

01162



**COORDINACIÓN DE HIDRÁULICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

***ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN
SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA***

POR:

LUIS ALFONSO ORTIZ NUÑEZ

TESIS

**PRESENTADA A LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**COMO REQUISITO PARA OBTENER
EL GRADO DE**

MAESTRO EN INGENIERÍA HIDRÁULICA

DIRECTOR DE TESIS: DR. GABRIEL ECHÁVEZ ALDAPE

CIUDAD UNIVERSITARIA

AGOSTO DE 1997

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza el funcionamiento de un sistema eficiente de riego, desde el punto de vista de ahorro de agua y simplicidad en sus componentes hidráulicos. El sistema aquí denominado Riego Presurizado de Baja Carga (RPBC) se compara con sistemas similares a este; resaltando las ventajas que presenta frente a los otros sistemas de riego por goteo o microirrigación.

Con base en datos experimentales llevados a cabo en las Universidades Autónoma de Coahuila, Autónoma de la Laguna y Nacional Autónoma de México, se determinaron geometrías, dimensiones y comportamiento hidráulico de Laterales y Emisores del sistema de RPBC, se verificó de manera cualitativa y cuantitativa el funcionamiento de los mismos.

A partir de los resultados experimentales y la aplicación sistemática de técnicas de experimentación y de ajuste numérico, se desarrollaron ecuaciones que representan, dentro de un margen de error adecuado, el comportamiento de las variables más relevantes en el funcionamiento del RPBC: Diámetros, longitudes, geometrías, temperatura (viscosidad), cargas y caudales. Se abre de esta manera una alternativa de habilitación de zonas de riego donde las limitaciones son la disponibilidad de agua y altos costos que conllevan la implantación de sistemas de riego por goteo o microirrigación.

Se concluye que conformando redes abiertas, con laterales has de 100 metros de longitud, y con emisores separados a cada metro; se pueden obtener caudales de 2 a 8 l/h en cada emisor, con cargas al inicio de cada lateral menores de un metro .

Se recomiendan en la utilización del sistema de RPBC, diámetros de $\frac{1}{2}$ o $\frac{3}{4}$ " para laterales y de $\frac{1}{8}$ " de diámetro para emisores, y en la interconexión lateral - emisor, una inserción directa del emisor en el lateral.

DEDICATORIA

Este trabajo, al igual que todos mis frutos están dedicados a aquel Ángel, "Matilde Nuñez" que en algunas noches me cubre con sus alas azules, y de día me observa y me guía por todos los caminos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer de todo corazón al Dr. Gabriel Echávez Aldape, por la dirección del presente trabajo y sobre todo por transmitirme algunos de sus conocimientos y enseñanzas. Al grupo de sinodales, por la revisión y sugerencias hechas al documento, a Heazel Gama Silva, por sus valiosos comentarios, a las coordinaciones de Hidráulica y Mecánica Fluidos y Térmica del Instituto de Ingeniería, por facilitarme el equipo de computo.

Agradezco a la Dirección de Intercambio Académico y Becas, ya que esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca otorgada por el Gobierno de México, por medio de la Secretaría de Relaciones Exteriores, en el marco del programa de movilidad universitaria de tercer ciclo para Iberoamericanos (programa MUTIS).

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. OBJETIVOS	3
2. CONCEPTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO SIMILARES AL RPBC	4
2.1. EMISORES EN LOS SISTEMAS CONVENCIONALES DE RIEGO POR GOTEO	6
2.1.1. DEFINICIONES	6
2.2. REQUERIMIENTOS BÁSICOS	6
2.3. ASPECTOS HIDRÁULICOS	7
2.3.1. PÉRDIDA DE CARGA POR CONEXIÓN	10
2.3.1.1. CONEXIÓN INTERLÍNEA	11
2.3.1.2. CONEXIÓN SOBRE LÍNEA	11
2.3.1.3. Conexión Sobre Línea con Alargadora	11
2.3.1.4. SISTEMAS INTEGRADOS	11
2.4. COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE FABRICACIÓN	14
2.5. SENSIBILIDAD A LAS OBTURACIONES	16
2.6. SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA	18
2.6.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y MEDICIONES	19
2.7. CLASIFICACIÓN DE EMISORES	22
2.7.1. GOTEROS	22
2.7.1.1. DE LARGO CONDUCTO	22

