



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

FORMULACION DE GRAFICAS Y ECUACIONES
ADIMENSIONALES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE
RIEGO POR GOTEO DE BAJA CARGA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

J O S E A L B E R T O S A N C H E Z C R U Z



DIRECTOR DE TESIS: DR. ERNESTO VAZQUEZ FERNANDEZ

MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: José Alberto Sánchez Cruz

FECHA: 21 de septiembre de 2004.

FIRMA: 

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/087/04

Señor
JOSÉ ALBERTO SÁNCHEZ CRUZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. ERNESTO VÁZQUEZ FERNÁNDEZ, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"FORMULACIÓN DE GRÁFICAS Y ECUACIONES ADIMENSIONALES PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO POR GOTEJO DE BAJA CARGA"

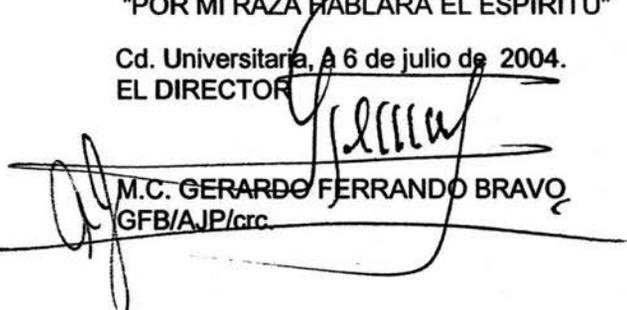
- INTRODUCCIÓN
- I. GENERALIDADES
- II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y MÉTODO DE SOLUCIÓN
- III. RESULTADOS
- IV. COMPROBACIÓN, COMPARACIÓN Y SUGERENCIAS
- V. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS
- APÉNDICE A. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO
- APÉNDICE B. IMÁGENES
- BIBLIOGRAFÍA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cd. Universitaria, A 6 de julio de 2004.
EL DIRECTOR


M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/AJP/crc

Dedicatoria:

A mis padres, Faustino Sánchez Hernández y Esther Cruz Flores.

Gracias por darme la oportunidad de vivir y aprender el significado de la honestidad y el compromiso.

A mis hermanos, María Esther, María del Rocío y Fausto Alejandro.

Agradezco por el cariño, apoyo y respeto que me han brindado.

A mi sobrino César Augusto.

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México y la Facultad de Ingeniería, por la oportunidad que ofrecen para la superación personal y académica.

Al Dr. Ernesto Vázquez Fernández, por el apoyo otorgado para la realización del presente trabajo.

Al M. en I. Víctor Franco, por su valiosa intervención en el proceso de mi titulación.

Índice General

1 GENERALIDADES	6
1.1 MARCO DE REFERENCIA	6
1.2 RIEGO LOCALIZADO	8
1.2.1 RIEGO POR GOTEO	9
1.2.2 DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE RIEGO LOCALIZADO DE BA- JA CARGA	15
2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y MÉTODO DE SOLUCIÓN	26
2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	26
2.2 MODELO MATEMÁTICO	29
2.2.1 CURVAS DE GASTOS DE EMISIÓN	29
2.2.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA	30
2.2.3 CONTINUIDAD EN LOS NUDOS DE LA RED	38
2.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	42
3 RESULTADOS	45
3.1 SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO	46
3.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE MODELOS ADIMENSIO- NALES	49
3.2.1 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES	49
3.2.2 MODELOS MATEMÁTICOS ADIMENSIONALES	51
3.3 GRÁFICAS DE DISEÑO	57
3.4 EJEMPLOS NUMÉRICOS	64

3.4.1	EJEMPLO 1	64
3.4.2	EJEMPLO 2	68
3.4.3	EJEMPLO 3	70
3.4.4	DISCUSIÓN DE LOS EJEMPLOS	71
4	COMPROBACIÓN, COMPARACIÓN Y SUGERENCIAS	73
4.1	VALIDACIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO	73
4.2	COMPARACIÓN CON SISTEMAS EXISTENTES EN EL MERCADO	76
4.2.1	SISTEMA DISTRIBUIDO POR PLÁSTICOS REX S.A. DE C.V.	77
4.2.2	SISTEMA DISTRIBUIDO POR NETAFIM MÉXICO S.A. DE C.V.	77
4.2.3	SISTEMA DISTRIBUIDO POR EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA RIE- GO TECNIFICADO S.A. DE C.V.	78
4.2.4	SISTEMA SUGERIDO POR EL AUTOR	79
4.3	RECOMENDACIONES PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA	80
5	CONCLUSIONES Y COMENTARIOS	82
A	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁU- LICO	88
B	IMÁGENES	101

INTRODUCCIÓN

La irrigación, en cualquiera de sus formas, ha sido practicada por el hombre como una alternativa ante la necesidad de incrementar la productividad agrícola, muy especialmente en las zonas áridas y semiáridas.

A partir del conocimiento general que da la experiencia, el hombre se ha enfretado ante la necesidad de resolver el problema de satisfacer sus requerimientos alimenticios, no obstante la ausencia de elementos o lo limitado de sus recursos. Es así como desde hace tiempo se ha reconocido como necesario el desarrollo y diseño de sistemas de riego tecnificado, mismos que deberán estar sustentados en la aplicación de los conocimientos agronómicos, hidráulicos, hidrológicos y de las ciencias sociales, de manera que puedan adaptarse a las condiciones naturales y potenciales de la localidad que los requiera.

El riego agrícola tecnificado se inició en Israel a partir de la década de los años 60's, convirtiéndose en una herramienta fundamental para lograr un aumento en la cantidad de los productos cosechados, pues se utilizan conductos cerrados o tuberías que permiten un ahorro sustancial del agua, misma que puede ser aprovechada para incrementar el área de riego o dar lugar al establecimiento de dos ciclos anuales, alcanzándose así un incremento en la productividad por unidad de superficie. Además, se mejora la rentabilidad de la actividad agrícola porque la calidad de los productos es superada día con día, debido a que con el riego tecnificado se facilita el uso adecuado de los agroquímicos.

Existen diversos sistemas de riego tecnificado mediante los cuales es posible satisfacer las necesidades de un predio agrícola, sin embargo, es importante realizar una selección adecuada del equipo que se utilizará, considerando para ello tanto la disponibilidad de agua locales, como los recursos económicos con los que se cuenta.

En la última década se ha desarrollado una variedad importante de sistemas de riego por goteo que, por su bajo costo de adquisición y buena eficiencia en el uso del agua, han tenido

una buena aceptación alrededor del mundo.

Los costos que determinan el monto de un sistema típico de riego por goteo son tres:

- 1) El sistema de distribución de agua para cada surco o línea de plantas
- 2) Los emisores o goteros de plástico que entregan el agua en cada punto de riego o planta
- 3) Un sistema de filtración de agua, ubicado en el tanque de almacenamiento

En el diseño de una instalación de riego deben tomarse en cuenta aspectos de tipo agronómico e hidráulico, pues la aplicación correcta del agua sobre una planta es consecuencia del conocimiento de las necesidades de agua reales del cultivo y la separación que entre plantas debe existir.

El presente trabajo tiene por objetivo proporcionar una herramienta práctica de diseño hidráulico, útil para el técnico agrícola y los pequeños agricultores que deseen instalar un sistema de riego por goteo sobre un terreno plano con emisores O-Tif o Hydrogol. Para realizar el análisis de las redes de tuberías que forman a los sistemas de riego en cuestión, se hace uso de un código numérico que permite simular su funcionamiento. La simulación numérica se lleva a cabo para diferentes longitudes y separaciones de las mangueras regantes, verificándose el valor del coeficiente de uniformidad de emisión, número que actúa como un parámetro durante la determinación de las áreas máximas de riego.

La tesis se compone de cinco capítulos. En el primero, se resalta la necesidad de incrementar el número de tierras de cultivo como respuesta a la insuficiencia en la producción de alimentos. Adicionalmente, se propone a los sistemas de riego localizado por goteo como una alternativa para mejorar la productividad en el campo, advirtiendo sobre la importancia del cumplimiento oportuno de las actividades agronómicas. En el capítulo dos, se estudia el diseño hidráulico de sistemas de riego por goteo de baja carga, fase que implica la solución de un sistema de ecuaciones establecido a partir de la continuidad en los nudos que definen a una red de tuberías. En el capítulo tres, se discuten los resultados de la simulación de funcionamiento hidráulico de las redes analizadas, proponiendo el empleo de modelos adimensionales como he-

ramientas prácticas para el diseño de instalaciones de riego. Además, se desarrollan algunos ejemplos que muestran cómo diseñar diversos sistemas y el bajo costo que estos implican. En el capítulo cuatro, se analizan los resultados de una prueba en campo que expone la bondad de la aproximación teórica alcanzada con respecto al funcionamiento hidráulico de redes, al utilizar el código numérico. Por otra parte, se realiza una comparación con algunos equipos que se ofrecen en el mercado y se enuncian algunas recomendaciones útiles para la correcta operación de un sistema. En el capítulo cinco, se desarrollan las conclusiones y comentarios generales. Finalmente, se mencionan las referencias y bibliografía adicional.

Capítulo 1

GENERALIDADES

1.1 MARCO DE REFERENCIA

La escasez de agua ha sido identificada como uno de los principales problemas a los que la humanidad tiene que hacer frente, pues el crecimiento desmesurado de la población durante las últimas décadas afecta directamente a la sobreexplotación de los recursos naturales, teniendo por consecuencia una remarcada competencia por el aprovechamiento del agua entre los diferentes sectores de la población y los servicios que requieren de este bien común.

Mientras que las actividades que se desarrollan en la industria y el hogar representan en conjunto el 25% del agua fresca demandada alrededor del mundo, la agricultura utiliza un 70% para cumplir con su labor, convirtiéndose así en la actividad en donde se demanda mayor cantidad del líquido [7]. No obstante lo anterior, la producción actual de alimentos es insuficiente para cubrir las necesidades de los consumidores, e inclusive, son los mismos campesinos quienes primeramente sufren los padecimientos del hambre y la pobreza.

En México, con el proceso de la Reforma Agraria que se inició a principios del siglo pasado se logró que los ejidatarios se hicieran cargo de parcelas cuyas magnitudes parecían adecuadas para solventar los gastos dentro de su economía familiar; sin embargo, el crecimiento de la población obligó a la división progresiva de los predios originales, hasta que las superficies actuales de los terrenos son insuficientes y dificultan el desarrollo de la agricultura como una

actividad rentable.

Como resultado de la recopilación de información con respecto a la situación del campo mexicano, se sabe que del total de su superficie agrícola, casi el 40% está constituida por predios con una superficie unitaria igual o menor a 2 ha, 20% la conforman predios con áreas que oscilan entre 2.1 y 4 ha y, el 19% de la superficie agrícola nacional la constituyen predios cuya superficie varía entre 4.1 y 8 ha. Adicionalmente, se ha señalado que alrededor del 60% de los predios agrícolas del país no reportan un excedente en la producción, situación delicada que cobra importancia ante la necesidad de abastecer los requerimientos alimenticios de una sociedad en expansión [4].

Analizando la situación, se hace evidente la necesidad de incrementar el número de tierras de cultivo para la generación de una mayor cantidad de alimentos. Para lograrlo, debe tomarse en consideración el hecho de que en la actualidad, el 90% del agua que se entrega para actividades de riego es aplicada bajo sistemas convencionales de riego de superficie, que son métodos que se caracterizan por una baja eficiencia en el uso del agua [7]. Así, la solución exige a manera de prerequisite un cambio en la cultura del aprovechamiento de este recurso.

Dadas las condiciones que se han descrito, la alternativa es adoptar un sistema que permita alcanzar mejores rendimientos, apegándose a ciertas condiciones, como son:

- * Incremento de la rentabilidad o ingresos del agricultor
- * Posible adaptación a las condiciones locales
- * Eficiencia en el uso del agua
- * Calidad en los equipos
- * Precios unitarios económicos
- * Facilidad en la instalación, manejo y conservación
- * Empleo de la mano de obra local
- * Posibilidad de incorporar agroquímicos

La irrigación por goteo fue desarrollada en Israel como una respuesta ante la necesidad de

mejorar la productividad de tierras de cultivo que se encuentren bajo condiciones extremas de escasez de agua. Se han realizado análisis comparativos entre este tipo de riego y el convencional o de superficie. En la India, los resultados mostraron un aumento en la producción de las tierras regadas por goteo, incrementos que varían del 30% al 80%. Con respecto al consumo de agua, el riego por goteo permitió un ahorro del 36% al 62%. Para esta comparación se seleccionaron cultivos de plátano, caña de azúcar, tomate, algodón, calabaza, melón y chile [4].

Con el conocimiento de las experiencias internacionales, la SAGAR puso en marcha el Programa de Ferti-irrigación en el año de 1996. A partir de entonces, se ha comenzado con la instalación de sistemas de riego tecnificado en algunas localidades de la Comarca Lagunera, Yucatán, Oaxaca y Edo. de México. Las estrategias y líneas de acción se han orientado a la adaptación de la tecnología de riego, de modo que los sistemas están sustentados en principios hidráulicos básicos que garantizan un funcionamiento adecuado. Además, la instalación y el manejo del equipo, así como el mantenimiento del mismo, permiten a los trabajadores de la tierra hacer uso de las herramientas que ellos poseen y tener una garantía de los resultados que obtendrán. Se esperan alcanzar beneficios importantes de las inversiones hechas al momento, de manera que mediante un aumento en la producción, se logre la rentabilidad de las actividades agropecuarias y un incremento sustancial en los ingresos del agricultor, todo en beneficio del desarrollo económico y social de los mexicanos.

1.2 RIEGO LOCALIZADO

Es posible caracterizar a las distintas modalidades de riego en función de la técnica que se emplee para suministrar el agua a las plantas. Así, se pueden distinguir dos técnicas fundamentales:

- 1) El riego por superficie o total
- 2) El riego tecnificado o localizado

En el riego por superficie se lleva a cabo la inundación de la parcela, provocándose un gasto excesivo de agua. Es de uso muy común, pues en principio no exige la atención directa de un especialista. Sin embargo, el rendimiento alcanzado es muy bajo porque escasamente se logra

una eficiencia del 60%, entendida ésta como el porcentaje de agua que aprovecha la planta de la totalidad del suministro [6]. Además, debido a la dificultad de proporcionar la dosificación precisa de agua, el suelo sufre un deterioro y los abonos se pierden.

En el riego localizado, denominado internacionalmente Microirrigación, el agua se aplica dentro de una zona restringida de volumen radicular, con la intención de que el suelo no sufra los efectos negativos de la inundación, tales como la asfixia. Por esta razón, los sistemas de riego localizado deben operarse con la frecuencia necesaria para mantener una adecuada humedad en el suelo [6].

1.2.1 RIEGO POR GOTEO

Los riegos localizados a presión, comúnmente llamados *riegos a goteo*, son técnicas de aplicación del agua con un caudal inferior a 16 l/h por punto de riego o metro lineal de manguera de goteo [8]. De esta manera, es posible tener un control de los volúmenes de agua que se entregan, del tiempo de riego necesario para humedecer la tierra hasta la profundidad requerida según el tipo de cultivo, y una aplicación adecuada de fertilizantes a través del agua de riego.

Con la adopción de los sistemas de riego por goteo se puede asegurar un verdadero ahorro de agua, considerando que:

* Se reducen las pérdidas por evaporación al no inundarse la superficie total del suelo. Por el contrario, se pueden utilizar emisores que proporcionen un gasto que esté de acuerdo con la capacidad de infiltración del suelo.

* La conducción y distribución se realiza mediante tuberías cerradas, evitándose así las frecuentes pérdidas ocurridas con el uso de canales o acequias.

Dadas las condiciones actuales de escasez de agua, los turnos de riego en las comarcas de regadío clásico ya no pueden seguir una pauta que esté de acuerdo con las necesidades de los cultivos, sino que los trabajos se han tenido que adaptar a la disponibilidad de agua locales. Con la implantación de los equipos de riego por goteo, el problema anterior podría resolverse mediante un almacenamiento de volúmenes importantes de agua durante los periodos en los

que las necesidades son mínimas o nulas, para aplicarlos como un complemento en la época de necesidades máximas.

COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN

En una instalación de riego localizado pueden identificarse algunos mecanismos, tales como: la estación de bombeo, el cabezal con filtros y equipo de fertilización, red de tuberías, emisores o goteros, válvulas, uniones y piezas especiales. A continuación, se hace una descripción de los elementos básicos que forman parte de un sistema de riego por goteo para parcelas pequeñas.

CABEZAL El cabezal es un recipiente que debe colocarse sobre un apoyo firme sobre el suelo. Su altura con respecto al terreno será la causante del flujo de agua a través de la red de tuberías, mientras que su ubicación dependerá del tipo de diseño.

Se considera que el problema más frecuente en una instalación de riego por goteo es el de la obturación de los emisores, problema derivado de la presencia de partículas orgánicas e inorgánicas en el agua¹. Por ello, el cabezal debe estar equipado con un filtro, cuyas características dependerán de la naturaleza y tamaño de las partículas.

RED DE TUBERÍAS Se trata de una sucesión de tubos o mangueras, en las que el movimiento del agua no depende de una pendiente continua, sino que el agua llena completamente la conducción, provocándose una diferencia de presión entre el interior de la sección y el medio exterior.

En las instalaciones de riego localizado se utilizan materiales plásticos resistentes al intemperismo y al ataque de los fertilizantes. Se sugiere el uso de tubos de PE (polietileno), pues su rugosidad interna es baja; es decir, la uniformidad de su superficie interna es tal que es posible aplicar las ecuaciones para tubos lisos en el cálculo de los distintos parámetros hidráulicos. Además, los tubos de PE son flexibles y muy manejables por su bajo peso.

¹Las sustancias orgánicas que se presentan con frecuencia son algas, diatomeas, peces, moluscos, crustáceos, insectos, gusanos, semillas y restos vegetales. En aguas procedentes de pozos es frecuente la presencia de arenas; mientras que en cauces o depósitos abiertos, el agua puede contener gran cantidad de limos y arcillas [8].

La tubería de polietileno se sirve generalmente en rollos, cuya longitud no está definida, pero depende generalmente del diámetro del tubo. Debe llevar consigo la información correspondiente a las características del material, por ejemplo:

- * Marca comercial.
- * Características del polietileno².
- * Diámetro nominal y espesor³.
- * Año de fabricación.
- * Presión nominal⁴.

EMISORES Los emisores son los elementos más importantes de la instalación, ya que controlan la salida del agua desde las mangueras regantes conocidas como laterales, con la dosis prevista y la presión exigida. Se pueden clasificar agrupándolos según su presión de trabajo [6].

1. Con presión de trabajo de 1.47 a 1.96 bar. El agua al salir todavía lleva presión, por lo que se esparce en un radio determinado. Son los microaspersores y microchorros.
2. Con presión de trabajo de 0.98 bar. Son conocidos como goteros, pues en ellos se produce una disipación de energía, de tal manera que el agua sale gota a gota.
3. Con presión de trabajo inferior a 0.98 bar. Son los indicados para sitios en donde la presión es escasa o resulta muy costosa.

Entre los diferentes tipos de goteros existentes en el mercado, las conexiones de éstos a las tuberías laterales pueden clasificarse por grupos [8].

- Conexión interlínea: Los goteros sirven para unir segmentos de lateral. Generalmente se sirven de fábrica instalados a distancias determinadas.

- Conexión sobre línea: Son colocados sobre una manguera que previamente haya sido perforada mediante un sacabocado de diámetro igual o inferior al empalme del gotero.

²Los tubos de polietileno son producidos a base de una resina derivada del etileno y un aditivo de negro de humo que los protege contra la acción de los rayos ultravioleta. En función de la densidad de la resina base, se pueden definir como de baja, media y alta densidad; y su elección dependerá de las necesidades de resistencia requeridas [8].

³El diámetro nominal es un número convencional de designación para clasificar a los tubos y demás elementos de las conducciones. Su valor corresponde al diámetro exterior teórico en milímetros, sin considerar las tolerancias [8].

⁴La presión nominal es un número convencional que coincide con la presión máxima de trabajo a 20°C [8].

- **Sistemas integrados:** Son conducciones en las que, durante el proceso de fabricación, se insertan interiormente goteros uniformemente espaciados.

Según la configuración de los conductos de paso del agua a través de los goteros, se pueden encontrar [8]:

* **De largo conducto:** La pérdida de carga se produce por el paso del agua a través de un conducto muy largo y de pequeño diámetro.

* **De laberinto:** Fabricados con conductos largos y tortuosos que aumentan la turbulencia del flujo, y consecuentemente la pérdida de carga.

* **De orificio:** El agua sale a través de pequeños orificios, provocándose así la pérdida de carga del sistema.

* **De tipo vortex:** El agua entra tangencialmente a una cámara de pared circular, produciéndose una pérdida de energía superior que la ocurrida en goteros de orificio del mismo diámetro.

* **Autocompensantes:** Son goteros en los que se intenta mantener un caudal constante, independientemente del valor de la presión. Lo anterior se logra mediante una pieza de caucho, que siendo móvil y flexible, se deforma bajo el efecto de la presión, produciéndose entonces la disminución del área de la sección de paso del agua, y con ello el caudal. La autorregulación se consigue para un intervalo de presiones que debe ser indicado por el fabricante.

En vista de la gran variedad de modelos existentes en el mercado, se sugiere llevar a cabo una selección adecuada de los goteros, atendiendo a los requerimientos de baja sensibilidad a la obturación y buena uniformidad de fabricación. Para efectos de este trabajo de tesis, se eligieron para su estudio a dos tipos de goteros:

1) **Goteros O-Tif.** Fabricados por Plásticos Rex, S.A. de C.V., son goteros tipo laberinto de conexión sobre línea.

2) **Goteros Hydrogol.** Fabricados por Plásticos Rex, S.A. de C.V., son sistemas integrados con goteros de largo conducto.

Ambos sistemas están recomendados para trabajar con presiones entre 0.8 y 2 bar, pero

según se ha constatado en campo, también funcionan para presiones menores.

La variabilidad de fabricación de los goteros depende de su diseño, de los materiales utilizados para su fabricación, y del cuidado y tolerancia puestos durante todo el proceso. Se ha comprobado que con una muestra suficientemente grande de emisores (n), la distribución de sus caudales es normal; por lo tanto, esta distribución estará definida por su media y desviación estándar. Si \bar{q} es la media de todos los caudales medidos a la misma carga de presión y temperatura y σ es su desviación estándar, el coeficiente de variación de fabricación (CV) se puede definir como:

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{q}} \quad (1.1)$$

donde:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n - 1}}; \quad \bar{q} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n}$$

Estas medidas de dispersión pueden relacionarse con el gasto medio, de modo que:

- a) Aproximadamente el 68% de las observaciones están comprendidas en el entorno $\bar{q} \pm \sigma$.
- b) El 95% de las observaciones están en el intervalo $\bar{q} \pm 2\sigma$.
- c) Prácticamente todos los caudales observados se encuentran comprendidos en el intervalo $\bar{q} \pm 3\sigma$.

La distribución normal de caudales de emisores se presenta en la Figura 1-1. Bajo estas condiciones, estadísticamente puede comprobarse que alrededor del 90% de los gastos observados durante un ensayo, serán superiores a $(1 - 1.27 CV)\bar{q}$. Este valor será retomado posteriormente para el análisis de la uniformidad de emisión de la instalación.

La American Society of Agricultural Engineers (ASAE), clasifica los emisores de acuerdo con los valores de CV , según se muestra en la Tabla 1.1.

