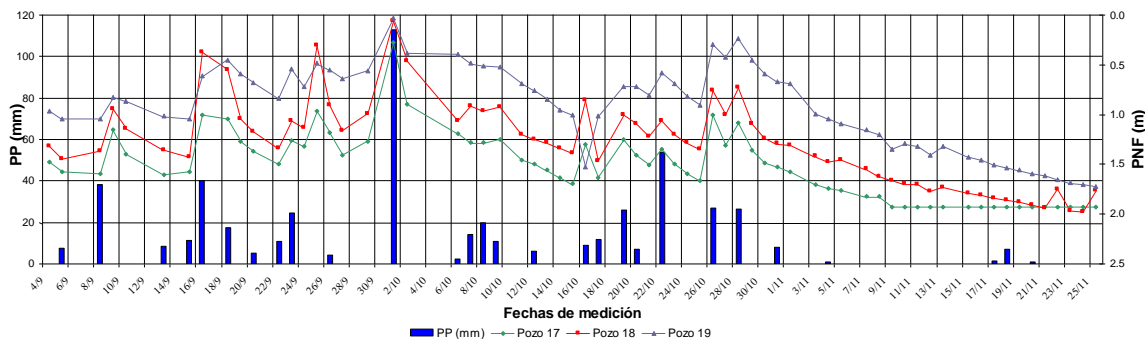


Figura 3.8 Dinámica del manto freático, separación entre drenes de 20 m

Manejo del régimen de humedad en suelos del trópico húmedo con drenaje controlado	3. Evaluación del funcionamiento hidráulico del sistema
---	---

3.2. Resultados relevantes y recomendaciones

1. Se ha generado y adaptado tecnología con drenaje subterráneo parcelario controlado para las zonas húmedas de México.
2. Considerando la producción de la zafra 2005-2006, con el precio de la caña a 420 \$/ton y 344 \$/ton, los productores cañeros de los ingenios de Tres Valles y Huixtla, respectivamente, estarían dejando de ganar \$147 201 600 y \$55 824 320, respectivamente. Asimismo, si se tiene en cuenta el costo del azúcar estándar a 6 667 \$/ton, los ingenios de Tres Valles y Huixtla estarían dejando de ganar \$345 467 339 y \$166 277 358, respectivamente.
3. Con base en los resultados obtenidos se recomienda una separación entre drenes de 20 m, siempre y cuando el suelo y clima sean similares a los que se presentan en los ingenios de Tres Valles, Veracruz y Huixtla, Chiapas. Se ha obtenido un incremento en el rendimiento en caña de al menos un 50%, así como de 1 a 2 % el rendimiento en sacarosa para los ingenios de Tres Valles, Veracruz y Huixtla, Chiapas, respectivamente
4. El drenaje agrícola es una técnica económicamente redituable, la inversión se recupera en dos años de producción, considerando tanto los sistemas de drenaje parcelario como la rehabilitación de la red principal de drenaje.
5. Para lograr el incremento en la producción, se recomienda realizar un diagnóstico que permita seleccionar áreas con problemas de drenaje y manto freático somero. En estas áreas será necesario llevar a cabo el manejo del régimen de humedad del suelo, construyendo o rehabilitando las redes de drenaje principal, secundario y terciario, y en caso de ser necesario, instalar sistemas de drenaje superficial y subterráneo parcelario controlado.
6. Para llevar a cabo el control del régimen de humedad del suelo en zonas húmedas se deben atender primeramente los problemas de drenaje y posteriormente, cuando sea necesario, tener en cuenta la aplicación de riego suplementario (**Figura 3.9**).



Figura 3.9 Parcela con riego pero con mal drenaje, presenta una producción baja o nula

3.3 Beneficios del drenaje

Para resolver los problemas de anegamiento, encharcamiento o mal drenaje en los suelos, es necesario considerar el drenaje del agua de manera superficial y subterránea en debidas proporciones, ya que la buena eficiencia del drenaje subterráneo depende de la distribución adecuada del agua superficial en la parcela con cultivo. Al principio el costo del drenaje es alto pero se justifica en términos generales porque permite utilizar terrenos con buena fertilidad que no podrían aprovecharse de otra manera (**Figura 3.10**), y aumentar la productividad agrícola.



Figura 3.10 Drenaje superficial y subterráneo

Eliminar el agua libre del suelo evita el encharcamiento en la superficie, conservando así la buena estructura del suelo, y permite mantener una buena labranza y resistencia a la erosión por salpicadura. Abre poros en el suelo a mayores profundidades, y ofrece protección contra el daño de la sequía al aumentar la capacidad de almacenamiento del suelo para aprovechar la humedad utilizada por las plantas (humedad capilar), y al permitir que el suelo se airee en mayor medida. Gracias a esto, las raíces de las plantas pueden hacer una mejor extracción de los nutrientes, lo que provoca un arraigamiento más profundo y un buen crecimiento y desarrollo de la planta (**Figura 3.11**).