2.7.1.2. DE LABERINTO	23
2.7.1.3. DE ORIFICIO	23
2.7.1.4. DE TIPO VORTEX	23
2.7.1.5. AUTOCOMPENSANTES	24
2.7.1.6. AUTOLIMPIANTES	24
2.7.1.7. SISTEMAS INTEGRADOS	25
2.7.2. TUBERÍAS EMISORAS	25
2.7.2.1. MANGUERAS POROSAS	25
2.7.2.2. MAÑGUERAS DE DOBLE PARED	26
2.7.2.3. MANGUERAS CORRUGADAS	26
2.7.2.4. MANGUERAS PERFORADAS	26
2.7.3. DIFUSORES Y MINIAPERSORES	26
2.7.3.1. DE LARGO CONDUCTO	26
2.7.3.2. DE ORIFICIO	27
2.7.3.3. VORTEX	28
2.7.3.4. AUTOCOMPENSANTES	28
2.8. APARATOS DE CONTROL: REGULADORES DE PRESIÓN Y DE CAUDAL	28
2.8.1. REGULADORES DE CAUDAL	29
2.8.1.1. CAUDALES Y PRESIONES DE TRABAJO	30
2.8.1.1.1. RECOMENDACIONES Y USOS	32
2.8.2. REGULADORES DE PRESIÓN	32
2.8.2.1. CAUDALES Y PRESIONES DE TRABAJO	33
2.8.2.1.1. RECOMENDACIONES Y USOS	33
2.9. OTROS DISPOSITIVOS DE CONTROL	34
2.9.1. MANÓMETROS	34
2.9.2. ROTÁMETROS	34
2.9.3. CONTADORES DE AGUA	34
3. APROXIMACIONES INICIALES A LA PROBLEMÁTICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL RPBC	36
3.1. CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	36
3.2. ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO	38
3.3. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR "f" DE FRICCIÓN	38
3.3.1. ECUACIÓN EXPLÍCITA PARA EL FACTOR DE FRICCIÓN	40
3.4. DEFINICIÓN DEL RANGO DE CARGAS EN UN LATERAL DEL RPBC	41
ÍNDICE GENERAL	VI

3.5. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE CAMPO	45
3.5.1. PLANTEAMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA LÍNEA LATERAL EN EL PROTOTIPO	45
3.5.1.1. DISPOSITIVO DE ALIMENTACIÓN Y DE CARGA CONSTANTE	45
3.5.1.2. TRAMO DE PRUEBA	45
3.6. ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LOS EMISORES	47
3.6.1. VERTEDOR CIRCULAR, (4" DE DIÁMETRO)	47
3.6.2. RECIPIENTE COLECTOR	47
3.6.3. TUBO HORIZONTAL DE CARGA	47
3.6.4. Dispositivo de Regulación	48
3.6.5. TRANSICIÓN	48
3.6.6. LATERAL DE PRUEBA	48
3.6.7. UNIÓN LATERAL EMISOR	48
3.6.8. EMISOR	49
3.6.9. LÍMNIMETRO GRADUABLE	50
3.6.10. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA	50
4. EXPERIMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE RPBC	52
4.1. INSTALACIÓN EXTERNA PARA EL ESTUDIO DE LAS TUBERÍAS LATERALES	52
4.1.1. MEDICIONES EN LA INSTALACIÓN EXTERNA	55
4.1.2. ESTIMACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO EN EL RPBC	55
4.1.3. PRUEBAS EFECTUADAS	56
4.2. INSTALACIÓN DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE LOS EMISORES	62
4.2.1. MEDICIONES EN LA INSTALACIÓN DE LABORATORIO	62
4.2.2. PRUEBAS EFECTUADAS	64
4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN	72
4.3.1. FUNCIONAMIENTO DE LAS LÍNEAS LATERALES.	72
4.3.2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS EMISORES.	73
4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
4.5. CALIBRACIÓN DE EMISORES	83
4.6. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE CÁLCULO	88
4.6.1. AJUSTE DEL MODELO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE EMISORES	89
4.7. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO EN EL RPBC	91
4.8. FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DEL RPBC	92
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	95