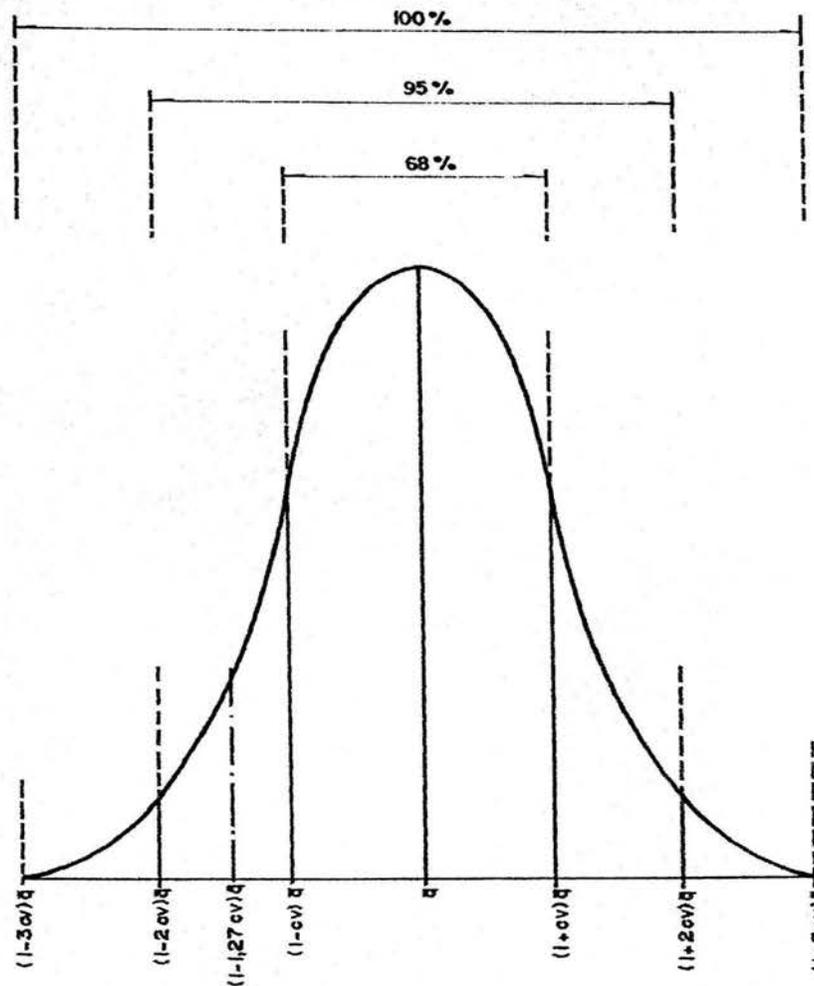


Figura 1-1: Distribución normal de caudales de emisores. Tomada de Rodrigo *et al.* [8].

Tabla 1.1: Clasificación de los emisores según la ASAE. Tomada de Rodrigo *et al.* [8].

		$CV \leq 0.05$	Excelentes
0.05	<	$CV \leq 0.07$	Normales
0.07	<	$CV \leq 0.11$	Marginales
0.11	<	$CV \leq 0.15$	Deficientes
0.15	<	CV	Inaceptables

Finalmente, puede decirse que el coeficiente CV de fabricación de los goteros es prácticamente independiente de la presión usada durante los ensayos para su evaluación. De acuerdo con esto, las desviaciones de los gastos con respecto al valor medio se conservan constantes, y el coeficiente CV depende únicamente del tipo de gotero [11].

UNIONES Y PIEZAS ESPECIALES Se trata de unidades intercaladas en la conducción. Permiten unir tubos y lograr cambios de dirección, todo según la disposición de la red de tuberías. Únicamente se exige que tengan una resistencia mínima a la presión interna igual a la del tubo al que se conectan; además de contar con los adaptadores y juntas adecuadas para su conexión.

1.2.2 DISEÑO DE UNA INSTALACIÓN DE RIEGO LOCALIZADO DE BAJA CARGA

El diseño de una instalación de riego exige la aplicación correcta de los conocimientos de la agronomía y la hidráulica, pues es el principio de una serie de actividades que tienen por finalidad la explotación racional de las tierras de cultivo.

Con el *diseño agronómico del riego*, se busca garantizar que la instalación sea capaz de suministrar las necesidades hídricas del cultivo, con una eficiencia óptima de aplicación durante el período de máximo consumo. El objetivo es determinar la cantidad de agua que una planta requiere para su sano desarrollo. Adicionalmente, se deberán establecer los tiempos de aplicación de riego en función de las necesidades totales de los cultivos.

Conocidos los datos anteriores, se está en posibilidad de realizar el *diseño hidráulico de la instalación*, mismo que dará a conocer las dimensiones óptimas de las conducciones o red de distribución de tuberías para la entrega puntual del agua.

DISEÑO AGRONÓMICO DEL RIEGO

Mientras la flora espontánea se adapta con facilidad a las condiciones del suelo y el clima que la rodean, las plantas de cultivo necesitan una serie de cuidados para poder desarrollarse. El

riego es la actividad que pretende suplir las deficiencias de humedad del suelo, con la intención de obtener un rendimiento máximo en la producción.

NECESIDAD DE REGAR Cuando se riega un suelo, el agua comienza a fluir a través de los espacios vacíos, repartiéndose con un movimiento descendente y/o lateral, quedando retenida únicamente por la acción de microporos que ejercen una fuerza de adherencia sobre la película de agua. Así, podemos definir a la *capacidad de campo* como la cantidad de agua que puede retener un suelo indefinidamente contra la acción de la gravedad.

Con el paso del tiempo, la planta consume parte del agua para la satisfacción de sus necesidades. Es muy importante señalar que a medida que va disminuyendo el agua almacenada, la planta requiere de un consumo elevado de energía metabólica para continuar succionando sus alimentos, situación que afecta negativamente a la calidad de los productos. Por lo anterior, si se desea que el cultivo esté en condiciones óptimas para poder ofrecer el máximo rendimiento económico, será necesario restituir a tiempo toda el agua que se haya consumido durante un período determinado.

SUPERFICIE Y VOLUMEN MOJADO Dependiendo de la técnica empleada para el riego, el agua suministrada produce diferentes efectos. Por ejemplo, cuando se inunda toda la parcela se provoca una saturación total del suelo, misma que a su vez produce paros vegetativos motivados por la asfixia temporal de las raíces. Con el riego por goteo el problema está resuelto, ya que siempre existe oxígeno disponible en los espacios sin inundar.

Debido a que las raíces son las encargadas de absorber los nutrientes, es necesario tomar en cuenta el cumplimiento de ciertas condiciones, como son:

- a) Una temperatura comprendida entre los 6 y 36 grados centígrados [6].
- b) Huecos o poros ocupados por agua y aire en la misma proporción.
- c) Renovación o aireación del suelo.

Cuando se riega con la técnica de goteo, el volumen mojado de tierra adopta una forma similar al de una cebolla, el cual se denomina *bulbo húmedo*. Lo anterior tiene lugar debido a

que los puntos de riego se encuentran separados a una distancia tal que no les permite solaparse, comenzando entonces el desplazamiento del agua de una manera tridimensional. Considerando que la mayoría de las raíces se desarrollan dentro del bulbo húmedo, se debe elegir un gotero que permita un máximo valor de superficie mojada. Así, puede tomarse en cuenta que la profundidad alcanzada por el agua está en función del tiempo de riego, por lo que con un mismo volumen de agua, es posible lograr una mayor superficie mojada si el caudal de entrega es grande. Por otra parte, debe recordarse que la formación de zonas de inundación es negativa, ya que se provoca una degradación del suelo. De esta manera, la elección de los emisores se debe realizar bajo la consideración de la velocidad de infiltración del agua en el suelo⁵.

Con la intención de establecer la cantidad de agua que una planta requiere para un desarrollo excelso, se han examinado las etapas o avances parciales del agua en el suelo. Se sabe que a medida que el terreno se satura, el potencial mátrico⁶ disminuye y el agua va descendiendo por gravedad, pasando por una serie de equilibrios en los que la facilidad de absorción del agua por las raíces define las características de los cultivos. Se pueden reconocer las tres etapas siguientes:

a) Cuando se satura un suelo se alcanza un porcentaje hídrico excesivo; es decir, se produce un paro vegetativo porque todos los poros del suelo están completamente llenos de agua, y en consecuencia, la ausencia de oxígeno motiva al cese de las actividades de las raíces. Sin embargo, con el riego localizado por goteo no deberán aparecer los efectos negativos de la saturación, pues mediante esta técnica únicamente se aplica un complemento de agua.

b) Existe un porcentaje hídrico óptimo en el cual, el gasto de energía por la absorción de agua es mínimo, consiguiéndose una vegetación exuberante y frutos de excelente calidad. Con el riego por goteo se busca permanecer en esta situación.

⁵ La velocidad de infiltración se refiere a la velocidad de descenso del agua a través de un suelo. Se mide generalmente en milímetros por hora.

⁶ El potencial mátrico es la fuerza de adherencia ejercida por las partículas del suelo sobre la película de agua [6].

c) Si la aplicación del riego no se realiza durante varios días, se llegará a un porcentaje hídrico deficiente que afectará al desarrollo de la vegetación y tamaño de los frutos. Inclusive, se puede llegar a estados de marchitez en los que únicamente puede prosperar la flora espontánea.

En vista de lo anterior, es necesario establecer el número de goteros y la ubicación adecuada de los mismos, de tal manera que se logre humedecer un volumen de suelo que coincida con el espacio que ocupan las raíces de las plantas que se desee irrigar. La forma y dimensión de un bulbo húmedo dependen principalmente de los siguientes factores [8]:

1) El perfil físico del suelo. Uno de los factores que afecta el movimiento del agua en un suelo es el grado de estratificación del mismo; de ahí la importancia de evaluar el perfil del suelo en la profundidad de las raíces.

2) El volumen de agua aplicado. Existe una relación estrecha entre el volumen de suelo mojado, y la cantidad de agua que se aplica sobre la superficie del mismo.

3) El gasto de emisión del gotero. Se han desarrollado modelos para estimar el flujo del agua en el suelo, a partir de una fuente puntual, y hasta que se alcanza un equilibrio en el que la zona inundada sobre la superficie permanece constante. Las Figuras 1-2 y 1-3 son resultado de un modelo matemático presentado por Bresler en 1978. En la Figura 1-2 se puede observar que el radio de la zona inundada aumenta rápidamente al inicio de las operaciones de riego, para posteriormente tender a un valor constante. Por su parte, en la Figura 1-3 se aprecian las variaciones en forma y dimensión del bulbo húmedo a medida que cambian los volúmenes de agua aplicados sobre el suelo y los gastos de emisión de los goteros.

4) La topografía del terreno. Cuando existe pendiente en el terreno, el bulbo húmedo carece de simetría con respecto a la vertical del emisor. Lo anterior tiene lugar debido a que el movimiento vertical del agua no será perpendicular con respecto a la superficie, y el movimiento horizontal del agua no ocurrirá de manera paralela a la pendiente.

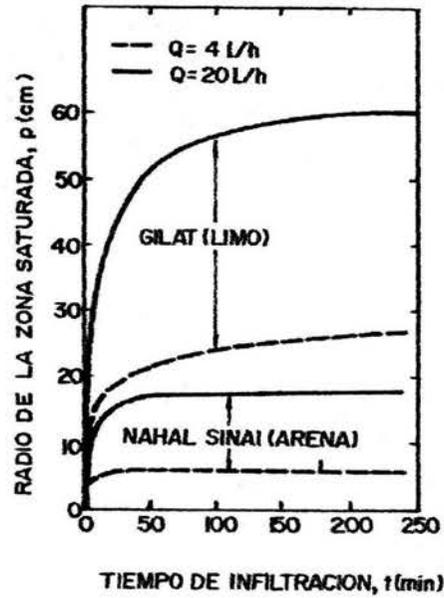


Figura 1-2: Radio de la zona saturada en función del tiempo para dos suelos y dos caudales. Tomada de Rodrigo *et al.* [8].

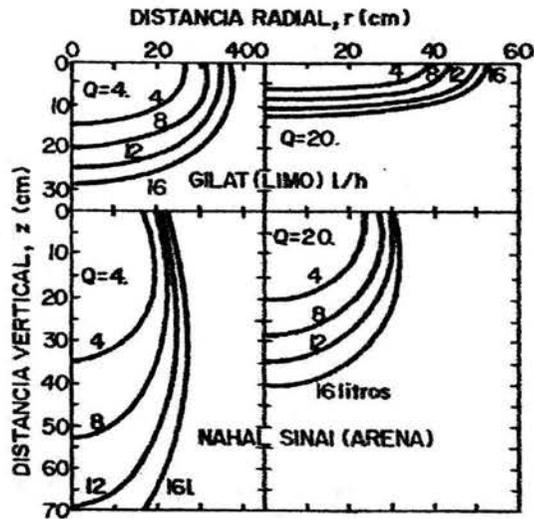


Figura 1-3: Situación del frente mojado, función del tiempo de infiltración y la infiltración acumulada en litros. Tomada de Rodrigo *et al.* [8].

Para fines de diseño, generalmente se realizan pruebas de campo, pues se desconocen los parámetros que describen al suelo y que son necesarios como datos iniciales para la aplicación de modelos matemáticos como el de Bresler. Las pruebas deben desarrollarse bajo las condiciones que imperarán en los futuros trabajos de la instalación de riego.

El primer paso es la colocación de las mangueras laterales con goteros separados a una distancia que no les permita solaparse. A continuación, cada emisor aplicará sobre el suelo la dosis de agua que se haya determinado previamente como necesaria por punto de riego o planta. Posteriormente, se abrirá una zanja en línea recta que pase por el punto en donde estuvo ubicado el gotero. Finalmente, teniendo a la vista los contornos del bulbo, se tomará lectura de la profundidad y el radio mojado, valores que corresponden al volumen de agua que se entregó al terreno.

El proceso anterior debe repetirse de modo que se simulen varios ciclos de humedecimiento del suelo, pues de esta manera las relaciones de radio-profundidad encontradas podrán considerarse como resultados confiables.

EL PROGRAMA DE RIEGO Los programas de riego tiene por finalidad el mantenimiento del porcentaje hídrico óptimo; es decir, se busca que las raíces realicen sus actividades de absorción de alimentos con el menor consumo de energía.

La programación tiene su fundamento en la correcta aplicación de un método, que mediante una serie de supuestos de las condiciones ambientales, entrega una estimación de la dosis de riego según el tipo de cultivo. Como en cualquier proceso, en el programa de trabajo se distinguen algunas actividades. En este caso se analizarán:

- 1) Primer riego. Sin tomar en consideración la cantidad de agua que pueda existir en el suelo en un momento dado, se debe calcular el tiempo necesario para que el agua de riego alcance la profundidad a la que se encuentran la mayoría de las raíces. La duración del primer riego dependerá de los resultados de las pruebas de campo que se realizaron para conocer las

características del bulbo húmedo.

2) Riegos sucesivos. Se trata de conocer el valor de las necesidades de agua reales del cultivo a partir de la *Evapotranspiración*⁷, misma que puede ser calculada con el método de Blaney-Criddle⁸, que entre otros aspectos toma en cuenta:

- El tipo de cultivo.
- Las horas de sol diarias.
- La temperatura.
- La duración del ciclo vegetativo.

En la estimación de la evapotranspiración durante un ciclo vegetativo completo, se utiliza la ecuación:

$$ETc = K_g \cdot F \quad (1.2)$$

donde:

ETc : evapotranspiración durante el ciclo vegetativo, en centímetros.

K_g : coeficiente global de desarrollo, el cual varía de 0.5 a 1.2 según el tipo de cultivo.

F : factor de temperatura y luminosidad.

El factor de temperatura y luminosidad se obtiene a partir de:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \quad (1.3)$$

$$f_i = P_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right) \quad (1.4)$$

donde:

⁷La Evapotranspiración se define como el agua consumida y transpirada por las plantas, más la que se evapora desde el suelo. Para su determinación, se parte de la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ETp), que equivale al consumo de una superficie ocupada en su totalidad por gramíneas de 8 a 15 cm de altura y sin problemas de agua [6].

⁸Los datos que se requieren para el cálculo de la evapotranspiración real se pueden obtener de los boletines hidrológicos que hagan referencia al distrito de riego al que pertenecen las tierras de cultivo analizadas.

P_i : porcentaje de horas de sol en el mes i .

T_i : temperatura media en el mes i , en $^{\circ}C$].

Cuando la zona es árida, la ecuación anterior se multiplica por un factor de corrección k_{ti} :

$$k_{ti} = 0.03114T_i + 0.2396 \quad (1.5)$$

Si se desea conocer la evapotranspiración en períodos de tiempo más cortos que el ciclo vegetativo, por ejemplo un mes, la ecuación que debe utilizarse es:

$$ETc_i = K_{ci} \cdot f_i \quad (1.6)$$

donde:

K_{ci} : coeficiente de desarrollo parcial del cultivo.

El valor que se obtenga a partir de la aplicación de las ecuaciones anteriores debe entenderse como un valor máximo, pues no considera las condiciones de humedad del suelo en un momento dado.

En la estimación de la evapotranspiración real (ET_{real}), se toma en cuenta la lluvia o precipitación efectiva (Pe), definida como la porción de la precipitación que puede estar disponible en la zona radicular. El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, propone el empleo de coeficientes (Cp), que relacionan la evapotranspiración con la precipitación observada (P) [11]. La Tabla 1.2 muestra los coeficientes de corrección para lluvia efectiva según la relación ETc/P .

Como parte de las investigaciones realizadas, se encontró que los coeficientes se pueden ajustar a la siguiente función:

$$Cp = \frac{\frac{ETc}{P}}{1.53 + 0.8\frac{ETc}{P}} \quad (1.7)$$

donde se recomienda que $ETc/P \leq 8$. Para los casos en que la relación supere un valor de 9,

Tabla 1.2: Valores del coeficiente de corrección para lluvia efectiva según la relación ET_c/P . Tomada de Vázquez *et al.* [11].

Relación ET_c/P	Valor C_p	Relación ET_c/P	Valores C_p
0.0	0.00	2.4	0.72
0.2	0.10	2.6	0.75
0.4	0.19	2.8	0.77
0.6	0.27	3.0	0.80
0.8	0.35	3.5	0.84
1.0	0.41	4.0	0.88
1.2	0.47	4.5	0.91
1.4	0.52	5.0	0.93
1.6	0.57	6.0	0.96
1.8	0.61	7.0	0.98
2.0	0.65	9.0	0.99
2.2	0.69		

se considerará un CP igual a cero.

La precipitación efectiva está dada por:

$$Pe = C_p \cdot P \quad (1.8)$$

Finalmente, la evapotranspiración real (ET_{real}) se obtiene mediante:

$$ET_{real} = ET_c - Pe \quad (1.9)$$

Como parte del análisis de las necesidades de agua reales (NA_r), también se debe tener en cuenta la eficiencia de aplicación (Ea), que es la relación entre el volumen de agua aprovechable y el volumen total entregado en parcela. De esta manera se tiene que:

$$NA_r = \frac{ET_{real}}{Ea} \quad (1.10)$$

De otra forma, para efectos de diseño se puede considerar que la necesidad de agua real es igual al valor de la evapotranspiración máxima real alcanzada durante el mes más exigido, convenientemente expresada en mm/día.

Después del cálculo de NA_r , únicamente quedan por establecerse la dosis (D) en mm, y el tiempo de riego (Tr) en horas, que respectivamente pueden conocerse con la ayuda de los modelos siguientes:

$$D = I \cdot NA_r \quad (1.11)$$

$$Tr = \frac{D \cdot A_p}{Q} \quad (1.12)$$

donde:

I : intervalo entre riegos, en días.

El intervalo entre riegos dependerá de la disponibilidad de agua local, no olvidando que las variaciones de humedad del suelo son un asunto muy delicado, pues en cada aplicación se estará entregando una cantidad de agua como un complemento para la conservación de la humedad requerida por la planta.

A_p : área por humedecer, en m^2 .

Es el área de mojado sobre la superficie. Se establece a partir del conocimiento del espacio que ocupan las raíces de la planta.

Q : gasto por emisor, en l/h.

Es el gasto promedio de todos los goteros de la instalación de riego. Es un dato de los sistemas que se presentan en este trabajo.

De manera adicional, reconociendo el hecho de que las plantas llevan a cabo sus principales funciones durante las horas de sol, se recomienda regar durante las primeras horas de la mañana o las últimas horas de la tarde, ésto con la intención de que la planta tenga de manera anticipada los requerimientos de agua que necesitará en el período de máximo consumo. Según la experiencia [6], el consumo máximo de agua ocurre entre las 11 y las 16 horas del día.

DISEÑO HIDRÁULICO DE LA INSTALACIÓN

En el diseño hidráulico eficiente de un sistema de baja carga se considera necesario el empleo de emisores de gasto pequeño, pues se desea que el suministro de agua alcance a cubrir una gran longitud de línea de plantas. Además, se debe satisfacer una uniformidad de emisión mínima

aceptable, requisito indispensable para el cumplimiento de los objetivos que se establecieron durante el diseño agronómico del riego.

En este trabajo se presenta una herramienta de diseño hidráulico óptimo de sistemas de riego por goteo de baja carga. El criterio de diseño consiste en la obtención del número óptimo de mangueras regantes o laterales una vez establecida la separación entre ellas y la separación entre goteros. Las gráficas de diseño se obtuvieron con ayuda de un código numérico para redes de tuberías, mismo que fue calibrado a partir de la información de longitudes máximas de mangueras regantes incluidas en la hoja técnica del fabricante de emisores [12]. El análisis hidráulico de las redes se estudió a partir de las ecuaciones básicas de continuidad en los nudos de cada sistema, de pérdida de energía debida a la fricción y pérdidas locales por la inserción de goteros en los laterales, y las curvas de gastos de emisión.

Capítulo 2

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y MÉTODO DE SOLUCIÓN

2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La instalación de sistemas de riego por goteo se ha desarrollado alrededor del mundo, teniendo por principal criterio de diseño la maximización del área de riego que satisface una determinada uniformidad de emisión. En México, el empleo de esta técnica es reciente, y aun puede considerarse se encuentra en etapa de experimentación. De manera general, se pueden distinguir a los equipos de riego como fijos, semifijos y móviles. Los primeros son aquellos que permiten regar una sola línea de plantas por día; mientras que los semifijos y móviles se utilizan para regar dos o más líneas de plantas respectivamente. Entonces, la elección de un equipo se realizará tras la consideración de los costos por unidad de área y los tiempos de riego que implica cada sistema.