Figura 3.11 En Cantón San Fernando se construyeron 15 km de drenes superficiales y se incrementó la producción de caña

La construcción de sistemas de drenaje subterráneo permite obtener los siguientes beneficios:

- Eliminar pantanos y cenagales hace que los campos se puedan trabajar más fácil y económicamente; las áreas húmedas constituyen obstrucciones a través de las cuales los productos no se pueden trasladar fácilmente al mercado
- Reducir pérdidas en las cosechas debidas al exceso de agua
- Un buen drenaje subterráneo aumenta la producción en áreas de elevada fertilidad potencial
- Mejorar la calidad de los productos
- Disminuir malezas y enfermedades de los cultivos

- Aprovechar en su totalidad la superficie para los cultivos
- Facilitar la realización de las labores culturales en el ciclo de producción de los cultivos
- Airear el sistema de raíces de las plantas
- Mejorar el acceso a las parcelas y tránsito en las mismas
- Reducir los costos de mantenimiento en comparación con los sistemas superficiales

El drenaje agrícola subterráneo controlado permite una gestión adecuada del régimen de humedad en los suelos de las regiones húmedas. En el cultivo de caña de azúcar esta gestión puede modificar las fechas de siembra y zafra y aumentar el contenido de azúcar (figuras 3.12 y 3.13).

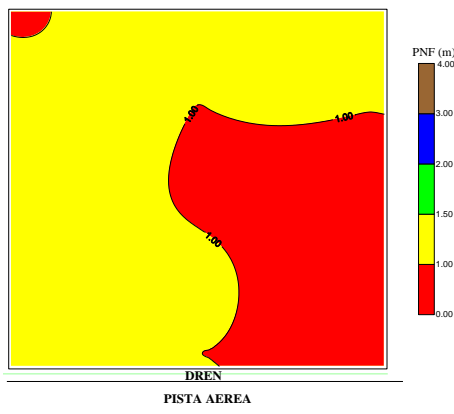


Figura 3.12 Isobatas en la parcela testigo. Fecha: 26 de noviembre de 2004 y sin precipitación

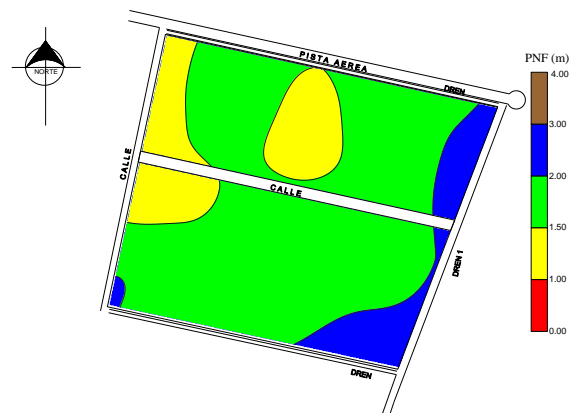


Figura 3.13 Isobatas en la parcela demostrativa. Fecha: 26 de noviembre de 2004 y sin precipitación

Referencias

4

Capítulo 4

REFERENCIAS

- Aparicio, M.J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México: Limusa.
- De León, B. y Robles, B. (2008). *Manual para diseño de zonas pequeñas de riego*. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Dierickx, W., Rehman, H. y Rheman, S. (1992). Significant design and selection parameters for synthetic envelopes. *Proceedings 5th international drainage workshop: subsurface drainage on problematic irrigated soils: sustainability and cost effectiveness*. Lahore, Pakistan, 8-15 de febrero de 1992.
- Dumm, L.D. (1954). Drain spacing formula. *Agricultural engineering*, 35, pp. 726-730.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1988). Las necesidades de agua de los cultivos. *Estudios FAO: Riego y Drenaje*, 24.
- Fertilizantes Mexicanos. (1989). *Guía nacional de fertilización y combate de plagas*. México: Fertimex.
- Fragoza, F., Fuentes, C., Zavala, M., Zataráin, F., Saucedo, H. y Mejía, E. (2003). Drenaje agrícola con capacidad de almacenamiento variable. *Ingeniería Hidráulica en México*, 18(3), pp. 81-93.
- Fuentes C. (1992). *Approche fractale des transferís hydriques dans les sols non saturés*. Tesis de doctorado. Universidad Joseph Fourier de Grenoble.
- García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köeppen. 5ª. ed. México: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gumbel, E.J. (1954). The statistical theory of droughts. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 80(439), pp. 1-19.
- Maas, E.V. (1984). Salt tolerance of plants. En: Christie, B. R. ed. *Handbook of plant science in agriculture*. Florida: CRC Press Boca Raton.
- Ortiz, V.B. (1981). *Sazonado y maduración de la caña de azúcar*. México: Comisión Nacional de la Industria Azucarera.
- Ritzema, H.P. (1994). *Drainage principles and applications*. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Rosenbrock, H.H. (1960). An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, 3(3). pp. 175-184.

- Saucedo H., Fuentes, C., Zavala, M. y Vauclin, M. (2002). Una solución de elemento finito para la transferencia de agua en un sistema de drenaje agrícola subterráneo. *Ingeniería hidráulica en México*, XVII (1). pp. 93-105.
- USDA (1972). Soil Conservation Service. *National Engineering Handbook, Drainage of agricultural lands*. Water Information Center. USDA Washington, D.C.
- University of California Comitee of Consultants. (1974). *Guidelines for interpretation of water quality for agricultural*. Davis: University of California.
- Villón, M.B.(s/f). ESPADREN. Software para el cálculo de espaciamiento de drenes. Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.
- Vlotman, W.F. (1990). *Drain envelop testing, design, and research: Workshop proceedings*. Lahore: IWASRI.
- Zavala, M., Fuentes, C. y Saucedo, H. (2003). Sobre la condición de radiación en el drenaje de una columna de suelo inicialmente saturado. *Ingeniería Hidráulica en México*, 18 (2). pp. 121-131.