APÉNDICE TUBERÍAS, PRINCIPAL COMPONENTE DEL SISTEMA DE RPBC	97
GENERALIDADES	97
MATERIALES	97
PRESIONES	98
TUBOS PVC (POLICLORURO DE VINILO NO PLASTIFICADO)	99
TUBOS DE PVC	99
CARACTERÍSTICAS GENERALES, GEOMÉTRICAS, TÉRMICAS Y QUÍMICAS DEL PVC	99
CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL PVC	100
TUBOS DE POLIETILENO (PE)	100
POLIETILENO (PE) Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)	100
CARACTERÍSTICAS GENERALES GEOMÉTRICAS, TÉRMICAS Y QUÍMICAS DE LOS TUBOS DE PE	100
CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS	101
JUNTAS	101
JUNTAS PARA TUBOS DE PVC	101
JUNTAS POR AJUSTE A PRESIÓN.	101
JUNTAS ELÁSTICAS	102
JUNTAS PARA TUBOS DE PE, MDPE Y HDPE.	102
ACCESORIOS HIDRÁULICOS MÁS COMUNES (PIEZAS ESPECIALES)	102
ELEMENTOS SINGULARES	103
COLLAR DE TOMA DE ENLACE PARA LOS LATERALES	103
Tapón Final o Cierre de las Líneas Laterales	104
VÁLVULA DE DESCARGA O DE DRENAJE	104
Pruebas y Tolerancias	104
PRUEBAS EN CAMPO	105
PRUEBA A PRESIÓN INTERIOR	105
PRUEBA DE ESTANQUEIDAD	105
ENSAYOS ESPECÍFICOS PARA TUBERÍAS DE PE EN RIEGOS POR GOTEO	106
BIBLIOGRAFÍA	108

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Aunque los antecedentes de riego localizado son muy extensos, a continuación se mencionan sólo los relacionados con el tipo de riego de interés en este trabajo y exclusivamente desde el punto de vista hidráulico, sin tocar los temas que corresponderían a otras especialidades.

El riego localizado, del cual el riego por goteo es una variante, se ha venido desarrollando desde hace aproximadamente 25 años y consiste en la aplicación del agua en una zona restringida del volumen radicular, al no mojar la totalidad del suelo y utilizar pequeños caudales con la frecuencia necesaria, el permite obtener altas eficiencias en el uso del agua, muy superiores a las utilizadas con los sistemas de riego tradicionales (gravedad, aspersión).

Benami y Ofen (1984), reportan que en el riego por goteo tradicional, se usan cargas de alrededor de 10 a 20 m y emisores cuya función es disipar el exceso de energía para poder lograr un caudal uniforme y constante a la salida de ellos. Los emisores de interés aquí son los goteros, que son de hecho emisores que descargan caudales inferiores a 16 l/h y que pueden tener configuraciones muy variadas: Largo conducto, laberinto, de orificio, de tipo vortex, etc., entre estos, el que interesa en este trabajo es el de tipo de largo conducto también conocido como microtubo.