Como parte de los proyectos impulsados por la SAGAR, en algunas regiones del país se han instalado sistemas móviles a nivel piloto experimental para el cultivo de diversos productos. Durante la experiencia en campo se observó que con el empleo de mangueras distribuidoras conectadas en "U" directamente a la base del cabezal, se puede regar una mayor área porque se

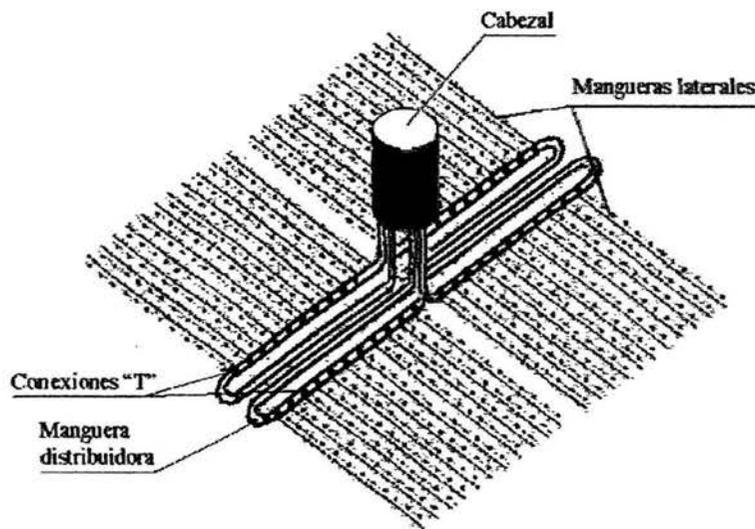


Figura 2-1: Sistema de riego por goteo de baja carga con cuatro mangueras distribuidoras en "U". Tomado de Vázquez *et al.* [12].

logra una mejor distribución de la carga hidráulica. En la Figura 2-1 se observa la disposición de los elementos que componen al sistema diseñado en el Instituto de Ingeniería.

En las investigaciones de Vázquez *et al.* (2000) se realizaron pruebas de laboratorio para la obtención de ecuaciones básicas de los gastos de emisión de goteros tipo O-Tif de colores negro y café. El resultado final de ese trabajo fue una herramienta de diseño de sistemas fijos o móviles para el riego de cultivos con carga en el cabezal de 1.5 m sobre el eje de la tubería, separaciones entre plantas de 0.3 a 0.8 m, y entre laterales de 0.5 a 3.2 m, con gastos promedio de 1.39 l/h para goteros de color negro y de 0.66 l/h para los goteros de color café.

Con la intención de dar continuidad a estos trabajos, se pensó en la posibilidad de lograr una herramienta práctica de diseño que consiste en una familia de curvas generadas a partir de un modelo adimensional que permita conocer el número óptimo de laterales de un sistema con carga de 1 a 2 m, teniendo en conocimiento previo a las separaciones entre las plantas del cultivo y la cantidad de agua que se desee suministrar por planta. De esta manera, para el

desarrollo de esta tesis se tomaron en cuenta las ecuaciones básicas de gastos de emisión de los goteros O-Tif de colores negro y café, ya conocidas por investigaciones anteriores. Además, se decidió analizar el comportamiento de algún equipo diferente que, sin ser costoso, presentara por característica un bajo gasto de emisión.

Durante los recorridos por distintos centros de distribución de sistemas de riego tecnificado, se puso de manifiesto el hecho de que en el mercado actual no existen goteros sobre línea con un gasto nominal menor a 2 l/h para 1 bar de presión, que es el gasto de los goteros O-Tif de color café. En vista de tal situación, se estudió la posibilidad de utilizar para el análisis a un sistema integrado del tipo Hydrogol y del mismo fabricante de los goteros ya estudiados. Considerando que el sistema integrado ofrece una variedad importante de diámetros de tuberías, gastos de emisión y separación entre emisores, se adquirieron dos tramos de manguera de 16 mm de diámetro exterior con goteros integrados de colores verde y blanco, que según el fabricante, entregan un gasto de 2 y 4 l/h respectivamente para 1 bar de presión.

La instalación de los equipos para el aforo de los gastos se simplificó al conectar la manguera lateral directamente a la base del cabezal. Para que la emisión de los goteros no se viera afectada por los accidentes del terreno, los trabajos se desarrollaron sobre una superficie plana. Debido a que es necesario mantener una carga constante en el cabezal durante la sesión de riego, se pensó en la adaptación de un artificio que cubriera el requisito. Sin embargo, durante los ensayos se observó que la cantidad de agua exigida por el sistema era mínima y podía controlarse de manera satisfactoria con la válvula de la toma común. Finalmente, se dejó escurrir el agua a través de las paredes del cabezal, asegurándose así el mantenimiento del nivel de superficie de agua.

Los aforos se realizaron para cargas en el cabezal dentro de un intervalo de 1 a 2 m con respecto al eje de la manguera. Se tomó lectura de los gastos de cada uno de los tres goteros que integraban a las dos tuberías Hydrogol que se adquirieron, haciendo variaciones de veinte centímetros de carga dentro del intervalo de estudio. Al concluir con los ensayos, se estuvo en la posibilidad de establecer ecuaciones que describen el funcionamiento de los goteros con respecto

a los gastos de salida, como una función de las cargas a las que se encuentren sometidos.

2.2 MODELO MATEMÁTICO

En vista de que en los riegos por goteo se necesita llevar a cabo una entrega puntual y uniforme del agua sobre la superficie de la parcela, la distribución del líquido se realiza a través de una sucesión de tubos, que unidos forman lo que se conoce como una red de tuberías. Si se desea analizar el flujo de agua dentro de una red, así como las emisiones puntuales a lo largo de las mangueras laterales de un sistema como el mostrado en la Figura 2-1, es necesario tomar en consideración las siguientes ecuaciones:

* Curvas de gastos de emisión de los goteros.

* Ecuaciones de pérdida de energía.

* Ecuaciones de continuidad que reflejen la situación de cada nudo de la red, sea de emisión o no.

2.2.1 CURVAS DE GASTOS DE EMISIÓN

La ecuación que describe el comportamiento de los goteros se acostumbra escribir como:

$$Q_j = C_j(h_j - z_j)^b \quad (2.1)$$

donde Q_j es el gasto de emisión del punto j , en l/h; C_j es un coeficiente de descarga característico del gotero empleado como emisor; h_j es la carga piezométrica, en m; z_j es la carga de posición, en m; b es un exponente de descarga menor que la unidad.

Nótese que cuanto menor sea el valor de b , la curva resultante tiende a la horizontal, lo que advierte sobre una independencia entre el caudal y la carga de presión a la entrada del emisor. Lo contrario ocurre para un exponente cercano a la unidad, pues entonces el gasto varía en la misma proporción que la carga.

De las pruebas de laboratorio realizadas a los sistemas integrados de Hydrogol de colores verde y blanco, se obtuvieron respectivamente:

$$Q = 0.5619h^{0.8187} \quad (2.2)$$

$$Q = 0.4185h^{0.9353} \quad (2.3)$$

Así mismo, las curvas cargas-gastos de las mangueras de 17 mm con goteros sobre línea del tipo O-Tif de colores café y negro son [12]:

$$Q = 0.64h^{0.51} \quad (2.4)$$

$$Q = 1.36h^{0.53} \quad (2.5)$$

De las ecuaciones anteriores se puede observar la conveniencia de haber elegido a las mangueras Hydrogol, ya que los coeficientes de las ecuaciones 2.2 y 2.3 son menores que los correspondientes a los goteros O-Tif. Por lo anterior, se pueden esperar gastos bajos de emisión, con los consecuentes aumentos de las áreas de riego.

2.2.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN

Considerando que en el movimiento de un elemento diferencial de líquido intervienen fuerzas de presión, de gravedad y cortantes, se puede establecer una ecuación en la que en cada lado de la igualdad se encuentre representada la energía por unidad de peso que tiene el líquido en una determinada sección. Aplicando la 2a Ley de Newton en la dirección del flujo de la vena líquida¹ mostrada en la Figura 2-2, se obtiene la *ecuación de la energía*, misma que muestra las relaciones entre las diferentes transformaciones de la energía mecánica del líquido [10]. Así:

¹ Si se define a un campo de flujo como cualquier región completamente ocupada por un líquido en movimiento, entonces la vena líquida es el volumen limitado por todas las líneas de corriente, que trazadas en el interior del campo de flujo, proporcionan en cada punto la dirección del vector velocidad.

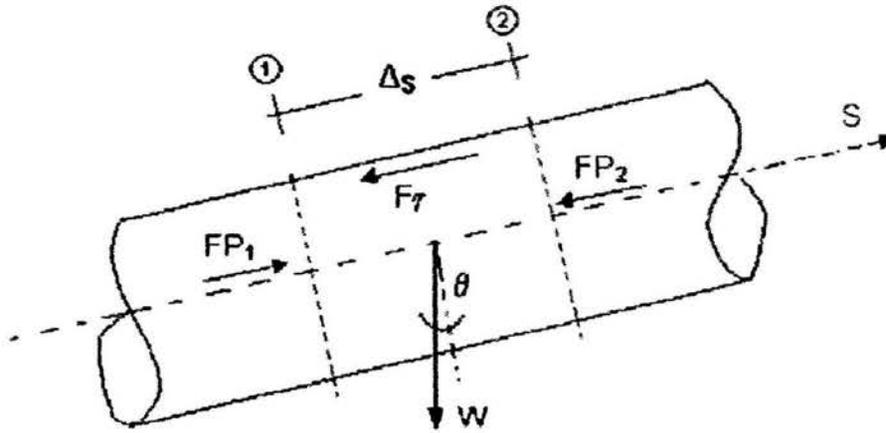


Figura 2-2: Flujo desarrollado entre dos secciones de una vena líquida.

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + \int_1^2 \frac{\tau P}{\gamma A} ds \quad (2.6)$$

donde:

z : carga de posición, que representa la energía potencial por unidad de peso, en m.

$\frac{p}{\gamma}$: carga de presión, que es la energía que corresponde al trabajo mecánico ejecutado por las fuerzas debidas a la presión por unidad de peso, en m.

$\frac{V^2}{2g}$: carga de velocidad, que debe entenderse como la energía cinética de toda la vena líquida por unidad de peso, en m.

τ : esfuerzo cortante en las paredes del conducto, en $\frac{N}{m^2}$.

P : perímetro del conducto, en m.

A : área del conducto, en m^2 .

Por último, la integral representa a la disipación de la energía por fricción en las paredes. Suele presentarse simplemente como h_f , y su unidad es m.

Cabe señalar que en la deducción de la ecuación 2.6 se han considerado las velocidades medias V_1 y V_2 como representativas de las secciones transversales a las que corresponden, ignorando así las distribuciones de velocidad que puedan existir en las secciones 1 y 2. De igual

manera, al considerar que el flujo es permanente, la aceleración local es nula, y por lo tanto, no existe carga debida al cambio local de velocidad.

El cálculo de las pérdidas de energía por fricción en estructuras largas ha sido motivo de investigaciones teórico-experimentales a través de los años. Con la intención de estudiar el comportamiento entre los flujos laminar y turbulento en tubos, en 1883 Osborne Reynolds efectuó una serie de experimentos en los que introducía un hilo de tinta en un flujo para poder observar la transición y la turbulencia². Posteriormente, propuso un parámetro adimensional para agrupar sus observaciones, mismo que hoy se denomina número de Reynolds (Re), y se expresa como:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.7)$$

donde V es la velocidad media, en $\frac{m}{s}$; D es el diámetro del conducto, en m; ν es la viscosidad cinemática del líquido, en $\frac{m^2}{s}$.

Por otro lado, si el esfuerzo cortante se relaciona con las propiedades del fluido, las condiciones del flujo y las características del conducto, entonces existe la siguiente relación [14]:

$$\tau = F(\rho, V, \mu, D, \varepsilon) \quad (2.8)$$

donde ρ es la densidad del líquido, en $\frac{kg}{m^3}$; μ es la viscosidad dinámica, en $\frac{N \cdot s}{m^2}$; ε es la altura de rugosidad en la pared, en m. Mediante un análisis dimensional se obtendrá:

$$\frac{8\tau}{\rho V^2} = f = F(Re, \frac{\varepsilon}{D}) \quad (2.9)$$

El parámetro adimensional f se denomina coeficiente de fricción de Darcy, en honor a Henry Darcy (1803-1858), ingeniero francés cuyos trabajos de 1857 sobre flujo en tubos expusieron por primera vez el efecto de la rugosidad en la fricción.

²Un flujo se define como laminar cuando las líneas de corriente no se juntan entre sí en toda su longitud. En caso de que la condición anterior no se cumpla, el flujo es turbulento [5].

Al retomar el último término de la ecuación 2.6 y combinarlo con la 2.9, se obtiene una expresión adecuada para el cálculo de las pérdidas de energía por fricción:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (2.10)$$

Esta es la ecuación de Darcy-Weisbach, y es válida para flujos laminares y turbulentos en conductos de sección transversal arbitraria. Fue propuesta por el profesor alemán Julius Weisbach en 1850.

Sabiendo que el gasto (Q) que fluye a través de una sección puede expresarse como el producto de la velocidad media del fluido en dicha sección por el área de ésta, la ecuación 2.10 para conductos circulares resulta ser:

$$h_f = \left(\frac{fL}{12.1D^5} \right) Q^2 \quad (2.11)$$

De la relación 2.9 se observa que el coeficiente f está en función del número de Reynolds (Re), y de la rugosidad relativa ($\frac{\epsilon}{D}$). Esta situación ha provocado que a través de los años se hayan realizado numerosas investigaciones para determinar la relación existente entre estos parámetros. Con base en la experiencia, se ha podido concluir que [10]:

a) Es válida la relación general:

$$f = F\left(Re, \frac{\epsilon}{D}\right)$$

b) En un flujo laminar ($Re < 2300$), f depende únicamente del número de Reynolds.

c) A partir de $Re = 2300$ se inicia una zona en la que no es posible establecer una ley de variación que permita conocer con seguridad el valor de f .

d) Existe una zona de turbulencia moderada en la que f depende, tanto de Re como de $\frac{\epsilon}{D}$.

e) La zona de franca turbulencia se inicia para valores altos de Re . A partir de entonces, el flujo es dominado exclusivamente por la rugosidad; es decir, f es función únicamente de $\frac{\epsilon}{D}$.

A manera de resumen, en 1944 L. F. Moody preparó un diagrama que lleva su nombre, y

que sirve para determinar el coeficiente de fricción f en tuberías con rugosidades típicas que transportan cualquier líquido.

Debido a que durante el análisis de los sistemas estudiados en este trabajo se consideró a la disipación de la energía por la fricción del agua con las paredes, fue necesario el empleo de la ecuación de Darcy-Weisbach con sus correspondientes valores de coeficientes de fricción. Cabe aclarar que para el cálculo de los Re se utilizó una viscosidad cinemática igual a $1 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$, valor que corresponde a una temperatura del agua de $20^\circ C$ y a la presión atmosférica al nivel del mar [10].

FLUJO LAMINAR Para el caso de un flujo laminar, se utilizó la ecuación obtenida por J. L. Poiseuille, quien en virtud de sus trabajos experimentales, en 1846 pudo determinar el coeficiente de fricción como una función del número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.12)$$

La ley de resistencia anterior ha sido comprobada con los resultados experimentales de diferentes investigadores [10].

ZONA CRÍTICA Para la zona crítica, entendida como la zona en la cual el valor del número de Reynolds oscila entre 2300 y 3000, se empleó un coeficiente f con valor de 0.04, que es el máximo valor para flujo turbulento en una tubería lisa [12].

FLUJO TURBULENTO Para el año de 1913, H. Blasius llegó a la conclusión de que existen dos tipos de fricción para el flujo turbulento en tubos. El primero de ellos se refiere al flujo en tuberías lisas donde el coeficiente de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds. El segundo tipo se refiere a tubos rugosos en donde el flujo queda supeditado a la viscosidad del líquido y a la rugosidad del conducto [10].

Para tubos lisos, Blasius formuló la siguiente expresión:

$$f = \frac{0.3164}{\text{Re}^{0.25}} \quad (2.13)$$

En el año de 1989, R. D. von Bernut y T. Wilson llevaron a cabo una serie de experimentos que presentaron como parte de su investigación relacionada con el coeficiente de fricción en tuberías de plástico de diámetro pequeño. Encontraron que [1]:

$$f = \frac{c}{\text{Re}^{0.25}} \quad (2.14)$$

donde c es un coeficiente que varía entre 0.281 y 0.345.

Con la misma intención, Bagarello *et al.* (1995) realizaron un estudio experimental con tubos de polietileno de 16, 20 y 25 mm de diámetro nominal. Como resultado de su trabajo, establecieron una ley de variación de f en la cual están consideradas amplias variaciones de la temperatura (10-50°C) y flujo del agua (86-1264 l/h). Así:

$$f = \frac{0.302}{\text{Re}^{0.25}} \quad (2.15)$$

En los resultados de la investigación que hace referencia a esta ecuación, se encontró que el porcentaje de error entre las pérdidas de energía experimentales y las calculadas a partir de 2.15 y 2.10, fueron menores al 10%.

Para el cálculo de las pérdida de energía por fricción en las paredes de las tuberías que conforman las redes analizadas en esta tesis, la ecuación 2.15 fue utilizada siempre que el número de Reynolds superó un valor de 3000.

PÉRDIDAS DE ENERGÍA LOCALES

Las pérdidas de energía locales que ocurren a lo largo de un sistema de riego por goteo se deben a la obstrucción al flujo que provoca cada uno de los empalmes de los goteros que fueron insertados sobre las mangueras laterales. Lo anterior se ilustra en la Figura 2-3.

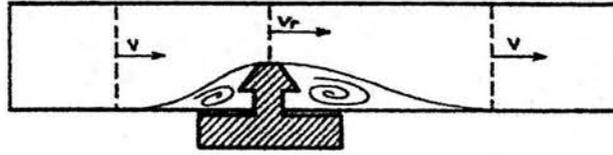


Figura 2-3: Obstrucción al flujo provocado por el empalme de un gotero insertado sobre una manguera lateral. Tomado de Bagarello *et al.* [2].

La pérdida local (Δh) es expresada frecuentemente como una fracción (α) de la carga de velocidad aguas arriba o aguas abajo del sitio donde se produjo la pérdida; por lo tanto, la ecuación de pérdida local se escribe como:

$$\Delta h = \alpha \frac{V^2}{2g} \quad (2.16)$$

Bagarello *et al.* (1997) evaluaron experimentalmente las pérdidas locales ocurridas en sistemas sobre línea de 16 y 20 mm de diámetro nominal con seis diferentes tipos de goteros. Para el caso de las mangueras de 16 mm, los goteros se conectaron en dos diferentes posiciones respecto a su profundidad de penetración en la tubería. El comportamiento de los sistemas se investigó dentro de un intervalo amplio del número de Reynolds. Al mismo tiempo, la pérdida de energía en toda la instalación fue calculada haciendo una distinción entre los efectos que produjo la fricción y la obstrucción presentada por los goteros.

Atendiendo al principio de superposición de efectos, se consideró que la pérdida total de carga local era la suma de las pérdidas de carga ocurridas en la ubicación de los emisores. Como en la investigación se utilizaron diferentes tipos de goteros, para cada evento se encontró un valor α_i que correspondía a la instalación y su funcionamiento. Para ello se empleó la ecuación 2.16.

Por cada sistema de tubería, gotero y gasto, se formaron parejas ordenadas (Re, α_i) que se representaron gráficamente para su estudio. Se observó entonces una cierta independencia entre estos parámetros, situación que advirtió sobre la posibilidad de que cada sistema analizado

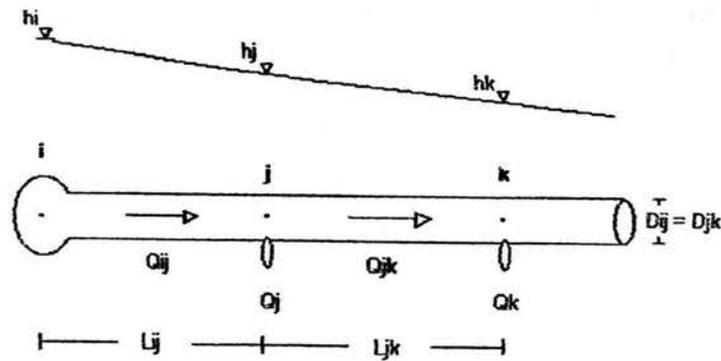


Figura 2-4: Flujo en una manguera lateral con emisores. Tomada de Vázquez *et al.* [11].

podría quedar referido únicamente con el valor de la mediana de los coeficientes α encontrados.

Considerando como valiosa la aportación de los resultados que se obtuvieron en la investigación de Bagarello *et al.* (1997), para este trabajo de tesis se adoptó un valor α de 0.6 porque éste corresponde al de un gotero de inserción poco penetrante, como el O-Tif. Por su parte, para los emisores de los sistemas integrados de Hydrogol se eligió también el valor de 0.6 porque este número se acerca al valor medio de los coeficientes α encontrados en la investigación ya mencionada, además de que no se conocen valores propios para estos equipos de riego.

ECUACIÓN DE PÉRDIDA DE CARGA TOTAL

El flujo que circula a través de una manguera lateral que tiene emisiones puntuales separadas por una cierta distancia se ilustra en la Figura 2-4.

La ecuación de Darcy-Weisbach entre dos puntos separados por una distancia en un conducto circular es:

$$h_i - h_j = \frac{f L_{ij}}{12.1 D_{ij}^5} |Q_{ij}| Q_{ij} \quad (2.17)$$

que de acuerdo con la Figura 2-4:

h_i : carga piezométrica en el punto i , en m.

h_j : carga piezométrica en el punto j , en m.

f : coeficiente de fricción, adimensional.

L_{ij} : separación entre los puntos i, j . Unidades en m.

D_{ij} : diámetro de la tubería lateral, en m.

Q_{ij} : gasto que fluye entre los puntos i, j . Unidades en $\frac{m^3}{s}$.

De igual manera, la ecuación de pérdida de energía local debida a la presencia de un gotero en el punto j puede expresarse como función del gasto aguas arriba, entonces:

$$\Delta h_j = \frac{\alpha}{12.1 D_{ij}^4} |Q_{ij}| Q_{ij} \quad (2.18)$$

donde Δh_j es la pérdida de carga localizada en j , en m; α es el coeficiente adimensional de pérdida local ocasionada por un emisor.

Así, la de pérdida de carga total entre los puntos i, j se obtiene a partir de:

$$h_i - h_j = \frac{f L_{ij}}{12.1 D_{ij}^5} |Q_{ij}| Q_{ij} + \frac{\alpha}{12.1 D_{ij}^4} |Q_{ij}| Q_{ij} \quad (2.19)$$

2.2.3 CONTINUIDAD EN LOS NUDOS DE LA RED

Como se mencionó anteriormente, si se desea conocer el funcionamiento hidráulico de una red de tuberías para utilizarse en el riego por goteo, es necesario establecer la continuidad en ciertos puntos o nudos del sistema. Mediante una inspección visual crítica de la Figura 2-1, se concluye que existen cinco modalidades de nudos que definen a la red, siendo estos:

- a) Nudo de emisión ubicado sobre la longitud de la manguera lateral o regante.
- b) Nudo de emisión en el extremo final de la manguera lateral.
- c) Nudo en la conexión de la manguera distribuidora con un lateral.
- d) Nudo extremo de la conexión entre mangueras distribuidora y último lateral.
- e) Nudo contiguo a una condición de frontera.

Apoyado en el principio de conservación de la masa que entra en un volumen de forma

y magnitud constante, y considerando que el flujo es permanente e incompresible, es posible establecer la invariabilidad del gasto en cualquier sección transversal al flujo dentro del volumen que se estudie. Por lo tanto, en cada nudo se satisface la ecuación de continuidad siguiente:

$$\sum Q = 0 \quad (2.20)$$

o bien,

$$\sum Q_{ij} + Q_j = 0 \quad (2.21)$$

donde:

Q_{ij} : gasto que va del nudo i al nudo j , con la convención de que el gasto será negativo si llega al nudo j , y positivo si sale de él. Sus unidades son $\frac{m^3}{s}$.

Q_j : gasto que sale del nudo j , con la misma convención del signo. Unidades en $\frac{m^3}{s}$.

El operador \sum alerta sobre la necesidad de considerar en el cálculo a todos los nudos i conectados al j a través de un tubo.