López et al (1992) mencionan que en esta clase de goteros, la pérdida de carga tiene lugar en un largo conducto (de hasta 2 m de longitud) y de pequeño diámetro (de 0.5 a 2 mm), y que el flujo dentro del emisor es laminar pero que debido a la influencia de entrada y salida las fórmulas teóricas que podrían aplicarse no se ajustan a la realidad, y también se observa que es interesante conocer que con microtubos de 1.5 mm y pequeña longitud (unos 30 cm) se consiguen instalaciones muy sencillas y poco costosas, pudiéndose alcanzar una buena uniformidad de aplicación, aunque los caudales unitarios, de hasta 20 l/h, pudieran parecer altos. En estos casos la sensibilidad a obturación es prácticamente nula, por lo que se pueden instalar estaciones de filtrado muy sencillas.

Dos aspectos críticos del funcionamiento de este tipo de emisores (de largo conducto), es su sensibilidad a las obturaciones y a los cambios de temperatura. Se ha encontrado que tal vez el problema principal de estos goteros es que se obturan con partículas sólidas o con sales que van disueltas en el agua. Este problema se reduce si no se utilizan diámetros demasiado pequeños.

En cuanto a la sensibilidad a la temperatura, que se presenta cuando las tuberías están expuestas al sol, se han propuesto diversas fórmulas, tanto lineales como exponenciales, para describir su comportamiento. Sin embargo, dado la complejidad del flujo, no se puede considerar que está totalmente resuelto este problema.

Unido a lo anterior se tiene que en grandes extensiones áridas y semiáridas donde una limitación importante es la cantidad de agua disponible, además dado el creciente consumo de agua a nivel mundial y teniendo en cuenta que el rubro más importante de consumo de agua lo posee el uso agrícola (ver Figura 1.1), es de gran importancia desarrollar sistemas que permitan ahorrar agua utilizándola en forma más eficiente. Estos sistemas además del objetivo anterior, deben ser de tecnología apropiada, que satisfagan los requisitos fundamentales siguientes: Bajo costo, poseer tecnología accesible y con bajo consumo de energía en la operación.

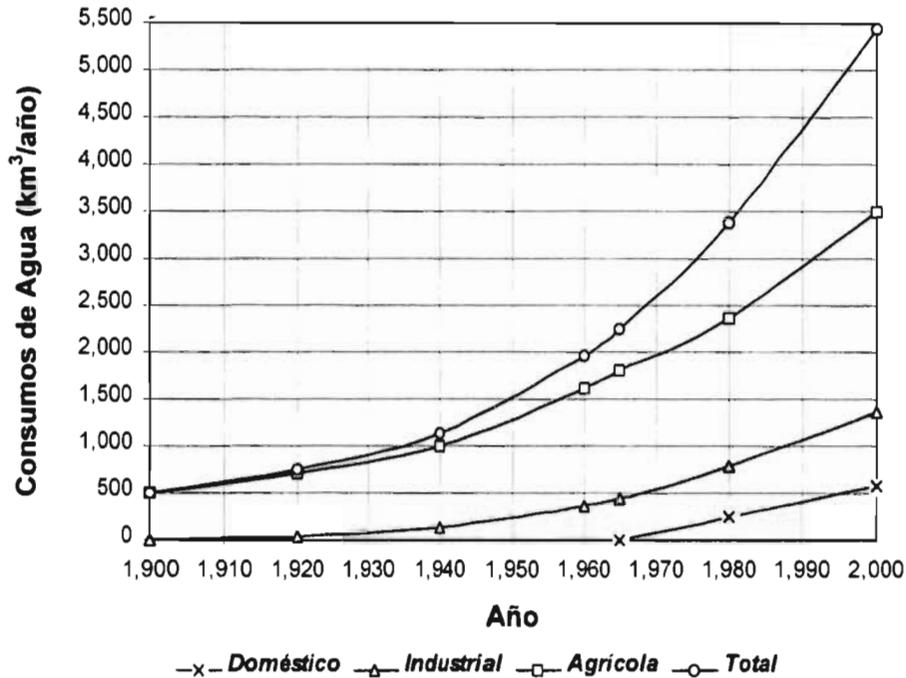


Figura 1.1. Consumos de agua a nivel mundial. Importancia del uso agrícola respecto de otros rubros.

Un sistema que permite cumplir con las condiciones anteriores es el Riego Presurizado de Baja Carga (RPBC). Con este tipo de riego por goteo, el agua se aplica por medio de una extensa red de tuberías de plástico, PVC, o bien usando las distintas variedades de conductos de polietileno, que pueden estar sobre la superficie de suelo o enterradas a poca profundidad, y a las que pueden estar conectadas mangueras emisoras, cuya descarga se controla por medio de su misma longitud, o por medio de ascenso o descenso de su extremo final (como se ve en el desarrollo del presente trabajo).

En el RPBC, se trabaja con cargas de 1 a 2 m y aún menores, a diferencia del riego por goteo tradicional donde se utilizan cargas de alrededor de 10 a 20 m, que finalmente hay que disipar por medio de goteros o aspersores. Además, el emisor o gotero es una pieza de costo mucho menor que el gotero tradicional, que se basa, generalmente en conductos capilares que fácilmente se obstruyen con impurezas y

depósitos de sales, y que por lo general son productos de importación. Otra ventaja es que se reduce considerablemente e inclusive puede eliminar la necesidad de filtración, y facilita la aplicación de una técnica de optimización de cultivos denominada ferti-irrigación.

1.2. OBJETIVOS

- Determinar las características generales básicas de sistemas de riego localizados comparables con el RPBC; buscando establecer de esta manera las semejanzas y diferencias más relevantes, así como las ventajas y desventajas. Lo anterior con el fin de enmarcar el trabajo aquí presentado con los desarrollos similares a éste, y que están reportados en la literatura técnica a nivel internacional.
- Utilizar como herramienta básica para el desarrollo del presente trabajo la experimentación, tanto en modelo como en prototipo, para de esta forma acotar el rango de caudales y de cargas, elegir geometrías adecuadas para la interconexión entre laterales y emisores y, además, estudiar las variables más relevantes en el funcionamiento del sistema de RPBC.
- Estudiar en conjunto la factibilidad, desde el punto de vista hidráulico, de la implantación del sistema de RPBC. Estableciendo un precedente para futuros desarrollos en la búsqueda de sistemas de riego eficientes desde el punto de vista de consumo de agua y de costos.
- Plantear la utilización de dispositivos sencillos y económicos para suministrar agua a cultivos que requieran dosis de riego que varíen de 2 a 8 l/h por punto de emisión.
- Establecer una metodología para el diseño del sistema de RPBC, la cual se implementa con base en valores experimentales, que determinan el funcionamiento hidráulico del sistema aquí implementado.
- Al obtener el comportamiento de los emisores, respecto de la energía disponible en la interconexión lateral - emisor, para diferentes longitudes de mangueras.
- Analizar las características más significativas de las tuberías hechas en PVC o en las diversas variedades de polietileno, dada la importancia que tienen estas por ser el principal componente del sistema de RPBC.

2. CONCEPTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE RIEGO SIMILARES AL RPBC

Riego presurizado por goteo, también denominado internacionalmente como riego localizado microirrigación, es la aplicación del agua al suelo, en una zona más o menos restringida del volumen radicular. Se caracteriza básicamente por que:

- No moja, en general, la totalidad del suelo, aplicando el agua sobre o bajo su superficie.
- Utiliza pequeños caudales a baja presión.
- Aplica el agua en la proximidad de las plantas a través de un número variable de puntos de emisión, que en algunos casos puede ser alto.
- Al reducir el volumen de suelo mojado y, por tanto, su capacidad de almacenamiento de agua, se opera con la frecuencia necesaria para mantener un alto contenido de humedad en el suelo (riego de alta frecuencia).

Aunque pueden diseñarse sistemas de riego a base de modificar los sistemas convencionales de riego de superficie (inundación, infiltración, etc.), el RPBC puede ser comparado con instalaciones fijas a presión, que incluyen una serie de variantes tales como el goteo, el riego subterráneo, la difusión y la miniaspersión.