ECUACIÓN FUNDAMENTAL EN LA MANGUERA LATERAL

A partir de la ecuación 2.19 se puede obtener de forma implícita el gasto Q_{ij} si:

$$Q_{ij} = \frac{h_i - h_j}{B_{ij} |Q_{ij}|} \quad (2.22)$$

donde B_{ij} es una constante con valor de:

$$B_{ij} = \frac{fL_{ij}}{12.1D_{ij}^5} + \frac{\alpha}{12.1D_{ij}^4} \quad (2.23)$$

La ecuación de continuidad en cualquier nudo j de emisión puede expresarse de manera implícita como:

$$-\frac{h_i - h_j}{B_{ij} |Q_{ij}|} + \frac{h_j - h_k}{B_{jk} |Q_{jk}|} + \frac{C_j}{(1000)(3600)} (h_j - z_j)^b = 0 \quad (2.24)$$

Por motivos del método de solución, es necesario que las ecuaciones de continuidad se presenten a manera de polinomios en los que las cargas piezométricas actúen como variables. Al ordenar la ecuación anterior se obtiene:

$$-\frac{1}{B_{ij}|Q_{ij}|}h_i + \left[\frac{1}{B_{ij}|Q_{ij}|} + \frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|} \right] h_j - \frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|}h_k = -\frac{C_j}{(1000)(3600)}(h_j - z_j)^b \quad (2.25)$$

En esta ecuación se ha dividido a la constante C_j por 3.6×10^6 . Esto se hace con la intención de convertir el gasto de la ecuación 2.1 a $\frac{m^3}{s}$.

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD EN EL NUDO FINAL DE LA MANGUERA LATERAL

Suponiendo que los puntos j, k fueran los nudos de emisión extremos de la manguera lateral, la ecuación de continuidad para el nudo k sería:

$$-\frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|}h_j + \frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|}h_k = -\frac{C_k}{(1000)(3600)}(h_k - z_k)^b \quad (2.26)$$

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD EN UN NUDO DE CONEXIÓN DE LA MANGUERA DISTRIBUIDORA CON UN LATERAL

Las condiciones existentes en los puntos de unión entre las mangueras se muestran en la Figura 2-5. La continuidad en la conexión se establece al considerar la existencia de dos nudos opuestos al i , separados por una distancia $L_{mi} = L_{in}$ medida sobre la manguera distribuidora, además del nudo j de emisión instalado sobre la manguera lateral.

La ecuación de continuidad en el nudo i se escribe:

$$-\frac{1}{B_{mi}|Q_{mi}|}h_m + \left[\frac{1}{B_{mi}|Q_{mi}|} + \frac{1}{B_{ij}|Q_{ij}|} + \frac{1}{B_{in}|Q_{in}|} \right] h_i - \frac{1}{B_{ij}|Q_{ij}|}h_j - \frac{1}{B_{in}|Q_{in}|}h_n = 0 \quad (2.27)$$

donde B_{mi} y B_{in} son constantes que valen:

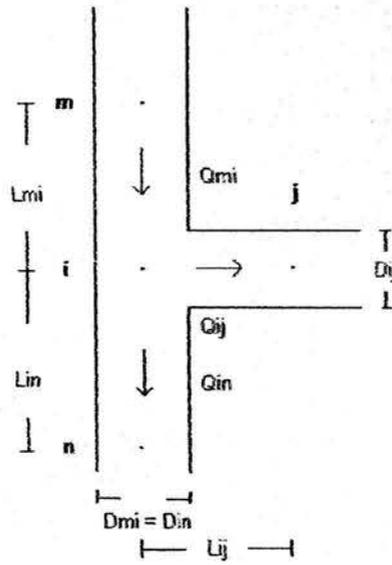


Figura 2-5: Conexión de la manguera distribuidora con un lateral. Tomada de Vázquez *et al.* [11].

$$B_{mi} = \frac{fL_{mi}}{12.1D_{mi}^5}; \quad B_{in} = \frac{fL_{in}}{12.1D_{in}^5}$$

Adviértase que en estas constantes no aparece el término que representa a la pérdida de carga local, pues no existen emisores conectados a la manguera distribuidora. Además, se ha visto que las pérdidas de carga por la existencia de conexiones “T” para sistemas como el que se estudia son mínimas.

La ecuación 2.27 también es útil para establecer la continuidad en el nudo extremo de la conexión entre la distribuidora y el último lateral, pues únicamente deberá considerarse que el nudo n es el cabezal y la distancia L_{in} es aquella que une al nudo i con la base del tanque de alimentación de la red a través de la manguera distribuidora en “U”.

ECUACIÓN DE CONTINUIDAD EN UN NUDO CONTIGUO A UNA CONDICIÓN DE FRONTERA

Si el nudo m sobre la manguera distribuidora fuera una condición de frontera con carga piezométrica conocida y constante, esto es, que fuera el cabezal, la ecuación de continuidad en el nudo i contiguo sería:

$$\left[\frac{1}{B_{mi} |Q_{mi}|} + \frac{1}{B_{ij} |Q_{ij}|} + \frac{1}{B_{in} |Q_{in}|} \right] h_i - \frac{1}{B_{ij} |Q_{ij}|} h_j - \frac{1}{B_{in} |Q_{in}|} h_n = \frac{1}{B_{mi} |Q_{mi}|} h_m \quad (2.28)$$

2.3 SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Con el establecimiento de la continuidad en todos los nudos de la red, se presenta la posibilidad de plantear un sistema de tantas ecuaciones como nudos existentes, donde las incógnitas sean las cargas piezométricas en los nudos. El sistema así encontrado será implícito, por lo que es necesario suponer de inicio las cargas piezométricas en cada nudo, partiendo del valor conocido en el cabezal, y tomando valores decrecientes según el sentido del flujo. Los gastos en cada tramo de las mangueras se pueden calcular con la ecuación 2.17 expresada como:

$$Q_{ij} = \frac{h_i - h_j}{|h_i - h_j|} \sqrt{\frac{|h_i - h_j|}{\frac{f L_{ij}}{12.1 D_{ij}^5}}} \quad (2.29)$$

En la ecuación anterior se debe tener cuidado de utilizar las distancias y diámetros adecuados según el tipo de manguera de que se trate. En lo que se refiere al signo del gasto, éste queda determinado por la diferencia de cargas h en los puntos i, j analizados.

La solución de la red de tuberías se obtiene mediante un proceso iterativo, pues es necesario resolver en varias ocasiones el sistema de ecuaciones de continuidad en los nudos, hasta que las cargas piezométricas se repitan dentro de un margen de tolerancia. Sin embargo, antes de

comenzar debe tomarse en cuenta que el sistema de ecuaciones encontrado no es lineal, ya que las ecuaciones 2.25 y 2.26 incluyen un término elevado a un exponente b diferente de la unidad.

Para solucionar el problema se adoptó un artificio de linealización que consiste en multiplicar a todas las ecuaciones de continuidad en los nudos emisores por $\frac{h}{h_a}$, que es la unidad expresada como el cociente de la carga piezométrica en el punto de emisión. Por este medio se generan los términos $(h_j)_a^{1-b}$ y $(h_k)_a^{1-b}$, donde $(h_j)_a, (h_k)_a$ son los valores de las cargas piezométricas en los nudos j, k en la iteración anterior a la del cálculo de la solución de la red, de modo que para la última iteración los valores de las cargas en los nudos son iguales o muy aproximados, logrando que dichas cargas queden elevadas al exponente b , como lo marca la ecuación 2.1. De esta manera, las ecuaciones fundamental y de continuidad en el nudo final de la manguera lateral son respectivamente:

$$-\frac{1}{B_{ij}|Q_{ij}|}h_i + \left[\frac{1}{B_{ij}|Q_{ij}|} + \frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|} + \frac{C_j}{(1000)(3600)(h_j)_a^{1-b}} \right] h_j - \frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|}h_k = 0 \quad (2.30)$$

$$-\frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|}h_j + \left[\frac{1}{B_{jk}|Q_{jk}|} + \frac{C_k}{(1000)(3600)(h_k)_a^{1-b}} \right] h_k = 0 \quad (2.31)$$

Dado que los diseños propuestos en este trabajo corresponden a los de un terreno plano, en las ecuaciones anteriores ya se considera que la carga de posición z es cero.

Vázquez *et al.* (2002) desarrollaron un programa en lenguaje FORTRAN para solucionar el sistema de ecuaciones de continuidad en los nudos de una red de tuberías. La solución del sistema se lleva a cabo con el método exacto de Crout, requiriéndose un mínimo de 6 iteraciones para aproximarse a la solución de la red [11]. Así fue que se utilizó este programa para la simulación de funcionamiento hidráulico de redes, en las que proponiendo una carga en el cabezal, la separación entre mangueras laterales, y el número de emisores y sus separaciones, se calculan las cargas en los nudos y los gastos de emisión de los goteros. Además, se obtiene el valor de la uniformidad de emisión del agua correspondiente a la red propuesta.

La uniformidad de emisión en una instalación depende de varios factores, como son [8]:

- Obturaciones.
- Coeficiente de variación de fabricación del emisor.
- Exponente de descarga del emisor.
- Sensibilidad de emisión a la temperatura.
- Variación de la carga en el sistema.

Si se considera que el problema inherente a las obturaciones se puede controlar, y que los efectos de la temperatura no influyen de manera negativa en la variación de los gastos debido a la corta longitud de los laterales, quedan como más importantes causas de variación del caudal, la variabilidad de fabricación del emisor y las diferencias de presión. Entonces, se puede definir a la uniformidad de emisión para un sistema con un solo gotero por planta como:

$$EU = [1 - 1.27CV] \frac{Q_{\min}}{Q} \quad (2.32)$$

donde EU es la uniformidad de emisión; CV el coeficiente de variación de fabricación del gotero; Q_{\min} el menor de los gastos de emisión de la red propuesta, en l/h; Q el gasto promedio de todos los goteros instalados en la red, en l/h. Dado que se desconoce el CV del fabricante, se utilizó el valor estadístico resultante de los gastos obtenidos durante el proceso de simulación con el programa de computadora.

El primer factor del lado derecho de la ecuación 2.32 se obtiene como el cociente de dos gastos. Uno es la cota inferior del intervalo de gastos que comprende al 90% de las emisiones de una distribución normal de caudales. El otro es el gasto promedio que se estaría aplicando en cada planta. En la última parte de la ecuación, se considera a la variación del gasto por la modificación de la carga en el sistema de tuberías. Aquí se aplica un criterio estricto al comparar el valor mínimo con respecto a la media de los gastos, ya que con el mejoramiento en las técnicas de manejo de riegos, preocupan más las plantas que puedan recibir menor cantidad de agua.

Capítulo 3

RESULTADOS

Como se mencionó anteriormente, el código numérico para el diseño de sistemas de riego en "U" (DISURT.EXE), da solución al sistema de ecuaciones de continuidad en los nudos de una red de tuberías propuesta. En el sistema de riego por goteo de baja carga (ver figura 2-1), cierta cantidad de mangueras regantes o laterales están unidas a una manguera distribuidora que se conecta a la base del cabezal mediante dos perforaciones, una para cada extremo de esta tubería. Así, el cabezal puede abastecer de agua hasta cuatro mangueras distribuidoras independientes con las mismas características y dimensiones, y por lo tanto, es necesario que el programa de computadora resuelva únicamente la red generada a partir de una sola distribuidora.

Las características de la red por analizar se entregan al programa a manera de listado. Los datos necesarios son:

* Carga en el cabezal (HF). Altura del nivel de la superficie del agua con respecto al eje de la tubería ubicada sobre el nivel del terreno. Se analizaron redes con cargas de 1, 1.5 y 2 m.

* Número de laterales (NL). Cantidad de mangueras regantes o laterales conectadas a cada manguera distribuidora.

* Número de emisores por lateral (NE). Es el número de goteros insertados a lo largo de cada manguera lateral.

* Separación entre emisores (Dx). Es la distancia constante que separa a los goteros. En el análisis de redes se manejaron distancias de 0.3, 0.5 y 0.8 m.

* Separación entre laterales (SL). Distancia entre mangueras laterales. En los sistemas

analizados se manejó un intervalo de separación de 0.5 a 3.2 m.

* Diámetro de la manguera distribuidora (DS). Es el diámetro interno de una manguera lisa de polietileno de 20 mm de diámetro nominal. En los cálculos numéricos se utilizó un valor de 0.0166 m.

* Diámetro de las mangueras laterales (DL). Es el diámetro interno de las mangueras regantes. En los diseños propuestos se debe elegir entre una manguera lisa de 17 mm de diámetro nominal o un sistema integrado de diámetro nominal de 16 mm. Para el cálculo numérico se utilizó un diámetro interno de 0.0136 m.

* Coeficiente de pérdida por fricción de Darcy-Weisbach (F). Al ser un dato necesario para el cálculo de los gastos iniciales entre los tramos de la red propuesta, este coeficiente se igualó a 0.03. Este valor cambia durante el proceso de solución, dependiendo del número de Reynolds según las ecuaciones 2.12 y 2.15.

* Coeficiente de pérdida local en los emisores (ALFA). Coeficiente adimensional con valor de 0.6.

* Coeficiente de descarga de los emisores (CK). Es el coeficiente de la curva de gasto del gotero empleado en el sistema por analizar, tal y como aparece en la ecuación 2.1.

* Exponente de descarga de los emisores (BE). Valor que actúa como exponente de la carga en cada una de las curvas cargas-gastos de los emisores estudiados (ver ecuación 2.1).

* Costos de los componentes del sistema.

* Número de iteraciones en la solución del sistema de ecuaciones (Z). Se ha visto que una solución muy aproximada de la red de tuberías se alcanza a partir de la sexta iteración.

3.1 SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO

El presente estudio se realizó para tuberías regantes con *goteros* de cuatro tipos, trabajando en un intervalo de carga de 1 a 2 m. Los intervalos de gasto para estos sistemas de baja carga se muestran a continuación:

- a) Gotero O-Tif negro (1.1 a 1.6 l/h)
- b) Gotero O-Tif café (0.5 a 0.7 l/h)

- c) Gotero Hydrogol verde (0.4 a 0.8 l/h)
- d) Gotero Hydrogol blanco (0.3 a 0.6 l/h)

Para mantener un orden en la secuencia del desarrollo de este trabajo, el funcionamiento de cada uno de los goteros se estudió de manera totalmente independiente, y en el orden citado anteriormente. La metodología que permitió determinar las características geométricas de las redes para riego con el apoyo del código numérico se explica a continuación:

1) Debido a que se desea un dimensionamiento óptimo¹, se comienza con la búsqueda de la longitud máxima de lateral de goteo de una red que tenga una separación entre laterales del orden de 3 m. Con una carga fija en el cabezal de 1 m y una separación constante entre emisores de 0.3 m, únicamente se necesita proponer una pareja de valores (NL,NE), para que a partir de ellos se inicie con la solución de la red así definida. El programa de computadora resuelve el sistema de ecuaciones con el método de Crout y se detiene hasta concluir la sexta iteración, momento en el cual se despliega en pantalla un cuadro de resultados.

2) En el cuadro de resultados aparecen valores significativos como son la magnitud del área de riego, los gastos de emisión por gotero, las longitudes de las mangueras, y la uniformidad de emisión alcanzada. Si la uniformidad de emisión no es igual a 0.90, se aumentará o disminuirá el número de emisores según convenga. Una vez hecho esto, se volverá a correr el programa esperando nuevos resultados.

3) Cuando se obtenga la uniformidad deseada, se registrará el número de laterales y número de emisores en una bitácora, pues será necesario comprobar que efectivamente se ha encontrado la longitud máxima de lateral de goteo. Para comprobarlo, se probarán nuevos diseños en los que se haya modificado la geometría de la red como resultado del cambio de las parejas (NL,NE).

¹Para efectos de esta tesis, el dimensionamiento óptimo implica que el área por regar es máxima para una uniformidad de emisión de 0.90.

4) Una vez que se haya encontrado a la pareja de valores de NL y NE que genera a una red de tuberías de máxima área con alta uniformidad de emisión, se habrá diseñado entonces un sistema de riego cuyo dimensionamiento es óptimo. Inmediatamente después, se comenzará con la búsqueda de un nuevo sistema de área máxima con uniformidad de riego de 0.90. Este diferirá del anterior únicamente en la cantidad y separación de sus laterales, pues corresponderá con el par (NL+1,NE).

5) El paso 4 de esta metodología deberá repetirse tantas veces como sea necesario, hasta cubrir el intervalo de separación entre laterales de interés para esta tesis.

6) Al concluir con la secuencia de actividades anterior, se contará con la información necesaria respecto a la disposición de los elementos de varios equipos de riego con una carga de agua fija y una separación entre emisores constante. Por lo tanto, será necesario repetir todo el proceso manteniendo constantes los datos de la curva de gasto y la carga en el cabezal, pero variando la separación entre emisores; es decir, se analizarán nuevos sistemas de tuberías con separación entre emisores de 0.5 y 0.8 m.

Finalmente, dado que se desea conocer la geometría de los sistemas de riego para cargas en el cabezal de 1, 1.5 y 2 m, la metodología descrita debe seguirse en tres ocasiones para cada uno de los cuatro sistemas regantes que difieren en el gotero empleado como emisor.

En el Apéndice A se presentan tablas con la información necesaria para describir las características de las redes de tuberías de los sistemas encontrados. Cada tabla muestra las cantidades requeridas de laterales y emisores para formar sistemas de riego óptimos con una manguera distribuidora, diseños que dependen de las separaciones entre plantas y de la carga en el cabezal instaladas en parcela. Con la intención de resaltar el hecho de que el número de laterales encontrado para cada sistema es óptimo, la variable que los representa es N_{op} . Se hace énfasis en señalar que el intervalo de separación entre laterales no pudo cubrirse en su plenitud para los equipos con goteros café, verde y blanco, con carga de 1 m en el cabezal. Esta situación se presentó porque la presión propuesta en el cabezal resultó insuficiente para los requerimientos

de carga de los goteros más alejados de un sistema con gran cantidad de mangueras laterales de longitud máxima.

3.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS MEDIANTE MODELOS ADIMENSIONALES

3.2.1 OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS ADIMENSIONALES

El análisis dimensional es un método que permite reducir el número y complejidad de las variables que intervienen en la descripción de un fenómeno físico. Así, si un fenómeno depende de n variables físicas dimensionales, el análisis dimensional reduce el problema a k grupos adimensionales de variables (parámetros adimensionales). Generalmente $n-k$ es igual al número de dimensiones fundamentales que aparecen en el problema. En el estudio de la Hidráulica, las dimensiones que comúnmente se toman como fundamentales son masa, longitud y tiempo [MLT].

Un aspecto favorable del análisis dimensional consiste en la ayuda que ofrece durante la planificación de un experimento, sugiriendo formas adimensionales de las ecuaciones que describen el comportamiento del fenómeno. Por otra parte, durante el proceso de adimensionalización se presenta la posibilidad de separar las variables que deben ser consideradas de aquellas que conviene descartar. Finalmente, al contar con modelos matemáticos que están en función únicamente de parámetros adimensionales, por semejanza, es posible generalizar los resultados de manera muy satisfactoria.

Una manera de obtener los parámetros adimensionales comienza con la identificación de todas las variables que intervienen en el desarrollo del fenómeno en cuestión, para después aplicar el teorema π o de Buckingham. El procedimiento consiste en elegir un número bien determinado de variables repetitivas de entre las consideradas y combinarlas con las restantes para obtener mediante un sistema de $n-k$ ecuaciones los exponentes de cada variable que forma

parte del grupo adimensional [14].

Para el caso del diseño de sistemas de riego por goteo de áreas máximas en estudio, son 6 las variables que determinan su estructura. Las dimensiones que se consideraron para el análisis dimensional se listan a continuación:

Variable	Símbolo	Dimensiones
Longitud máxima de lateral de goteo	Lmax	L
Separación entre emisores	Dx	L
Separación entre laterales	SL	L
Gasto promedio en el sistema	Q	L ³ T ⁻¹
Aceleración de la gravedad	g	LT ⁻²
Número óptimo de laterales	N _{op}	

El problema puede plantearse mediante una función F, a saber:

$$F(L \text{ max}, Dx, SL, Q, g, N_{op}) = 0 \quad (3.1)$$

Como puede observarse, el análisis dimensional involucra seis variables físicas en términos de sólo dos dimensiones fundamentales, por lo que hay cuatro parámetros adimensionales, siendo N_{op} uno de ellos, por ser adimensional.

Al elegir como variables repetitivas Dx y g, éstas intervienen en los 4 parámetros, resultando entonces:

$$\text{Número de emisores por lateral: } \pi_1 = \frac{L \text{ max}}{Dx} \quad (3.2)$$

$$\text{Relación de área: } \pi_2 = \frac{SL}{Dx} \quad (3.3)$$

$$\text{Gasto adimensionalizado: } \pi_3 = \frac{Q}{Dx^{5/2}g^{1/2}} \quad (3.4)$$

$$\text{Número óptimo de laterales: } \pi_4 = N_{op} \quad (3.5)$$

Por lo que existe la relación:

$$F_2 \left(\frac{L \max}{Dx}, \frac{SL}{Dx}, \frac{Q}{Dx^{5/2}g^{1/2}}, N_{op} \right) = 0 \quad (3.6)$$

o bien,

$$N_{op} = F_3 \left(\frac{L \max}{Dx}, \frac{SL}{Dx}, \frac{Q}{Dx^{5/2}g^{1/2}} \right) \quad (3.7)$$

Debido a que la variable Q representa al valor promedio de los gastos emitidos por los goteros instalados en un sistema de riego, el valor de Q mantiene una relación muy estrecha con las separaciones entre las mangueras laterales y el espaciamiento entre emisores, por lo que resulta conveniente considerar esta relación mediante un solo parámetro adimensional, mismo que resulta de combinar los parámetros definidos por π_2 y π_3 de la siguiente manera:

$$\pi_5 = (\pi_2)^{-5/2} (\pi_3) \quad (3.8)$$

Finalmente resulta que la cantidad de laterales de goteo es una función del número de emisores por lateral y del gasto promedio adimensionalizado:

$$N_{op} = F_4 \left(\frac{L \max}{Dx}, \frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}} \right) \quad (3.9)$$

3.2.2 MODELOS MATEMÁTICOS ADIMENSIONALES

Cuando se resuelven problemas que implican conjuntos de variables conocidas, surge la posibilidad de desarrollar un modelo que permita una estimación de las relaciones entre las variables independientes o de regresión y la variable dependiente o de respuesta. La relación fija para un conjunto de datos se caracteriza por una ecuación de predicción conocida como ecuación de

regresión.

Como resultado del análisis dimensional, es factible relacionar al número óptimo de laterales de goteo con los dos parámetros independientes propuestos en la ecuación 3.9. Por lo tanto, al definir como variables independientes a:

$$x_1 : \ln \left(\frac{L \max}{Dx} \right) \quad (3.10)$$

$$x_2 : \ln \left(\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}} \right) \quad (3.11)$$

la variable dependiente será:

$$y : \ln(N_{op}) \quad (3.12)$$

La ecuación de regresión se obtiene considerando que para una muestra de tamaño n , se conoce la respuesta observada y_i de los valores x_{1i}, x_{2i} de las variables independientes x_1, x_2 , siendo $i = 1, 2, \dots, n$. Entonces, el modelo de regresión lineal múltiple es:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad (3.13)$$

siendo:

\hat{y} : valor estimado que da la línea de regresión muestral.

b_0, b_1, b_2 : coeficientes obtenidos a partir de la solución de un sistema de ecuaciones lineales derivado del concepto de mínimos cuadrados².