Tal y como se conoce el riego por goteo aplica el agua con caudales no superiores a 16 l/h por punto de emisión o metro lineal de manguera de goteo. Mientras que el riego por difusores o miniaspersores, son sistemas con caudales generalmente inferiores a los 200 l/h por punto de emisión, con emisores que se denominan difusores cuando se trata de toberas fijas y miniaspersores cuando disponen de alguna parte que tiene un movimiento de rotación y su alcance efectivo no supera los 3 m. Paralelamente también existe el riego subterráneo que se caracteriza por la aplicación del agua bajo la superficie del suelo, con caudales bajos, generalmente similar al del riego por goteo. Este último, difiere de él también llamado riego subterráneo, que consiste en regar mediante fluctuaciones del nivel freático.

Una Instalación típica de riego por goteo o de microirrigación, la conforman el conjunto de mecanismos necesarios para aplicar el agua mediante gotas. En una instalación tipo podrían ser: Estación de bombeo, centro de control con los filtros y equipos de fertilización, las tuberías principales, secundarias, terciarias y laterales, los emisores, válvulas, acoples y demás piezas especiales. En el caso del RPBC se pueden conformar unidades modulares que pueden tener la forma mostrada en la Figura 2.1. En la cual se pueden diferenciar los componentes básicos siguientes:

- *Subunidad de riego:* Es la superficie que se riega simultáneamente desde un mismo punto donde se regula o controla la presión de entrada del agua, que lleva, por tanto, un control de carga constante.

- *Unidad de riego:* Es la superficie formada por el conjunto de subunidades que se riegan simultáneamente desde un mismo punto donde se controla la dosis de agua a aplicar en cada riego. Debe llevar, por tanto, una válvula.
- *Unidad operacional:* Es la superficie suma de las unidades de riego que funcionan simultáneamente desde un mismo centro de control.
- *Centro de control:* Es el conjunto de dispositivos que dominan toda la superficie de la instalación y pueden servir para filtrar el agua, tratarla, incorporar fertilizantes, controlar la presión, medir dosis de riego, etc.

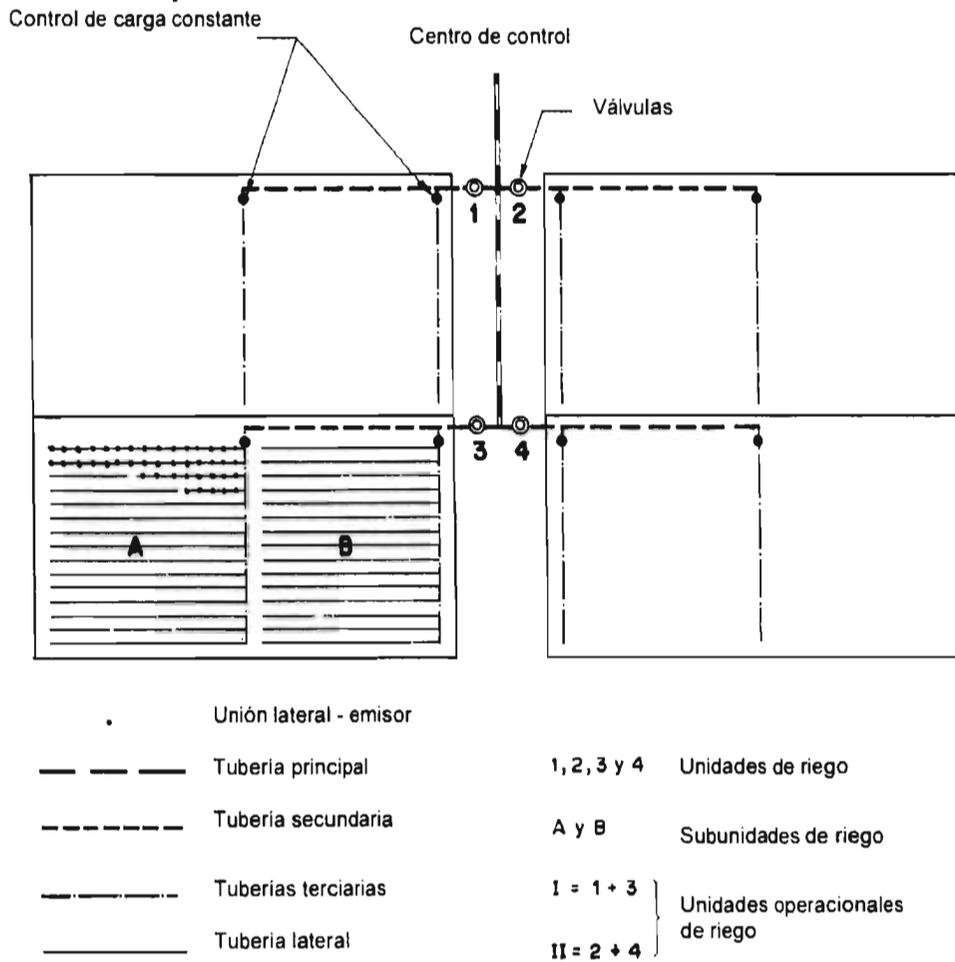


Figura 2.1 Ejemplo de nomenclatura típica utilizada en el RPBC y en sistemas similares.

- *Tuberías principales:* Son las que transportan el agua desde el centro de control hasta las unidades de riego.
- *Tuberías secundarias:* Son las que, dentro de una unidad de riego, sirven a las distintas subunidades.

- *Tuberías terciarias:* Dentro de la subunidad de riego, son las que alimentan a las tuberías laterales.
- *Tubería lateral:* Son las tuberías que llevan conectados los emisores. Por ejemplo en la nomenclatura de la Figura 2.1 se representa una instalación en la que puede verse el centro de control del que parte una tubería principal y de ella toman agua, a través de válvulas, cuatro unidades de riego. De cada válvula parte una tubería secundaria que alimenta a las subunidades de riego a través de un control de carga constante. De él parte la tubería terciaria, y de ésta, los laterales.
- *Unión lateral - emisor:* Punto sobre el lateral, en el cual se inserta o acopla el emisor.

2.1. EMISORES EN LOS SISTEMAS CONVENCIONALES DE RIEGO POR GOTEO

2.1.1. DEFINICIONES

- *Emisores:* Son los dispositivos que controlan la salida del agua, desde las tuberías laterales, en puntos discretos o continuos.
- *Punto de emisión:* Son los orificios de salida del agua procedente de los Emisores. Cuando el mismo emisor dispone de varios puntos de emisión, se denomina multisalida.
- *Goteros:* Son emisores con caudales no superiores a 16 l/h. En ellos se produce una disipación de energía que para caudales inferiores a 8 l/h es casi total, por lo que el agua sale gota a gota y para caudales mayores conserva parte de la energía saliendo el agua en forma de pequeños chorros; siendo esta la diferencia fundamental entre los goteros (emisores) convencionales y los implementados en el RPBC, en estos básicamente la energía disponible es utilizada únicamente para conducir adecuadamente el agua hacia los puntos de emisión.
- *Sistemas integrados:* Se trata de conducciones en las que, en el propio proceso de fabricación, se insertan interiormente goteros uniformemente espaciados (este procedimiento puede ser aplicado igualmente al RPBC), generalmente con caudales inferiores a 4 l/h.
- *Tuberías emisoras:* Son conducciones que a su vez aplican agua de riego mediante perforaciones poco espaciadas (generalmente menos de 0.50 m), pared porosa, etc. El caudal que descargan no sobrepasa los 16 l/h por metro lineal de conducción. La unidad de emisión es el tramo de tubería emisora, repetido a intervalos, desde el que fluye agua al exterior. Cuando se utilizan goteros o tuberías emisoras, el principal medio de propagación del agua es el suelo.
- *Difusores:* Son emisores por cuyo orificio de salida se lanza el agua al exterior con la suficiente presión para permitir su difusión a través del aire, tras incidir el chorro en un deflector fijo.
- *Miniaspersores:* Son aspersores de baja presión y caudal. El alcance es pequeño, normalmente no superior a los 3 m. Tanto los difusores como los miniaspersores tienen caudales que no sobrepasan los 200 l/h. En este caso el aire es el principal medio de propagación del agua.