Tomando en cuenta que se desea incluir en un solo modelo a la totalidad de las observaciones hechas de los sistema de riego en estudio (consultar el Apéndice A), el tamaño de la muestra es de 241, resultando entonces que la solución al sistema de ecuaciones es:

²El método de mínimos cuadrados es un procedimiento de minimización de los errores alrededor de la línea de regresión ajustada [13].

$$b_0 = 2.89231$$

$$b_1 = -0.03940$$

$$b_2 = 0.10831$$

Al substituir estos coeficientes en la ecuación 3.13 y reacomodando términos se encontró que:

$$\hat{N}_{op} = 18.03493 \left(\frac{L_{max}}{Dx} \right)^{-0.0394} \left(\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}} \right)^{0.10831} \quad (3.14)$$

donde \hat{N}_{op} es el número óptimo de mangueras laterales de diseño.

Con la intención de verificar la aproximación alcanzada para N_{op} a partir de la ecuación anterior, se calcularon los laterales necesarios para formar algunos sistemas óptimos de los cuatro tipos de goteros analizados. Los valores requeridos por el modelo se obtuvieron del Apéndice A y corresponden a sistemas con carga en el cabezal de 1.5 m y separación entre emisores de 0.3 m. En la Figura 3-1 se muestran las curvas construidas con la información generada por el programa DISURT.EXE, y aquellas obtenidas como resultado del empleo de la ecuación 3.14.

Como puede observarse, al utilizar el modelo adimensional se incurre en un error que afecta directamente a la uniformidad de emisión del riego, situación que se torna delicada para el caso en cual se diseñe un sistema con goteros O-Tif de color negro. Las discrepancias ocurren porque el arreglo matemático se construyó con la información de cuatro goteros diferentes en su respuesta bajo las mismas condiciones de carga.

De acuerdo con la ecuación 2.5, los gastos promedio entregados por los goteros de color negro son muy superiores con respecto a los caudales de los demás emisores dentro del intervalo

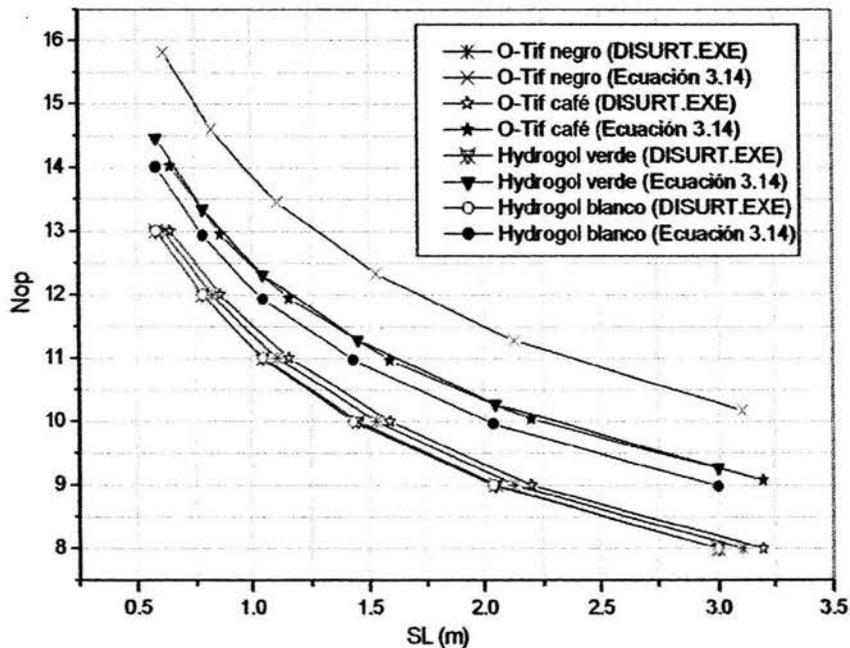


Figura 3-1: Aproximación lograda para el número óptimo de laterales con la ecuación 3.14.

de carga en estudio. Así, el modelo 3.14 no permite una buena aproximación del número de laterales, especialmente para los diseños con goteros *O-Tif negro*.

En vista de lo anterior, fue necesario desarrollar el procedimiento ya descrito para la generación de una ecuación que permita diseñar sistemas con goteros *O-Tif negro*. Con una muestra de tamaño 63, el modelo de regresión que resultó es el siguiente:

$$\hat{N}_{op} = 213.05258 \left(\frac{L \max}{Dx} \right)^{-0.6323} \left(\frac{Q}{SL^{5/2} g^{1/2}} \right)^{0.11948} \quad (3.15)$$

Por otra parte, en la Figura 3-1 se observa una similitud entre las curvas para los diseños con goteros *O-Tif café* e *Hydrogol de colores verde y blanco*. Es así como se pensó en la posibilidad de generar una ecuación que los represente de una manera fiel. Este modelo de regresión se encontró a partir de una muestra de 178 observaciones. La ecuación es:

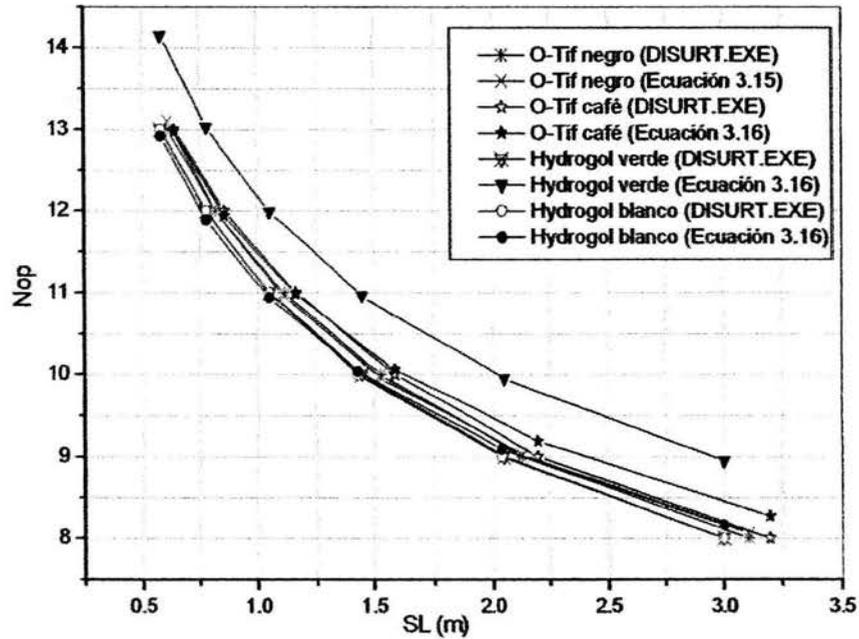


Figura 3-2: Aproximación lograda para el número óptimo de laterales con las ecuaciones 3.15 y 3.16.

$$\hat{N}_{op} = 153.2222 \left(\frac{L \max}{Dx} \right)^{-0.47048} \left(\frac{Q}{SL^{5/2} g^{1/2}} \right)^{0.11158} \quad (3.16)$$

Para validar el empleo de las ecuaciones 3.15 y 3.16, se verificó nuevamente la aproximación de N_{op} para sistemas con carga de 1.5 m en el cabezal y 0.3 m de separación entre emisores. Los resultados se muestran en la Figura 3-2.

Se puede apreciar la existencia de una buena aproximación en la cantidad de laterales correspondientes a los sistemas con emisores de colores negro, café y blanco. Con respecto a los diseños con gotero verde, el modelo matemático 3.16 entrega por resultado un número de laterales superior al calculado durante las simulaciones de funcionamiento hidráulico.

Debido a que los modelos adimensionales únicamente deben utilizarse para el dimensiona-

miento óptimo de sistemas, y que la totalidad de la información de estos diseños se encuentra en las tablas del Apéndice A, fue posible calcular el número de laterales de todos de los sistemas que pueden diseñarse con la información que está disponible en dichas tablas. Mediante este procedimiento se obtuvieron los resultados que permiten manifestar que los modelos adimensionales presentados son adecuados para el diseño de sistemas con goteros de colores negro, café y blanco. Además, se observó que al utilizar la ecuación 3.16 para el diseño de sistemas con goteros Hydrogol verde, generalmente se calcularía un número de laterales superior en una unidad respecto del número obtenido con el programa DISURT.EXE.

Tomando en consideración lo ya expuesto, los diseños con goteros *Hydrogol verde* deberán realizarse mediante el empleo del modelo siguiente:

$$\hat{N}_{op} = 153.2222 \left(\frac{L_{max}}{Dx} \right)^{-0.47048} \left(\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}} \right)^{0.11158} - 1 \quad (3.17)$$

Para finalizar, siendo que el área máxima de riego está relacionada directamente con el número óptimo de laterales, es posible calcular su valor exacto por medio de la ecuación siguiente:

$$A_{max} = \hat{N}_{op} \cdot \frac{L_{max}}{Dx} \cdot SL \cdot Dx \quad (3.18)$$

Si se realizan las operaciones convenientes, se obtendrá una expresión que permite estimar el área máxima de riego de un sistema con goteros *O-Tif negro*. Así pues:

$$\frac{A_{max}}{SL \cdot Dx} = 213.05258 \left(\frac{L_{max}}{Dx} \right)^{0.3677} \left(\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}} \right)^{0.11948} \quad (3.19)$$

De igual manera, las áreas de riego máximas para los diseños con goteros *O-Tif café* o *Hydrogol blanco* pueden estimarse por medio de:

$$\frac{A_{max}}{SL \cdot Dx} = 153.2222 \left(\frac{L_{max}}{Dx} \right)^{0.52952} \left(\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}} \right)^{0.11158} \quad (3.20)$$

Por último, para estimar el área máxima de riego de un sistema con goteros *Hydrogol verde*

puede utilizarse la ecuación:

$$\frac{A \max}{SL \cdot Dx} = 153.2222 \left(\frac{L \max}{Dx} \right)^{0.52952} \left(\frac{Q}{SL^{5/2} g^{1/2}} \right)^{0.11158} - \frac{L \max}{Dx} \quad (3.21)$$

3.3 GRÁFICAS DE DISEÑO

Aceptando que las ecuaciones 3.15, 3.16 y 3.17 permiten conocer el número óptimo de mangueras laterales de un sistema de riego por goteo de máxima área con uniformidad de emisión de 0.90 y carga en el cabezal de 1 a 2 m, es conveniente presentar la información que encierran por medio de gráficas.

Las gráficas para el diseño de laterales se generaron al evaluar en cada modelo un conjunto ordenado de valores de los parámetros adimensionales, considerando como datos extremos a aquellos que aparecen como resultado de las simulaciones de funcionamiento hidráulico incluidos en el Apéndice A.

El procedimiento de diseño consiste en emplear las Figuras 3-3, 3-4 o 3-5 según sea el caso, toda vez que se conozcan las separaciones entre laterales y emisores, suponiendo que en la determinación de dichas separaciones se consideraron el tipo de cultivo y suelo. Debido a que el objetivo de esta tesis es presentar un criterio para la elección de un sistema de riego cuyo dimensionamiento sea óptimo, durante el proceso de diseño deberán considerarse tanto la cantidad de emisores instalados sobre un lateral de máxima longitud $\left(\frac{L \max}{Dx} \right)$, como los gastos de emisión (Q) que aparecen en las tablas de resultados de simulación con el programa DISURT.EXE.

Para estimar la magnitud de las áreas de riego que podrán regarse con un determinado sistema, se graficaron las curvas que aparecen en las Figuras 3-6, 3-7 y 3-8.

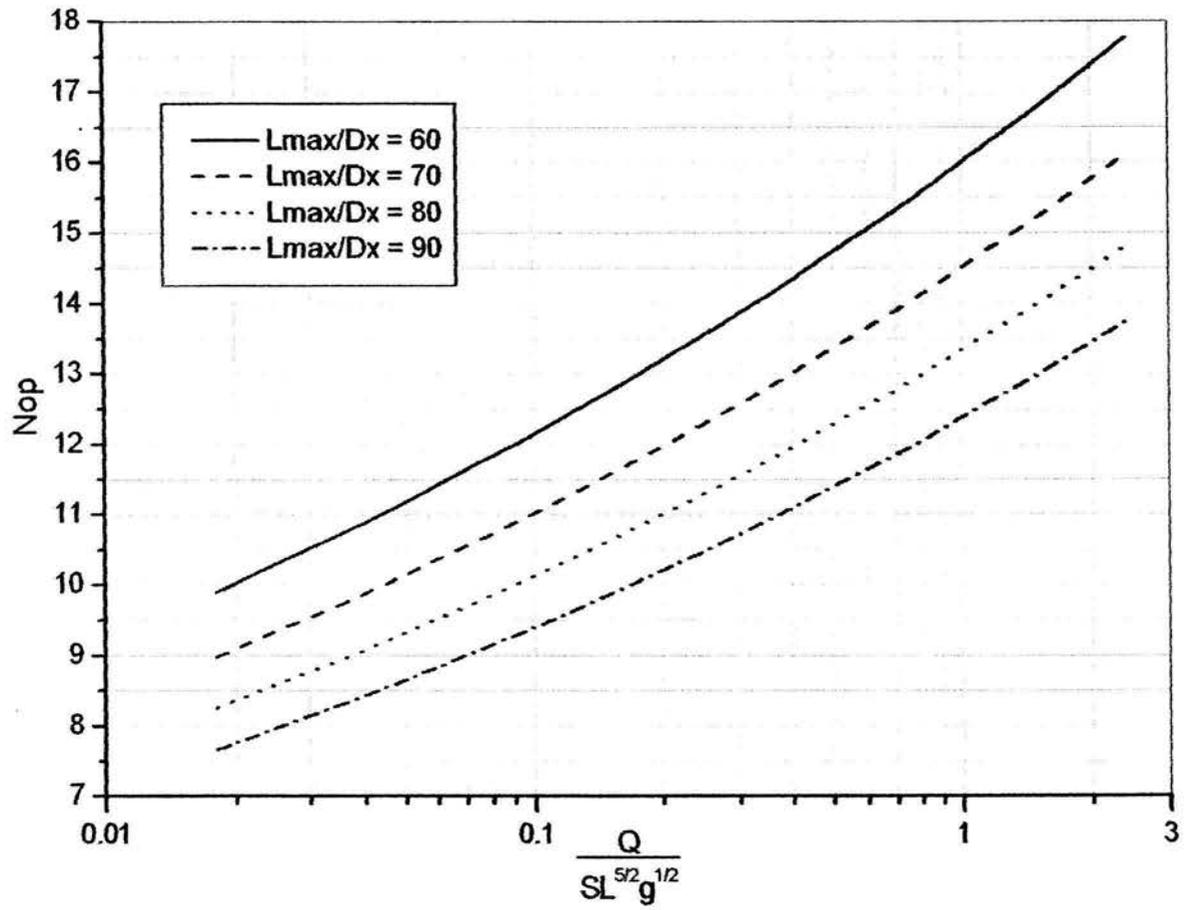


Figura 3-3: Gráfica para el diseño de laterales con goteros O-Tif negro.

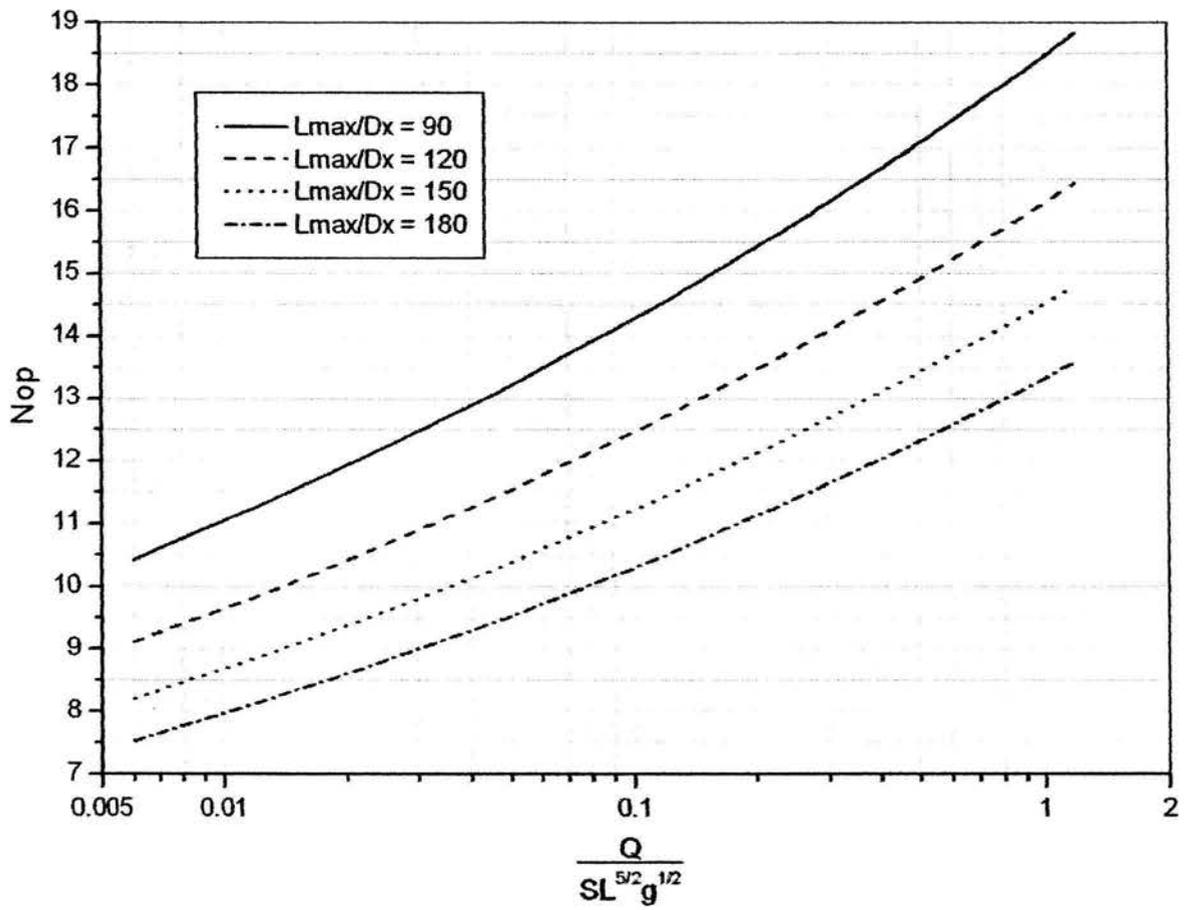


Figura 3-4: Gráfica para el diseño de laterales con goteros O-Tif café o Hydrogol blanco.

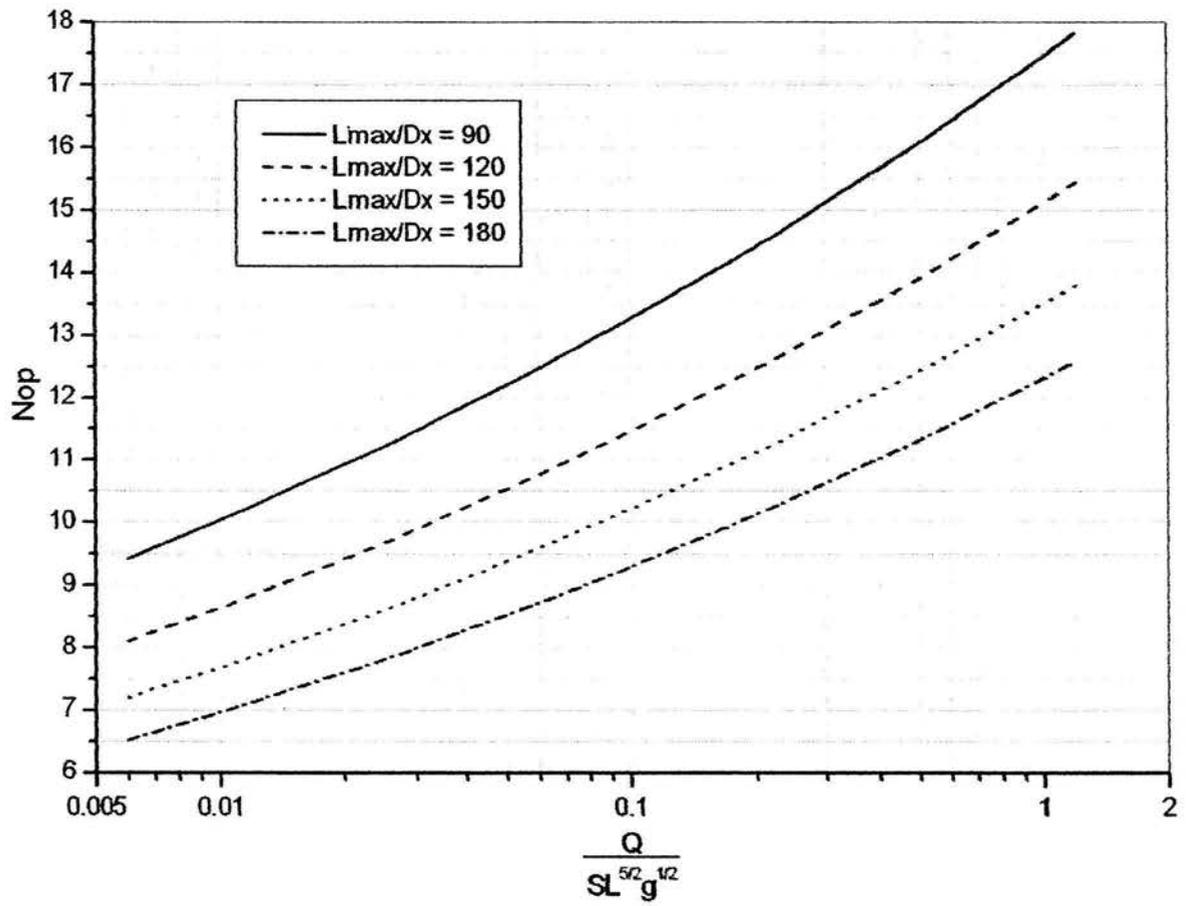


Figura 3-5: Gráfica para el diseño de laterales con goteros Hydrogol verde.

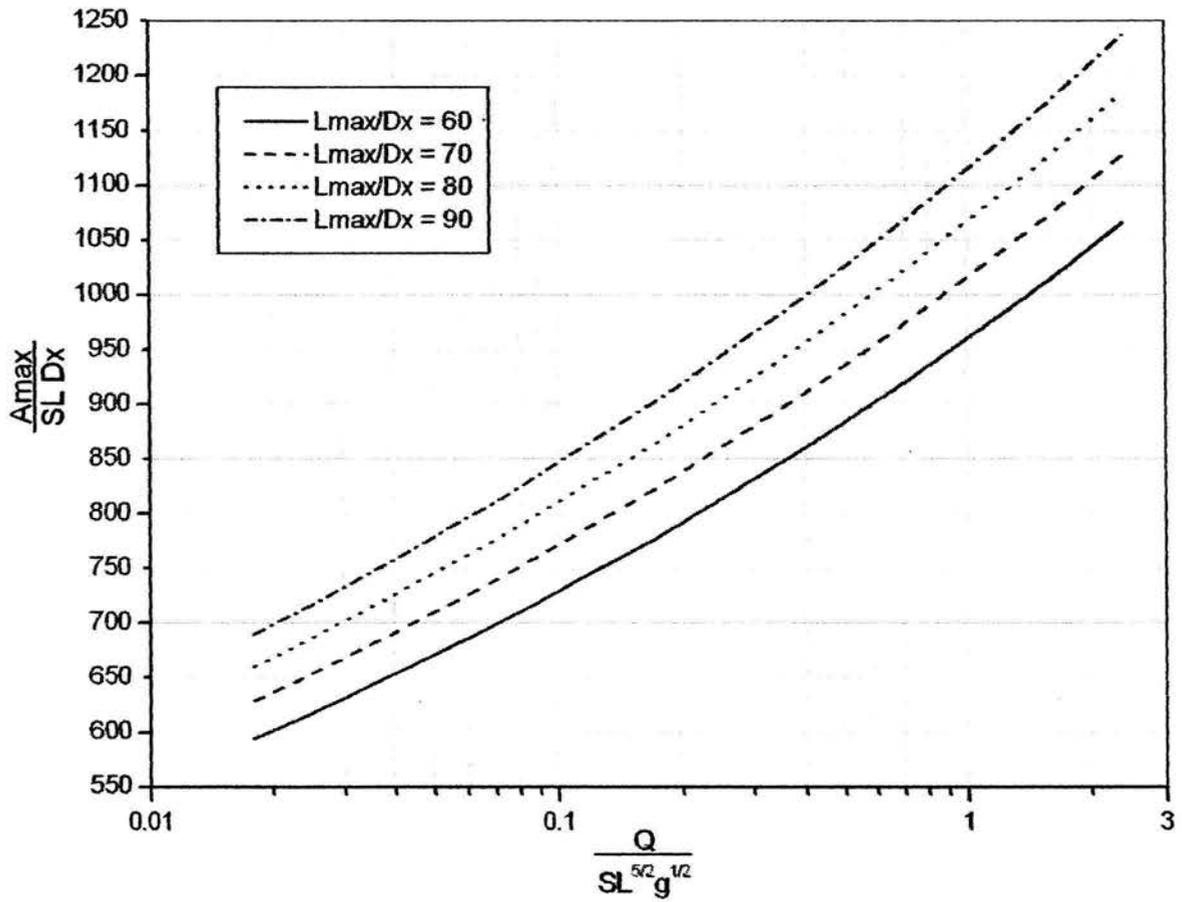


Figura 3-6: Áreas máximas de riego para sistemas con goteros O-Tif negro.

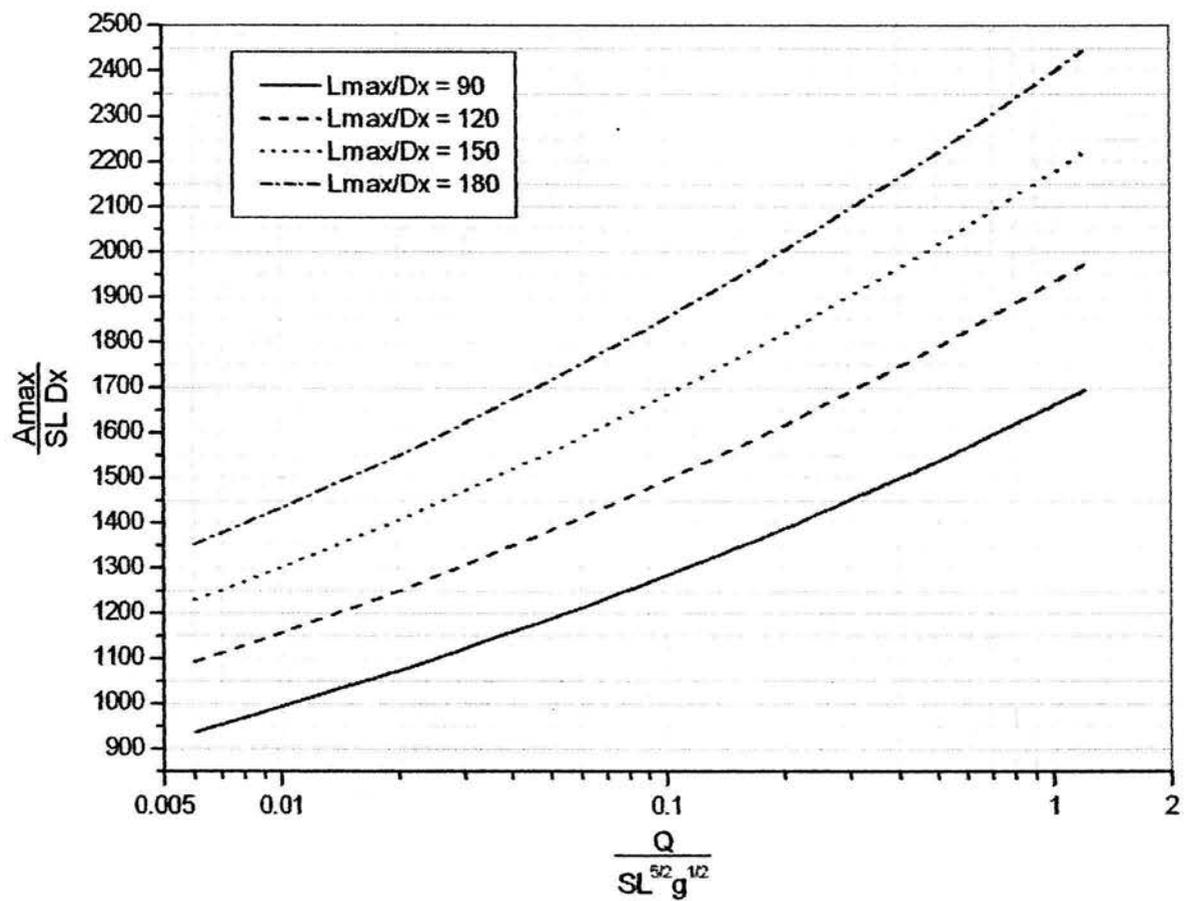


Figura 3-7: Áreas máximas de riego para sistemas con goteros O-Tif café o Hydrogol blanco.

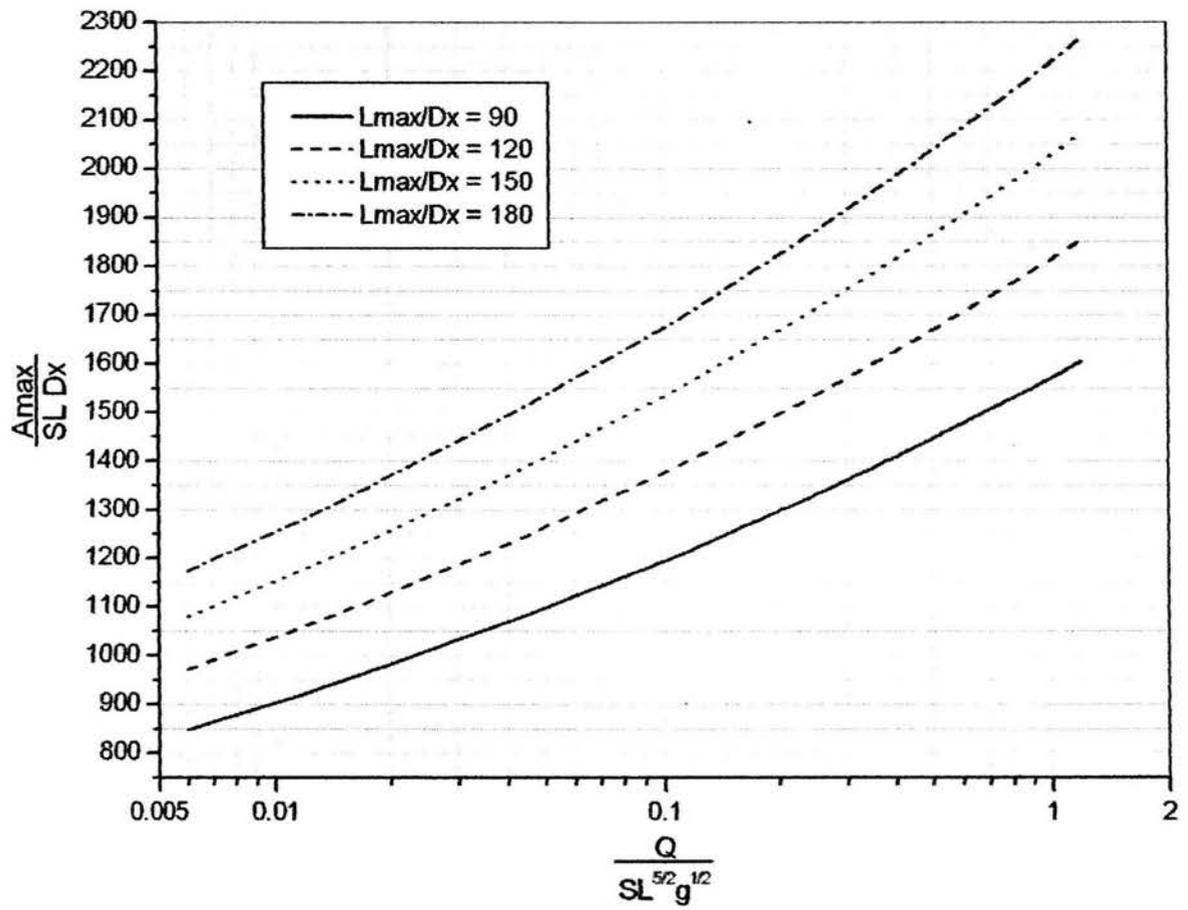


Figura 3-8: Áreas máximas de riego para sistemas con goteros Hydrogol verde.

3.4 EJEMPLOS NUMÉRICOS

3.4.1 EJEMPLO 1

Se desea un sistema fijo con cuatro mangueras distribuidoras para el cultivo de hortalizas sobre un terreno plano en el que no existe restricción para el tamaño de la parcela. Suponiendo que se ha considerado el tipo de suelo y cultivo, las separaciones son de 0.3 m para los emisores y de 0.8 m para los laterales, mientras que la necesidad de agua real es de 6 mm/día.

a) Diseño con goteros O-Tif de color negro y carga en el caberzal de 1 m

De acuerdo con los resultados de funcionamiento hidráulico presentados en el Apéndice A, el número de emisores correspondiente a la longitud máxima de lateral es 88, mientras que el gasto por emisor es de 1.1264 l/h.

De la ecuación 3.15 resulta que el número óptimo de laterales es igual a 11.88, valor que deberá redondearse al número entero más cercano.

Al utilizar la ecuación 3.18 se tiene que el valor exacto del área máxima es:

$$A_{\max} = 12(88)(0.8)(0.3) = 253.44 \text{ m}^2$$

Como se instalarán cuatro mangueras distribuidoras independientes y de las mismas características, el sistema completo será capaz de regar una área total de 1013.76 m².

Si el riego se aplica cada dos días, entonces debe infiltrarse una lámina de agua igual a 12 mm, por lo que con base en la ecuación 1.12 se obtiene el tiempo de riego siguiente:

$$Tr = \frac{12\left(\frac{\pi}{4}\right)(0.3)^2}{1.1264} = 0.75 \text{ h}$$

El número total de puntos de emisión del sistema es:

$$Ne = 4(88)(12) = 4224$$

El gasto total que requiere la parcela es de:

$$Q_t = 4224(1.1264) = 4757 \frac{l}{h} = 1.32 \frac{l}{s}$$

El sistema diseñado debe instalarse como se indica en la Figura 2-1; es decir, cuatro mangueras distribuidoras conectadas a la base del cabezal que se ubica al centro del área de riego.

b) Diseño con goteros Hydrogol de color verde y carga en el cabezal de 1 m

El número de emisores correspondiente a la longitud máxima de lateral es 157 y el gasto por emisor es de 0.4671 l/h.

A partir de la ecuación 3.17 se obtiene un número óptimo de laterales igual a 11. Por otra parte, con base en la ecuación 3.18, y considerando la instalación de cuatro mangueras distribuidoras, se calculó un área total de riego de 1657.92 m².

Si el riego se aplica cada dos días, la dosis es de 12 mm y el tiempo de riego será:

$$Tr = \frac{12(\frac{\pi}{4})(0.3)^2}{0.4671} = 1.81 \text{ h}$$

El número total de emisores es:

$$Ne = 4(157)(11) = 6908$$

El gasto total requerido en la parcela será:

$$Q_t = 6908(0.4671) = 3226 \frac{l}{h} = 0.89 \frac{l}{s}$$

c) *Costo unitario de los equipos de riego*

Debido a que los diseños para riego con goteros Hydrogol son sistemas integrados, los costos que implican son inferiores a los generados por la instalación de un equipo con goteros sobre línea de la marca O-Tif.

* Costo unitario de mangueras y goteros del inciso (a)

Las mangueras distribuidoras son de 20 mm de diámetro exterior, con un costo aproximado de 3.14 \$/m. La manguera para los laterales es de 17 mm de diámetro exterior con un costo de 1.67 \$/m. Los goteros tienen un costo de 1.50 \$/pieza. Las conexiones "T" de 4.50 \$/pieza y los anillos terminales para los laterales de 1.00 \$/pieza.

El costo de cada manguera distribuidora es:

$$CTD = 3.14(LMD) = 3.14(20.8) = \$ 65.31$$

donde LMD es la longitud de la manguera distribuidora calculada a partir de la expresión:

$$LMD = 2 \left((\hat{N}_{op} \cdot SL) + SL \right)$$

El costo de los laterales de goteo instalados sobre una manguera distribuidora es:

$$CTM = 1.67(LML) + 1.5 \left(\frac{L_{\max}}{Dx} \cdot \hat{N}_{op} \right) + \hat{N}_{op} (4.5 + 1)$$

siendo LML la longitud total de manguera para laterales calculada a partir de la ecuación:

$$LML = \hat{N}_{op} \left(\left(\frac{L_{\max}}{Dx} \cdot Dx \right) + SL \right)$$

El costo de los laterales es:

$$CTM = 1.67(326.4) + 1.5(88)(12) + 12(5.5) = \$ 2195.08$$

Definiendo al costo unitario de mangueras y goteros (*CTU*) como:

$$CTU = \frac{CTD + CTM}{A_{\max}}$$

El costo unitario para el diseño con equipo O-Tif negro será:

$$CTU = 8.91 \frac{\$}{m^2}$$

A este costo habría que agregarle el del cabezal, incluyendo sus conexiones o adaptadores, y filtro de malla.

* Costo unitario de mangueras y goteros del inciso (b)

Las mangueras distribuidoras son de 20 mm de diámetro exterior, con un costo de 3.14 \$/m. Los laterales son mangueras con goteros integrados de la marca Hydrogol, que se surten en rollos de 400 m. Para el ejemplo se solicitaría una manguera de 16 mm de diámetro exterior con un emisor por cada 0.3 m de tubería, que tiene un costo de 949.50 \$/rollo; así, la manguera lateral tendría un costo de 2.37 \$/m. Las conexiones "T" de 4.50 \$/pieza y los anillos terminales de 1.00 \$/pieza.

El costo de cada manguera distribuidora es:

$$CTD = 3.14(19.2) = \$ 60.28$$

El costo de los laterales de goteo instalados sobre una manguera distribuidora es:

$$CTM = 2.37(526.9) + 11(5.5) = \$ 1309.25$$

El costo unitario para el diseño con equipo Hydrogol verde será:

$$CTU = \frac{60.28 + 1309.25}{\frac{1657.92}{4}} = 3.30 \frac{\$}{m^2}$$

No olvidar agregar los costos correspondientes al cabezal.

3.4.2 EJEMPLO 2

Para el cultivo del ejemplo 1, diseñar un sistema semifijo de dos mangueras distribuidoras que pueda utilizarse para regar la misma área que un sistema semifijo de cuatro mangueras diseñado para el mismo cultivo. Suponer que la disponibilidad de agua es tal que se pueden realizar actividades de riego diariamente.

a) Diseño con goteros O-Tif de color negro y carga en el cabezal de 1 m

El número de emisores correspondiente a la longitud máxima de lateral es 88 y el gasto por emisor es de 1.1264 l/h.

Si cada lateral alimenta a dos líneas de plantas (sistema semifijo), entonces la separación entre laterales es de 1.6 m. Según la ecuación 3.15, el número de laterales \hat{N}_{op} es 10. Por otra parte, aún cuando se instalarán únicamente dos mangueras distribuidoras, el área de riego total será de 1689.6 m².

Pensando en que se puede disponer de agua diariamente, una opción sería dedicar un día para actividades de riego en un sólo lado de la parcela; es decir, cada lado se regaría al segundo día y la lámina de agua por infiltrarse continuaría siendo de 12 mm. Obrando de esta manera, el tiempo de riego también es de 0.75 h. Debe reconocerse que el tiempo total empleado en la

jornada es de 1.5 h, más el tiempo necesario para el movimiento y colocación de las mangueras.

El número total de emisores en el sistema es:

$$N_e = 2(88)(10) = 1760$$

El gasto total que requiere la parcela es:

$$Q_t = 1760(1.1264) = 1982 \frac{l}{h} = 0.55 \frac{l}{s}$$

El costo unitario para el diseño con equipo O-Tif negro será:

$$CTU = \frac{1}{2} \left(\frac{110.52 + 1842.6}{\frac{1689.6}{4}} \right) = 2.31 \frac{\$}{m^2}$$

b) Diseño con goteros Hydrogol de color verde y carga en el caberzal de 1 m

El número de emisores correspondiente a la longitud máxima de lateral es 157 y el gasto por emisor es de 0.4671 l/h.

La separación entre laterales es de 1.6 m. Con base en la ecuación 3.17, el número óptimo de laterales es 9, mientras que el área total tiene una magnitud de 2712.96 m².

Si la dosis continúa siendo de 12 mm, el tiempo de riego se mantiene en 1.81 h. La jornada consta de 3.6 h aproximadamente.

El número total de emisores en el sistema es:

$$N_e = 2(157)(9) = 2826$$

El gasto total que requiere la parcela es:

$$Q_t = 2826(0.4671) = 1320 \frac{l}{h} = 0.36 \frac{l}{s}$$

El costo unitario para el diseño con equipo Hydrogol verde será:

$$CTU = \frac{1}{2} \left(\frac{100.48 + 1088.27}{\frac{2712.96}{4}} \right) = 0.87 \frac{\$}{m^2}$$

3.4.3 EJEMPLO 3

Se desea conocer la variedad de sistemas semifijos de cuatro mangueras distribuidoras, sugeridos para el cultivo del ejemplo 1. El riego debe aplicarse cada dos días.

Se deberá seguir la misma metodología descrita en el primer ejemplo, adoptando los valores adecuados de longitud máxima de lateral y gasto por emisor correspondientes al tipo de gotero y carga en el cabezal, todo de acuerdo con lo presentado en las tablas de resultados del Apéndice A.

Debido a que cada lateral alimenta a dos líneas de plantas, la separación entre laterales es de 1.6 m. Con respecto al tiempo de riego, éste debe ser el suficiente para entregar una dosis de 12 mm, mientras que la jornada de trabajo será aproximadamente del doble que el tiempo de riego calculado.

Los sistemas sugeridos se describen con la información incluida en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Sistemas semifijos para el cultivo del ejemplo 3.

Sistema	$\frac{L_{\max}}{Dx}$	$Q \left(\frac{l}{h} \right)$	\hat{N}_{op}	Área total (m ²)	Tr (h)	$Q_t \left(\frac{l}{s} \right)$
O-Tif negro (HF = 1 m)	88	1.1264	10	1689.6	0.75	1.10
O-Tif negro (HF = 1.5 m)	89	1.3894	10	1708.8	0.61	1.37
O-Tif negro (HF = 2 m)	90	1.6128	10	1728	0.52	1.61
O-Tif café (HF = 1 m)	166	0.5357	10	3187.2	1.58	0.98
O-Tif café (HF = 1.5 m)	171	0.6546	10	3283.2	1.29	1.24
O-Tif café (HF = 2 m)	173	0.7539	10	3321.6	1.12	1.44
Hydrogol verde (HF = 1m)	157	0.4671	9	2712.96	1.81	0.73
Hydrogol verde (HF = 1.5 m)	150	0.6465	10	2880	1.31	1.07
Hydrogol verde (HF = 2 m)	143	0.8132	10	2745.6	1.04	1.29
Hydrogol blanco (HF = 1m)	184	0.349	9	3179.52	2.43	0.64
Hydrogol blanco (HF = 1.5 m)	172	0.5067	10	3302.4	1.67	0.96
Hydrogol blanco (HF = 2 m)	163	0.6587	10	3129.6	1.28	1.19

3.4.4 DISCUSIÓN DE LOS EJEMPLOS

Dado que las características de los diseños son muy diferentes dependiendo del tipo de gotero empleado como emisor, a continuación se puntualizan las diferencias principales que deben considerarse antes de tomar una decisión con respecto a la elección de uno de los sistemas.

Al comparar los sistemas diseñados con goteros O-Tif e Hydrogol de los ejemplos 1 y 2, claramente se observa que la magnitud de las áreas de riego logradas con equipos Hydrogol son superiores a las áreas de los sistemas con goteros O-Tif. De igual manera, los gastos totales requeridos en parcela y los costos unitarios de los equipos se reducen de manera significativa al elegir los diseños con Hydrogol. Por el contrario, si se decide instalar al sistema de O-Tif, los costos referentes a la mano de obra utilizada se verán reducidos porque los tiempos de riego y las jornadas de trabajo son menores.

Como en los ejemplos desarrollados no existe restricción para el tamaño de la parcela, resulta conveniente hacer una comparación de las características de los sistemas fijos del primer ejemplo con respecto de los sistemas semifijos de doble manguera distribuidora del ejemplo 2. Nótese que independientemente de la marca de gotero a elegir (pues una comparación significativa ocurre si los sistemas cuentan con el mismo tipo de gotero), las áreas de riego de los sistemas semifijos son muy superiores a las propias de los sistemas fijos. De manera similar,

los gastos requeridos en parcela y los costos por la instalación de sistemas semifijos resultan inferiores. Los tiempos de riego serán los mismos y tendrán una duración que dependerá del gotero seleccionado. Finalmente, la frecuente movilización de mangueras a uno y otro lado de la parcela puede convertirse en un factor decisivo para la adopción de uno u otro equipo.

Una situación especial ocurre al comparar las características del sistema semifijo de goteros Hydrogol con doble distribuidora, en oposición con los resultados entregados por el sistema fijo con goteros O-Tif de cuatro distribuidoras. De acuerdo con lo calculado, la magnitud del área de riego del sistema semifijo es 2.6 veces mayor, el gasto requerido en parcela es casi 4 veces menor, y su costo unitario es de aproximadamente 1/10 del costo unitario del sistema fijo. Sin embargo, la duración de las actividades de riego sobre la totalidad del cultivo con mangueras Hydrogol es 10 veces mayor.

Para poder elegir un sistema de entre los propuestos en la Tabla 3.1, lo más conveniente es iniciar el análisis de cada equipo de goteo observando la tendencia de las áreas que pueden regar con respecto al incremento de la carga en el cabezal. Para el caso de los diseños con goteros O-Tif, estas magnitudes aumentan conforme se eleva la carga. La situación es diferente para el caso de los diseños con Hydrogol, pues según lo calculado, el área máxima de riego se alcanza para los sistemas con una carga en el cabezal igual a 1.5 m.

Continuando con el proceso de elección, es conveniente seleccionar un sistema representativo de cada tipo de gotero. Debido a que se pretende regar la mayor cantidad de área, los equipos con goteros O-Tif con carga de 2 m deben ser considerados para su posible instalación. Lo mismo ocurre para los sistemas con mangueras Hydrogol con carga de 1.5 m.

Para concluir con el análisis del ejemplo 3, dado que no existe restricción para el tamaño de la parcela, la elección final podría realizarse entre los equipos O-Tif café e Hydrogol blanco, lo anterior por tratarse de los sistemas que pueden regar una mayor área. La decisión deberá estar respaldada por un argumento que considere principalmente los costos unitarios de los equipos, pues los gastos totales requeridos en parcela son muy pequeños en ambos casos.

Capítulo 4

COMPROBACIÓN, COMPARACIÓN Y SUGERENCIAS

4.1 VALIDACIÓN DEL CÓDIGO NUMÉRICO

Con la intención de validar los resultados de simulación de funcionamiento hidráulico obtenidos con el programa DISURT.EXE, se realizaron mediciones de campo de un sistema con goteros O-Tif de color negro y carga en el cabezal de 1.5 m. El diseño corresponde al de un terreno plano en donde se muestra la disposición de los elementos y se puede llegar a una conclusión con respecto a las aproximaciones logradas en cuestiones de gastos y coeficientes de variación. El sistema analizado lo forman 8 mangueras laterales con separaciones de 3.11 m. Cada lateral consta de 89 goteros separados por una distancia de 0.3 m.

El análisis de toda la red se llevó a cabo mediante el empleo de una sola manguera lateral conectada directamente a la base del cabezal, es decir, cada uno de los 8 laterales que debían instalarse sobre la manguera distribuidora fueron analizados de manera independiente, esto mientras trabajaban con una carga igual a la que debía presentarse en los nudos de conexión entre la distribuidora y sus laterales (ver Figura 4-1). Para lograr lo anterior, fue necesario

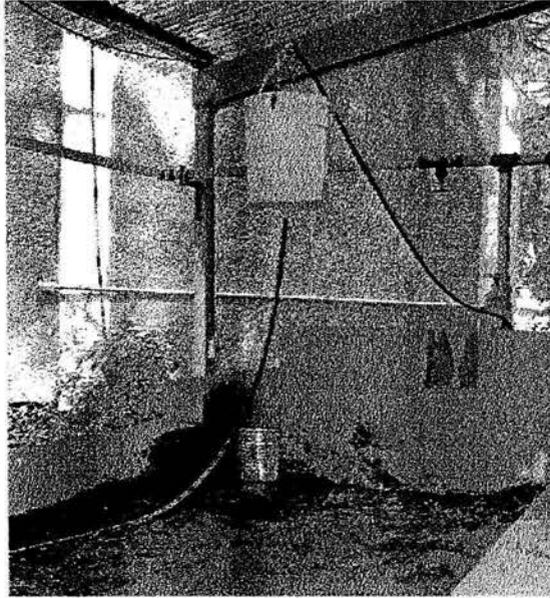


Figura 4-1: Conexión de cabezal y manguera lateral. Artificio de simplificación que corresponde al nudo de conexión del lateral más cercano al cabezal (lateral No. 1 con carga de 1.31 m).

obtener los 8 valores de carga en los nudos de conexión, todo con la ayuda del código numérico. Como información adicional necesaria para comparaciones posteriores, también se obtuvieron los gastos por emisor de cada lateral. Los valores se presentan en la Tabla 4.1.

En vista de que las cargas en los nudos de conexión de los laterales 5, 6 y 7 eran muy similares, se decidió que un lateral con carga de 1.045 m sería suficiente para representarlos en las pruebas de campo. Con respecto al incremento de carga en los últimos nudos de conexión de la distribuidora, la situación debe entenderse como una consecuencia de la mejor distribución de la carga hidráulica por el empleo de la manguera en forma de “U”.

Como actividades de campo, se aforaron todos los puntos de emisión, haciendo tres repeticiones de las lecturas para reducir los errores de medición. Al finalizar, los gastos de los goteros se transcribieron a una hoja de cálculo que facilitó las operaciones aritméticas necesarias para conocer los coeficientes de variación de los caudales de las tuberías analizadas. La uniformidad de emisión de cada lateral fue calculada con la ecuación 2.32. Los resultados aparecen en la

Tabla 4.1: Sistema de ocho laterales analizado para validación. Valores obtenidos con el programa DISURT.EXE.

Lateral	Carga (m)	Q (l/h)
1	1.307	1.4806
2	1.179	1.4020
3	1.101	1.3525
4	1.060	1.3262
5	1.046	1.3167
6	1.045	1.3161
7	1.05	1.3187
8	1.075	1.3503

Tabla 4.2: Resultados de las pruebas de campo del sistema de ocho laterales analizado para validación.

Lateral	Carga (m)	Q_{\min} (l/h)	Q_{\exp} (l/h)	CV	EU
1	1.31	1.38	1.5031	0.066	0.840
2	1.18	1.32	1.4303	0.060	0.851
3	1.10	1.26	1.3766	0.064	0.840
4	1.06	1.20	1.3417	0.055	0.831
5,6,7	1.045	1.20	1.3303	0.052	0.841
8	1.075	1.26	1.3701	0.062	0.846

Tabla 4.2.

Según se observa, el CV de cada manguera analizada individualmente se encuentra en un intervalo de valores de 0.05 a 0.07, por lo que según la clasificación de la ASAE, el CV de los goteros instalados es normal. En cuanto a la uniformidad de emisión de los laterales, los coeficientes no están muy alejados del 0.90 que se esperaba. La diferencia se atribuye principalmente a que el programa de computadora considera la misma curva cargas-gastos para cada gotero del sistema, lo cual equivaldría a que en campo se utilizaran goteros exactamente iguales.

Otro aspecto que resulta importante es la comparación de los gastos promedio Q y Q_{\exp} que aparecen en las Tablas 4.1 y 4.2 respectivamente. Debido a que los caudales sugeridos por el código numérico son ligeramente inferiores, se revisó que la curva de cargas-gastos de los goteros

O-Tif de color negro obtenida por Vázquez *et al.* (2000) fuera ratificada por las mediciones hechas en campo para el sistema diseñado para validación. A partir de las parejas formadas por las cargas en los nudos de conexión y los gastos medidos en campo para el primer emisor en la dirección del flujo de los seis laterales estudiados, se formó una nueva curva de gastos de emisión que se escribe como:

$$Q = 1.3767h^{0.5305} \quad (4.1)$$

Resulta evidente que la diferencia de los gastos obtenidos a partir de cualesquiera de las dos curvas para goteros de color negro es mínima (ver ecuación 2.5). Así, se consideró conveniente una calibración del código numérico en lo referente al coeficiente de pérdida local de los goteros. Apoyado por el modelo de la ecuación 4.1, se procedió de manera iterativa al proponer coeficientes α , que siendo menores a 0.6, aumentarían progresivamente los caudales de los laterales. Las similitudes alcanzadas con respecto a los gastos de origen experimental se revisaron mediante el cálculo de las diferencias ΔQ . Finalmente, se encontró que el valor del coeficiente α que se ajustaba a las condiciones y desempeño del gotero O-Tif es de 0.46.

No obstante la diferencia encontrada para el valor del coeficiente de pérdida local de los goteros, los diseños sugeridos en este trabajo aún son válidos, pues si se adoptara el nuevo valor de α durante un proceso de diseño con el programa DISURT.EXE, la uniformidad de emisión del sistema propuesto se incrementaría. Sin embargo, esta variación resultaría insuficiente para afectar las características del sistema de riego que ya se consideraba óptimo, y por lo tanto, se concluye que el coeficiente de pérdida de carga local es una variable que no afecta en gran medida a los diseños de baja carga para parcelas pequeñas.

4.2 COMPARACIÓN CON SISTEMAS EXISTENTES EN EL MERCADO

Con la finalidad de mostrar lo conveniente que resulta el poder diseñar un sistema de riego por goteo siguiendo la metodología descrita en este trabajo, se solicitaron los presupuestos correspondientes a tres sistemas comerciales diferentes para regar una superficie plana del orden

de 400 m². La información recabada se presenta a continuación.

4.2.1 SISTEMA DISTRIBUIDO POR PLÁSTICOS REX S.A. DE C.V.

Se trata de un equipo recomendado para el riego de una superficie de 400 m². Incluye todos los elementos o componentes de una instalación, es decir, el cabezal con filtro de malla, la red de tuberías con goteros integrados, uniones y piezas especiales.

El sistema es integrado y consta de un rollo de manguera Hydrogol de 16 mm de diámetro nominal, 400 m de longitud y separación entre emisores de 0.3 m. La disposición de las tuberías dependerá del tipo de cultivo y de las características geométricas del terreno por irrigar. El fabricante asegura que se obtendrá una excelente uniformidad de emisión mientras que la longitud de los laterales no supere un límite que ha sido determinado previamente por su departamento técnico y que depende del tipo de gotero que se utilice. Sin embargo, dado que estas longitudes fueron calculadas para un solo lateral, existe el riesgo de que la uniformidad no se alcance si se consideran estas longitudes en la instalación de varias mangueras regantes.

En resumen, se ofrece un equipo que puede regar hasta 1333 plantas y su costo de adquisición es de \$3552.85. Si se piensa en el costo del equipo por unidad de área, el sistema tiene un valor de 8.88 \$/m².

4.2.2 SISTEMA DISTRIBUIDO POR NETAFIM MÉXICO S.A. DE C.V.

El sistema que se ofrece es recomendado para regar un área de 450 m² por medio de goteros integrados a una manguera cuya longitud no excede los 450 m. La separación entre emisores es de 0.3 m y el diámetro nominal de la tubería regante es de 16 mm. La ubicación de las mangueras dependerá de las características del terreno, mientras que la instalación se llevará a cabo siguiendo las instrucciones del fabricante. Se podrán regar hasta 1500 plantas simultáneamente.

El costo para la adquisición del equipo es de \$2184.00, aunque debe aclararse que éste no incluye todos los elementos de una instalación, porque el cabezal y sus componentes deberán comprarse por separado. Siendo así, el costo unitario de la red de tuberías es igual a 4.85 \$/m².

4.2.3 SISTEMA DISTRIBUIDO POR EQUIPOS Y ACCESORIOS PARA RIEGO TECNIFICADO S.A. DE C.V.

Al igual que la mayoría de los centros de distribución de materiales para riego, Equipos y Accesorios para Riego Tecnificado no ofrece al cliente una variedad de sistemas ya diseñados para regar una determinada área con plantas separadas por una distancia en particular, sino que prestan un servicio de asesoría para el diseño de un sistema que vaya de acuerdo con las necesidades del cultivo y la capacidad de adquisición del agricultor.

Para el ejemplo del cultivo sobre una superficie de 450 m² con 1500 puntos de riego, el distribuidor sugirió el empleo de goteros del tipo E-2-DBK08, insertados a cada 0.3 m sobre una manguera de polietileno de 16 mm de diámetro nominal. Suponiendo que el terreno permite el acomodo de diez líneas de plantas con 150 puntos de riego sobre cada una, la cuatificación de elementos para la integración de las tuberías regantes pudo llevarse a cabo. La tabla siguiente muestra los costos de los materiales requeridos y que pueden ser surtidos por el distribuidor.

Elementos de la manguera regante	P.U.	no. Piezas	Costo
Gotero E-2-DBK08	\$3.60	1500	\$5400.00
Manguera Durapol de 16 mm exterior	\$1540.00	2 rollos	\$3080.00
Adaptador de 13 x 16 mm	\$6.30	10	\$63.00
Tapón para manguera de 16 mm	\$16.50	10	\$165.00

El costo total de las mangueras laterales es de \$8708.00. A este costo habrá que agregarle el del cabezal y la tubería principal o distribuidora.

Dado que los goteros fueron diseñados para trabajar con 1 bar de presión, el asesor sugirió la instalación de una tubería de PVC conectada a una bomba de 1/2 HP de potencia hidráulica, idea que evidentemente logrará incrementar los costos para la puesta a punto de la instalación.

4.2.4 SISTEMA SUGERIDO POR EL AUTOR

Una alternativa es la adopción de un sistema integrado de mangueras Hydrogol con goteros de color blanco a cada 0.3 m, carga de 1.5 m en el cabezal y separación entre laterales de 0.6 m. Con un número de emisores correspondiente a la longitud máxima de lateral de 172, el número óptimo de laterales de diseño debe ser 13. Este sistema cubrirá un área de 402.48 m², en donde será posible regar simultáneamente 2236 plantas con un gasto total requerido en parcela de 0.31 l/s.

Se calculó que se necesitarán 678.6 m de manguera Hydrogol y 16.8 m de manguera negra de polietileno de 20 mm. Los costos correspondientes a los elementos de la red se muestran a continuación.

Elementos de la red	P.U	no. Piezas	Costo
Manguera Hydrogol	\$949.50	2 rollos	\$1899.00
Manguera negra de 20 mm exterior	\$157.00	1 rollo	\$157.00
Conexiones "T"	\$4.50	13	\$58.50
Anillos terminales	\$1.00	13	\$13.00

Para la construcción del cabezal deberá seguirse el procedimiento presentado en [11]. El costo aproximado de este componente, con el filtro de malla incluido, es de \$241.00.

Por lo anterior, el sistema de riego sugerido tiene un costo total de \$2368.50. De esta manera, el costo unitario del sistema completo es de 5.88 \$/m². Se observa entonces que este equipo es más económico que los sistemas del mercado, además de que puede regar una mayor cantidad de plantas.

Aún más, en el caso de contar con un terreno de mayores dimensiones, convendría que el sistema fuera semifijo, es decir, que cada lateral alimentara a dos líneas de plantas. De esta manera, el número óptimo de laterales sería igual a 10, y se ubicarían sobre un terreno de 619.2 m². En estas condiciones, se podrán regar 1720 plantas simultáneamente, requiriendo un gasto

de 0.24 l/s.

De acuerdo con lo calculado, la longitud de manguera Hydrogol necesaria será de 528 m, mientras que la manguera distribuidora tendrá una longitud de 26.4 m. Dado que los rollos de manguera Hydrogol son de 400 m, y la tubería de polietileno de 20 mm puede adquirirse en rollos de 50 m, los costos correspondientes a estos elementos son iguales a los del sistema fijo. La diferencia existe en la cantidad de conexiones "T" y anillos terminales que deberán adquirirse.

El costo total del sistema semifijo es de \$2352.00, que por unidad de área resulta igual a 3.79 \$/m². Entonces, el costo unitario se reduce y el número de plantas que se podrán cosechar se incrementa 1.5 veces.

Para finalizar, nótese que existe la posibilidad de diseñar sistemas móviles, en los cuales, una manguera lateral puede regar más de dos líneas de plantas. Además, dependiendo de las características geométricas del terreno por irrigar, podrán instalarse dos o más mangueras distribuidoras, incrementándose con ello la magnitud de la superficie de riego, y manteniéndose un bajo costo del sistema por unidad de área.

4.3 RECOMENDACIONES PARA LA OPERACIÓN DE UN SISTEMA

Con la intención de propiciar un funcionamiento adecuado de los sistemas en cada operación de riego, se sugiere atender a las siguientes indicaciones.

- a) Utilizar un filtro para la eliminación de los sólidos del agua antes de su entrada al cabezal. Las características del filtro dependerán de la naturaleza y tamaño de las partículas.

- b) Para evitar pérdidas de agua por derrames en el cabezal, es conveniente instalar una válvula de flotador dentro del tanque.

c) Procurar que las mangueras laterales se coloquen de manera tal que los goteros no hagan contacto con el suelo, pues así se evitará que se obturen con lodo. De cualquier manera, se recomienda verificar que los goteros funcionen adecuadamente durante su actividad.

d) Antes de utilizar el equipo por primera vez, es importante realizar un lavado del interior de las mangueras para eliminar el material sólido que se haya introducido durante la instalación del mismo.

e) Como una actividad previa al riego, hay que eliminar el aire atrapado en las mangueras, retirando los anillos terminales de los extremos para que el agua y el aire puedan salir libremente. Al finalizar las labores, evitar que el cabezal se vacíe completamente para que el aire no se introduzca nuevamente al sistema.

f) Los sistemas móviles se recomiendan para cultivos de porte pequeño, pues es importante evitar perjuicios derivados del movimiento frecuente de los laterales.

g) Cuando se decida instalar un sistema con goteros de la marca O-Tif, conviene adquirir una cantidad superior al total de emisores (N_e), misma que servirá de reserva en caso de pérdida de unidades por desprendimiento. Lo anterior debe atenderse especialmente si el sistema es móvil.

h) Al finalizar el ciclo vegetativo, retirar con suficiente cuidado las mangueras para volverlas a utilizar exactamente después de la siguiente siembra.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La necesidad de producir alimentos no obstante lo limitado de los recursos hídricos o la falta de infraestructura para la conducción del agua desde su origen hasta los cultivos, ha sido el factor determinante para que algunas sociedades alrededor del mundo hayan desarrollado ciertas técnicas útiles que permiten la práctica del riego de una manera localizada, logrando con ello la aplicación del agua sobre una zona restringida de volumen radicular, de manera que la inundación de la parcela es innecesaria y el desperdicio del agua no ocurre.

La instalación en México de sistemas móviles de riego por goteo de baja carga comenzó en el año de 1999. A partir de entonces, se han hecho pruebas en parcelas demostrativas, observándose los beneficios obtenidos en cuanto a productividad y economía. Así, el interés se centra en poder contar con un diseño que, siendo de bajo costo, sea capaz de regar de manera uniforme grandes extensiones de tierra con el mínimo caudal.

En el presente trabajo se estudia el diseño de sistemas de riego por goteo sobre un terreno plano, constituidos por redes de tuberías de polietileno con goteros comerciales de bajo costo. Las mangueras regantes o laterales están unidas a una manguera distribuidora principal de mayor diámetro que abastece de agua a la red mediante una conexión en "U" con el cabezal.

Este último se ubicará según la cantidad de distribuidoras que se desee instalar. Los sistemas son modulares, lo que significa que pueden replicarse para duplicar o triplicar el área total de riego, y cada módulo (de hasta cuatro mangueras distribuidoras) requiere de su propio cabezal.

El análisis hidráulico de las redes se realizó tomando en cuenta las ecuaciones de continuidad de todos los nudos que definen un sistema de una sola manguera distribuidora. Para satisfacer el principio de conservación de la energía, se consideraron tanto las pérdidas de energía entre tramos de tubería como las pérdidas locales debidas a la obstrucción del flujo de agua por los empalmes de los goteros. Con el establecimiento de la continuidad y el planteamiento de un sistema de ecuaciones cuyas incógnitas son las cargas piezométricas en los nudos, se hizo necesario el empleo de un programa que realizara los cálculos de manera rápida. El programa DISURT.EXE se utilizó como una herramienta para la solución del problema. Además, se determinó el valor de la uniformidad de emisión con la cual se estaría regando la plantación propuesta. Lo anterior es un aspecto de suma importancia, pues en la práctica del riego lo más importante es que todas las plantas reciban la misma cantidad de agua.

Durante los aforos para la obtención de las ecuaciones que relacionan los gastos emitidos por los goteros en función de la carga, se observó que los emisores de las marcas comerciales O-Tif e Hydrogol adquiridos pueden verter con regularidad, no obstante que se les someta a una carga inferior respecto a aquella para la cual fueron diseñados. Por ello, no resultó necesaria la adaptación de algún tanque elevado o una bomba para que el suministro del agua a la manguera distribuidora se realizara con 1 bar de presión (presión de diseño de los goteros). Por el contrario, las curvas de cargas-gastos obtenidas en laboratorio son válidas en el intervalo de 1 a 2 m, y por lo tanto, los diseños sugeridos deberán trabajar con una carga que se encuentre en este intervalo.

Como resultado inmediato del análisis del funcionamiento hidráulico, se obtuvieron diseños en los cuales se incrementa el área de riego conforme aumentan las separaciones entre plantas y líneas de riego. Así, existe una relación entre el área disponible y la cantidad de elementos del cultivo. Por otra parte, el gasto total requerido en parcela dependerá del tipo de gotero y

carga instalada, así como de la cantidad de plantas que deban regarse simultáneamente.

Se encontró que ante una variación de la carga en el cabezal, dentro del intervalo de estudio, y para un mismo cultivo y tipo de gotero, la magnitud de área de riego no cambia considerablemente (10%). Las variaciones de área dependen del tipo de emisor utilizado, pues al emplear goteros de la marca O-Tif de colores negro o café, es posible generar un aumento de la superficie de riego como consecuencia del incremento de carga sobre el cabezal. Esta situación es opuesta a la que ocurre con los sistemas integrados Hydrogol de colores verde o blanco. Sin embargo, en vista de que las variaciones resultaron mínimas, existe la posibilidad de regar una área importante, independientemente de la carga instalada.

Cuando se simuló el funcionamiento de los sistemas con goteros Hydrogol y O-Tif de color café con 1 m de carga, no fue posible analizar satisfactoriamente todos los valores para la separación entre laterales que se pretendía estudiar. Lo anterior se debió a que la presión propuesta resultó ser insuficiente para cubrir los requerimientos de los goteros más alejados del cabezal, cuando el sistema cuenta con una gran cantidad de laterales de máxima longitud. Por lo tanto, se sugiere prestar atención de las características de las redes en cuestión, de modo que se evite la colocación de un sistema tal que no garantice el riego adecuado de todas las plantas.

Se sugirieron dos parámetros adimensionales dados por $\frac{L_{max}}{Dx}$ y $\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$, como los parámetros adecuados para definir la estructura de los sistemas, ya que se relacionan estrechamente con el número óptimo de laterales. Los datos recabados durante las simulaciones se organizaron utilizando estos parámetros y se ajustaron mediante una regresión lineal múltiple. Esto permitió generar una ecuación útil para estimar la cantidad de mangueras regantes que deben instalarse sobre una manguera distribuidora.

Se verificó una falta de aproximación al comparar los números de laterales obtenidos con el modelo adimensional respecto a los números encontrados con el programa DISURT.EXE. De la comparación pudo advertirse que utilizar el modelo que representa a los cuatro tipos de goteros, puede ir en perjuicio de la uniformidad de riego preestablecida. Sin embargo, se observó que

los números de laterales de los sistemas con goteros Hydrogol y O-Tif de color café, seguían una misma tendencia tras la aplicación de una carga en el cabezal para el riego de un mismo cultivo. De esta manera, se concluyó que la variable más importante del fenómeno es el gasto del gotero, y por lo tanto, era conveniente la generación de modelos matemáticos que incluyeran la información de emisores cuyo gasto fuera similar ante una misma condición de carga.

Se construyeron dos modelos adimensionales, uno para las observaciones hechas del gotero O-Tif negro y otro formado a partir de los resultados de simulación con los emisores Hydrogol verde, blanco, y O-Tif café. Como el número de laterales de diseño para sistemas con gotero verde aún resultaba excesivo, se decidió que el modelo sería útil toda vez que se reduzca en una unidad a los laterales resultantes durante el diseño con este tipo de goteros. Al realizar una variación de los parámetros adimensionales incluidos en estas ecuaciones, se generaron curvas que sirven como herramientas para el diseño de sistemas. Las magnitudes de los parámetros que fungieron como valores extremos de los intervalos para el trazo de las curvas de diseño fueron los mismos que resultaron de la simulación con el programa de computadora.

Mediante el desarrollo de algunos ejemplos se mostró la facilidad y sencillez con la cual se pueden diseñar diversos sistemas, y el bajo costo que estos implican. Para llevarlos a cabo, únicamente deben conocerse las necesidades reales de agua del cultivo, para después elegir mediante un razonamiento adecuado, aquel que se ajuste a los intereses del agricultor. Se observó que la diferencia entre los diseños con manguera Hydrogol verde, blanco, o goteros O-Tif café no es muy significativa, ya que emiten gastos similares y el coeficiente de pérdida local para todos los emisores se consideró igual a 0.6. De ahí que la cantidad de laterales por distribuidora y las consecuentes áreas de riego sean semejantes. La elección de uno u otro modelo dependerá de la decisión que tome el usuario tras considerar ciertos aspectos, por ejemplo, el que los goteros Hydrogol son más susceptibles a la obturación definitiva por estar integrados a la manguera, mientras que los goteros O-Tif son desmontables. El manejo en campo de las mangueras Hydrogol es complicado, ya que el poco peso de éstas dificulta su traslado y movilidad. Por último, el costo de los materiales para la instalación de un sistema con goteros O-Tif es definitivamente más elevado.

Los diseño con emisores O-Tif negro son convenientes cuando sea necesario aprovechar un terreno de poca magnitud con un suministro de agua que ocurre en un espacio de tiempo muy breve. Como las labores de riego deben agilizarse, la instalación de goteros de color negro es ideal, pues los gastos emitidos son más altos, y los tiempos de riego son menores.

Finalmente, la alternativa de instalar sistemas semifijos o móviles resulta muy atractiva, pues los costos por unidad de área son muy bajos, y los gastos totales requeridos en parcela disminuyen notablemente. Además, aunque el tiempo requerido para el desarrollo de actividades en parcela sea mayor, aun pueden llevarse a cabo en el transcurso de una jornada normal de 8 horas. Así, puede preferirse un sistema de menor costo que requiera más mano de obra.

Para verificar el buen funcionamiento de un sistema diseñado con la información obtenida del programa DISURT.EXE, se realizaron pruebas de campo de un sistema con goteros O-Tif de color negro. Mediante una instalación simplificada se obtuvieron los gastos promedio de cada uno de los laterales de diseño, así como los coeficientes de variación de riego necesarios para realizar el cálculo de uniformidad de emisión de cada manguera. Se encontró que la uniformidad de emisión del sistema era del orden de 0.84, valor que advierte sobre la variabilidad de fabricación de los goteros y los cambios de presión en la tubería por pérdidas de energía.

Debido a que los gastos promedio de los goteros aforados en campo fueron superiores con respecto a los obtenidos con el empleo del programa de computadora, se practicó una calibración del código numérico en lo que respecta al coeficiente de pérdida local de los emisores de la red diseñada para validación. El coeficiente α se hizo variar progresivamente hasta que las magnitudes de gastos como solución de la red de tuberías correspondieron con los resultados de las pruebas de campo. Entonces, el coeficiente de pérdida local de los goteros O-Tif es de 0.46 y el valor de 0.6 utilizado en la generación de los resultados de simulación resulta excesivo. Sin embargo, esta situación no modifica sustancialmente el diseño óptimo de los sistemas porque el consecuente incremento de la uniformidad de emisión no es suficiente para aumentar el número de puntos de riego en los laterales.

Por último, se solicitó información de los costos de algunos sistemas de riego por goteo. Los grandes fabricantes cuentan ya con equipos que sugieren para el riego de una determinada área. Para garantizar la uniformidad de emisión de las cosechas, ofrecen una asesoría técnica durante la instalación, asegurándose de que la longitud de las mangueras regantes no supere una magnitud que previamente han establecido como máxima. De esta manera, los materiales que se entregan como parte de una venta no corresponden con aquellos que se requerirían para instalar un sistema con características óptimas.

Los distribuidores de materiales para sistemas de irrigación brindan un servicio de diseño de acuerdo con el cultivo y las dimensiones del terreno que se desee irrigar. Dado que no cuentan con una herramienta de diseño como la presentada en este trabajo, tienen la necesidad de seguir diligentemente las indicaciones adjuntas a los productos que los fabricantes les entregan. Ellos aseguran que con el solo cumplimiento de la carga de diseño para los goteros, se logrará una eficiencia de aplicación del 90%. No obstante, sabemos que la eficiencia de aplicación es la relación entre el agua requerida en la zona radicular y el agua aplicada, y por lo tanto, esta eficiencia depende tanto del cumplimiento oportuno de las actividades agronómicas como de la uniformidad del riego.

En cuestión de costos, se mostró que una comparación significativa entre equipos debe tomar en cuenta la cantidad de plantas que pueden regarse de manera simultánea sobre un mismo terreno, quedando de manifiesto la conveniencia en la elección del sistema fijo sugerido por el autor. Adicionalmente, se resaltó la posibilidad de generar una gran variedad de diseños útiles de los cuales, se podrá elegir alguno en función de las dimensiones del terreno y del tiempo en el cual deban desarrollarse las actividades de riego.

Es así como este trabajo ilustra de manera práctica y conveniente, el diseño de sistemas de riego por goteo de baja carga en parcelas pequeñas, que será de utilidad para el agricultor que necesite regar de manera adecuada algún cultivo que deba ubicarse sobre un terreno plano, a distancias para las cuales se tenga la posibilidad de utilizar los modelos matemáticos o curvas de diseño presentadas.

Apéndice A

RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO

Tabla A.1: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): 1.1264 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	88	654.72	3.1	0.0212
9	88	508.464	2.14	0.0536
10	88	401.28	1.52	0.1262
11	88	319.44	1.1	0.2833
12	88	259.776	0.82	0.5906
13	88	209.352	0.61	1.2374

Tabla A.2: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): 1.1264 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	70	1039.5	3.3	0.0181
10	70	833	2.38	0.0411
11	70	673.75	1.75	0.0887
12	70	554.4	1.32	0.1796
13	70	459.55	1.01	0.3508
14	70	382.2	0.78	0.6693
15	70	320.25	0.61	1.2374

Tabla A.3: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): 1.1264 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	60	1488	3.1	0.0212
11	60	1214.4	2.3	0.0448
12	60	1008	1.75	0.0887
13	60	848.64	1.36	0.1667
14	60	712.32	1.06	0.3108
15	60	604.8	0.84	0.5561
16	60	514.56	0.67	0.9787
17	60	440.64	0.54	1.6783

Tabla A.4: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.5357 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	166	1271.88	3.2	0.0093
9	166	1008.45	2.25	0.0225
10	166	771.9	1.55	0.0571
11	166	624.49	1.14	0.1232

Tabla A.5: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.5357 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	136	1958.4	3.2	0.0093
10	136	1570.8	2.31	0.0210
11	136	1286.56	1.72	0.0440
12	136	1060.8	1.3	0.0887
13	136	884	1	0.1710
14	136	742.56	0.78	0.3183

Tabla A.6: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.5357 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	114	2918.4	3.2	0.0093
11	114	2397.64	2.39	0.0193
12	114	2002.75	1.83	0.0377
13	114	1659.84	1.4	0.0737
14	114	1404.48	1.1	0.1347
15	114	1203.84	0.88	0.2354
16	114	1021.44	0.7	0.4172
17	114	868.224	0.56	0.7288

Tabla A.7: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.4671 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	157	1130.4	3	0.0095
9	157	868.99	2.05	0.0247
10	157	682.95	1.45	0.0589
11	157	544.00	1.05	0.1320
12	157	440.85	0.78	0.2775

Tabla A.8: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.4671 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	127	1828.8	3.2	0.0081
10	127	1460.5	2.3	0.0185
11	127	1187.45	1.7	0.0395
12	127	975.36	1.28	0.0804
13	127	808.99	0.98	0.1568
14	127	666.75	0.75	0.3061
15	127	561.97	0.59	0.5577

Tabla A.9: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.4671 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	105	2688	3.2	0.0081
11	105	2236.08	2.42	0.0163
12	105	1864.8	1.85	0.0320
13	105	1528.8	1.4	0.0643
14	105	1317.12	1.12	0.1123
15	105	1121.4	0.89	0.1995
16	105	954.24	0.71	0.3511
17	105	813.96	0.57	0.6079

Tabla A.10: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.349 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{3/2}q^{1/2}}$
8	184	1324.8	3	0.0071
9	184	1013.47	2.04	0.0187
10	184	794.88	1.44	0.0447

Tabla A.11: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.349 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{3/2}q^{1/2}}$
9	151	2174.4	3.2	0.0060
10	151	1736.5	2.3	0.0138
11	151	1411.85	1.7	0.0295
12	151	1159.68	1.28	0.0601
13	151	961.87	0.98	0.1172

Tabla A.12: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 1 m. Gasto promedio (Q): $0.349 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{3/2}q^{1/2}}$
10	125	3210	3.21	0.0060
11	125	2640	2.4	0.0124
12	125	2160	1.8	0.0256
13	125	1820	1.4	0.0480
14	125	1540	1.1	0.0878
15	125	1320	0.88	0.1533

Tabla A.13: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): $1.3894 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	89	661.29	3.11	0.0260
9	89	511.83	2.13	0.0670
10	89	408.51	1.53	0.1532
11	89	326.00	1.11	0.3417
12	89	262.72	0.82	0.7285
13	89	211.73	0.61	1.5264

Tabla A.14: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): $1.3894 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	73	1067.62	3.25	0.0233
10	73	857.75	2.35	0.0524
11	73	694.59	1.73	0.1126
12	73	569.4	1.3	0.2302
13	73	469.75	0.99	0.4548
14	73	388.36	0.76	0.8809
15	73	323.02	0.59	1.6590

Tabla A.15: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): $1.3894 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	62	1552.48	3.13	0.0255
11	62	1271.24	2.33	0.0535
12	62	1053.50	1.77	0.1064
13	62	883.37	1.37	0.2019
14	62	743.00	1.07	0.3745
15	62	624.96	0.84	0.6859
16	62	531.71	0.67	1.2072
17	62	446.89	0.53	2.1692

Tabla A.16: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.6546 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	171	1313.28	3.2	0.0114
9	171	1015.74	2.2	0.0291
10	171	815.67	1.59	0.0655
11	171	654.67	1.16	0.1442
12	171	529.41	0.86	0.3047
13	171	426.81	0.64	0.6378

Tabla A.17: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.6546 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	144	2106	3.25	0.0109
10	144	1663.2	2.31	0.0257
11	144	1354.32	1.71	0.0546
12	144	1114.56	1.29	0.1105
13	144	926.64	0.99	0.2143
14	144	776.16	0.77	0.4017
15	144	637.2	0.59	0.7816

Tabla A.18: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.6546 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	119	3065.44	3.22	0.0112
11	119	2501.80	2.39	0.0236
12	119	2090.59	1.83	0.0461
13	119	1757.39	1.42	0.0869
14	119	1479.40	1.11	0.1610
15	119	1270.92	0.89	0.2796
16	119	1081.47	0.71	0.4920
17	119	906.30	0.56	0.8905

Tabla A.19: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.6465 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	150	1080	3	0.0132
9	150	830.25	2.05	0.0343
10	150	652.5	1.45	0.0815
11	150	519.75	1.05	0.1827
12	150	421.2	0.78	0.3841
13	150	339.3	0.58	0.8056

Tabla A.20: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.6465 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	120	1728	3.2	0.0112
10	120	1380	2.3	0.0257
11	120	1122	1.7	0.0547
12	120	914.4	1.27	0.1135
13	120	756.6	0.97	0.2227
14	120	630	0.75	0.4237
15	120	531	0.59	0.7719

Tabla A.21: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.6465 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	100	2560	3.2	0.0112
11	100	2068	2.35	0.0243
12	100	1728	1.8	0.0474
13	100	1456	1.4	0.0890
14	100	1209.6	1.08	0.1702
15	100	1041	0.87	0.2923
16	100	870.4	0.68	0.5413
17	100	748	0.55	0.9200

Tabla A.22: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.5067 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$
8	172	1238.4	3	0.0103
9	172	947.37	2.01	0.0272
10	172	737.88	1.43	0.0661
11	172	595.98	1.05	0.1432
12	172	482.97	0.78	0.3010
13	172	389.06	0.58	0.6314

Tabla A.23: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.5067 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$
9	138	1987.2	3.2	0.0088
10	138	1587	2.3	0.0201
11	138	1290.3	1.7	0.0429
12	138	1051.56	1.27	0.0890
13	138	870.09	0.97	0.1745
14	138	734.16	0.76	0.3212
15	138	610.65	0.59	0.6050

Tabla A.24: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 1.5 m. Gasto promedio (Q): 0.5067 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$
10	115	2944	3.2	0.0088
11	115	2428.8	2.4	0.0181
12	115	1987.2	1.8	0.0372
13	115	1674.4	1.4	0.0697
14	115	1416.8	1.1	0.1274
15	115	1200.6	0.87	0.2291
16	115	1015.68	0.69	0.4090
17	115	860.2	0.55	0.7211

Tabla A.25: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): 1.6128 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$
8	90	669.6	3.1	0.0304
9	90	515.16	2.12	0.0786
10	90	410.4	1.52	0.1807
11	90	326.7	1.1	0.4057
12	90	262.44	0.81	0.8720
13	90	210.6	0.6	1.8465

Tabla A.26: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): 1.6128 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$
9	74	1078.92	3.24	0.0272
10	74	869.5	2.35	0.0608
11	74	700.04	1.72	0.1327
12	74	572.76	1.29	0.2724
13	74	476.19	0.99	0.5280
14	74	393.68	0.76	1.022
15	74	327.45	0.59	1.9258

Tabla A.27: Gotero O-Tif negro. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): 1.6128 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}g^{1/2}}$
10	63	1597.68	3.17	0.0287
11	63	1302.84	2.35	0.0608
12	63	1088.64	1.8	0.1184
13	63	910.72	1.39	0.2260
14	63	762.04	1.08	0.4248
15	63	642.6	0.85	0.7730
16	63	540.28	0.67	1.4013
17	63	462.67	0.54	2.4030

Tabla A.28: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): $0.7539 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	173	1328.64	3.2	0.0131
9	173	1027.62	2.2	0.0335
10	173	804.45	1.55	0.0804
11	173	650.82	1.14	0.1734
12	173	529.38	0.85	0.3613
13	173	425.06	0.63	0.7640

Tabla A.29: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): $0.7539 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	148	2132.2	3.2	0.0131
10	148	1665	2.25	0.0317
11	148	1367.52	1.68	0.0658
12	148	1118.88	1.26	0.1350
13	148	913.9	0.95	0.2736
14	148	766.64	0.74	0.5109
15	148	632.7	0.57	0.9812

Tabla A.30: Gotero O-Tif café. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): $0.7539 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	125	3200	3.2	0.0131
11	125	2629	2.39	0.0272
12	125	2208	1.84	0.0524
13	125	1820	1.4	0.1037
14	125	1540	1.1	0.1896
15	125	1305	0.87	0.3409
16	125	1104	0.69	0.6086
17	125	935	0.55	1.0729

Tabla A.31: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): $0.8132 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	143	1029.6	3	0.0166
9	143	772.2	2	0.0459
10	143	609.18	1.42	0.1080
11	143	486.05	1.03	0.2411
12	143	380.95	0.74	0.5511
13	143	312.31	0.56	1.1063

Tabla A.32: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): $0.8132 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	117	1684.8	3.2	0.0141
10	117	1345.5	2.3	0.0323
11	117	1068.21	1.66	0.0731
12	117	877.5	1.25	0.1486
13	117	722.47	0.95	0.2951
14	117	606.06	0.74	0.5511
15	117	500.17	0.57	1.0584

Tabla A.33: Gotero Hydrogol verde. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): $0.8132 \frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	96	2457.6	3.2	0.0141
11	96	1976.83	2.34	0.0310
12	96	1640.44	1.78	0.0614
13	96	1367.80	1.37	0.1181
14	96	1150.46	1.07	0.2192
15	96	979.2	0.85	0.3897
16	96	823.29	0.67	0.7066
17	96	705.02	0.51	1.2116

Tabla A.34: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): 0.6587 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.3 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
8	163	1173.6	3	0.0134
9	163	897.80	2.04	0.0353
10	163	699.27	1.43	0.0860
11	163	559.41	1.04	0.1906
12	163	445.96	0.76	0.4176
13	163	355.99	0.56	0.8961

Tabla A.35: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): 0.6587 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.5 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
9	130	1872	3.2	0.0114
10	130	1501.5	2.31	0.0259
11	130	1222.65	1.71	0.0550
12	130	998.4	1.28	0.1134
13	130	828.1	0.98	0.2212
14	130	691.6	0.76	0.4176
15	130	575.25	0.59	0.7865

Tabla A.36: Gotero Hydrogol blanco. Carga en el cabezal: 2 m. Gasto promedio (Q): 0.6587 $\frac{l}{h}$. Separación entre emisores (Dx): 0.8 m

N_{op}	$NE = \frac{L_{max}}{Dx}$	ÁREA (m ²)	SL (m)	$\frac{Q}{SL^{5/2}q^{1/2}}$
10	108	2674.8	3.2	0.0114
11	108	2233.41	2.35	0.0248
12	108	1866.24	1.8	0.0483
13	108	1538.78	1.37	0.0957
14	108	1306.36	1.08	0.1735
15	108	1101.6	0.85	0.3157
16	108	940.03	0.68	0.5515
17	108	807.84	0.55	0.9374

Apéndice B

IMÁGENES

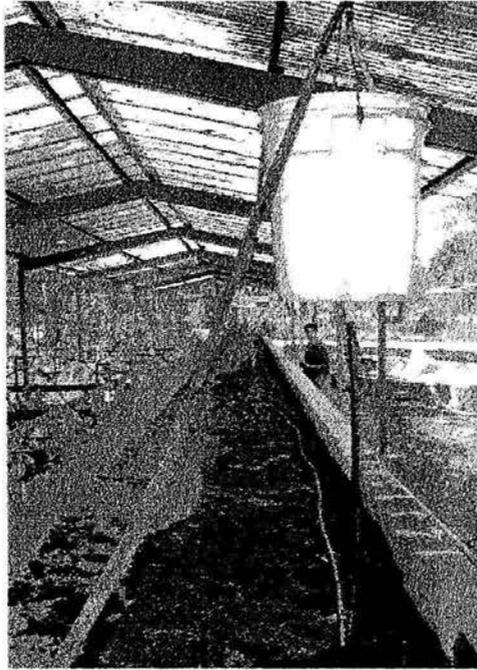


Figura ~B-1: Cabezal conectado a una manguera lateral. Ensayos para el aforo de goteros O-Tif negro con carga en el cabezal de 1.31 m.



Figura ~B-2: Manguera lateral con emisiones a cada 0.3 m. Ensayos para el aforo de 89 goteros O-Tif negro.

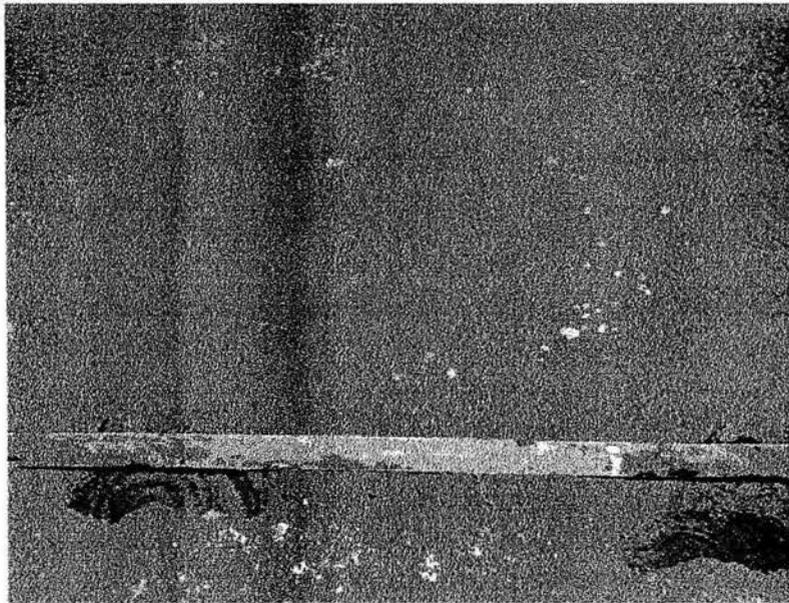


Figura B-3: Goteros O-Tif negro insertados sobre una manguera lisa de 17 mm de diámetro nominal. Separación entre emisores de 0.3 m.

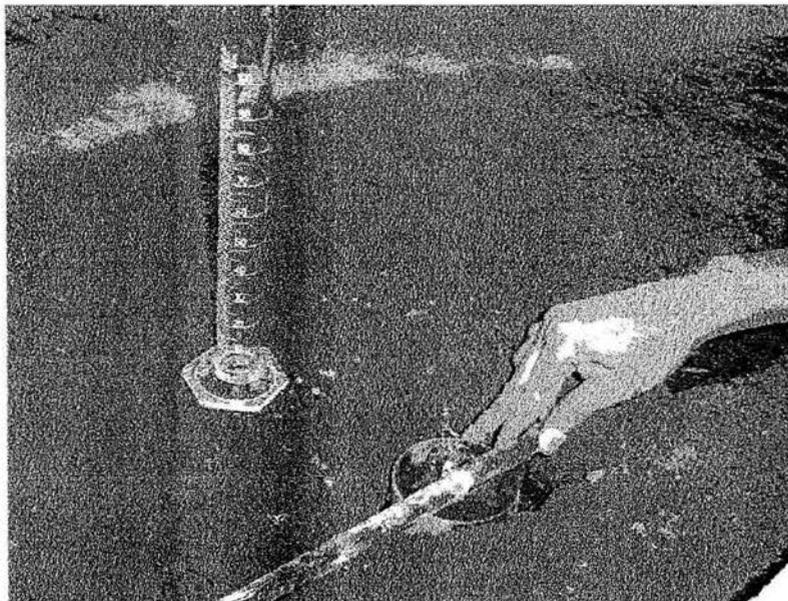


Figura B-4: Aforo del gasto emitido por un gotero O-Tif negro.

Bibliografía

- [1] Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., Pumo, D. Experimental Study on Flow-Resistance Law for Small-Diameter Plastic-Pipes. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 121, No. 5, 1995.
- [2] Bagarello, V., Ferro, V., Provenzano, G., Pumo, D. Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 123, No. 1, 1997.
- [3] Cuenca, R. *Irrigation System Design. An Engineering Approach*. Prentice Hall, Inc. New Jersey, USA, 1989.
- [4] González F. *Sistemas de riego tecnificado en pequeñas parcelas. Marco de referencia. Informe interno del Instituto de Ingeniería. UNAM.*
- [5] Juárez, E., Rico, A. *Mecánica de Suelos. Tomo 1. Editorial Limusa, México, 2000.*
- [6] Moya, J. *Riego Localizado y Fertirrigación. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 1994.*
- [7] Polak, P. *Saving Water in Agriculture through Low Cost Drip and Sprinkler Irrigation. Documento personal, 1998.*
- [8] Rodrigo, J., Hernández, J., Pérez, A., González, J. *Riego Localizado. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España, 1992.*
- [9] Simon, A. *Hidráulica Básica. Editorial Limusa, México, 1994.*
- [10] Sotelo, G. *Hidráulica General. Volumen 1. Editorial Limusa, México, 1999.*

- [11] Vázquez, E., de la Cruz, R., López, P., Sifuentes, M., Vélez, L. Diseño e instalación de sistemas de riego tecnificado de baja carga en pequeñas parcelas. Series del Instituto de Ingeniería, CI-11, UNAM, 2000.
- [12] Vázquez, E., López, P. Criterio para el diseño hidráulico óptimo de sistemas de riego por goteo de baja carga. Series del Instituto de Ingeniería, CI-24, UNAM, 2002.
- [13] Walpole, R., Myers, R. Probabilidad y estadística. Editorial McGraw-Hill, México, 1998.
- [14] White, F. Mecánica de Fluidos. Editorial McGraw-Hill, México, 1995.