2.2. REQUERIMIENTOS BÁSICOS

Las características fundamentales que se deben tener presentes al seleccionar un emisor son:

- Caudal uniforme y constante, poco sensible a las variaciones de presión.
- Poca sensibilidad a las obturaciones.
- Elevada uniformidad de fabricación.
- Resistencia a la agresividad química y ambiental, así como a las operaciones agrícolas.
- Minimización de costos.
- Estabilidad de la relación caudal - presión a lo largo del tiempo.
- Poca sensibilidad a los cambios de temperatura.
- Reducida pérdida de carga en el sistema de conexión.
- Resistencia al ataque de insectos o roedores.

Más Adelante se verá que en el RPBC estos requisitos son satisfactoriamente cumplidos.

2.3. ASPECTOS HIDRÁULICOS

El agua atraviesa el emisor pasando a través de uno o varios conductos. Las longitudes, configuraciones y secciones de éstos determinarán el comportamiento hidráulico del emisor.

Curvas caudal - presión: El caudal que descarga un emisor está relacionado con la presión hidráulica existente a su entrada por la ecuación

$$q = K_d h^x \quad (2.1)$$

donde

- K_d constante o coeficiente de descarga característico del emisor y equivale al caudal que se proporcionaría con una presión de 1 m.
- h presión hidráulica a la entrada del agua en el emisor, en m ó kPa.
- X exponente de descarga y que está caracterizado por el régimen de flujo dentro del emisor o de sus dispositivos de autocompensación.

La ecuación (2.1) puede representarse tomando en las ordenadas caudales y en las abscisas presiones (Figura 2.2). Cuanto menor sea el valor de x , la curva que resulta tenderá hacia la horizontal. Un emisor que tuviera una $x = 0$, tendría como curva una recta horizontal paralela al eje de abscisas. Su caudal sería constante e independiente de la presión. Por el contrario, otro emisor con $x = 1$, su curva también es otra recta que pasara por el origen y su caudal varía proporcionalmente en función de la constante K_d .

Si la curva definida por la ecuación se representa en unos ejes $\log - \log$, se transforma en una recta cuya pendiente es precisamente x y su ordenada es K_d , ya que al aplicar logaritmos en ambos lados de la igualdad se tiene:

$$\log q = x \log h + \log K_d \quad (2.2)$$

Cada curva caudal - presión corresponderá a una determinada temperatura del agua y deben ser suministradas por los diseñadores o fabricantes, indicando, además, el entorno de presiones entre las que debe trabajar el emisor o intervalo de presiones efectivas de trabajo. Este dato es muy importante para el diseño hidráulico y en el caso de los emisores autocompensantes, deberá definirse el intervalo de autocompensación ya

que sólo funcionan como tales a partir y hasta una determinada presión. Más adelante se discutirá que en el RPBC la curva caudal - presión tiene la forma.

$$Q(L, T, H_0, \phi) = m(L)\Delta H + C(L) \quad (2.3)$$

en la cual

- Q caudal que vierte cada emisor en l/h.
- L longitud del emisor (manguera de 1/8") en m.
- T temperatura de diseño en °C.
- H₀ carga disponible en el dispositivo de control de carga constante en m.
- φ diámetro del emisor en pulgadas.
- m(L) valor de la función potencial hallada experimentalmente, en l/h/cm.
- C(L) valor de la función lineal determinada experimentalmente, en l/h.

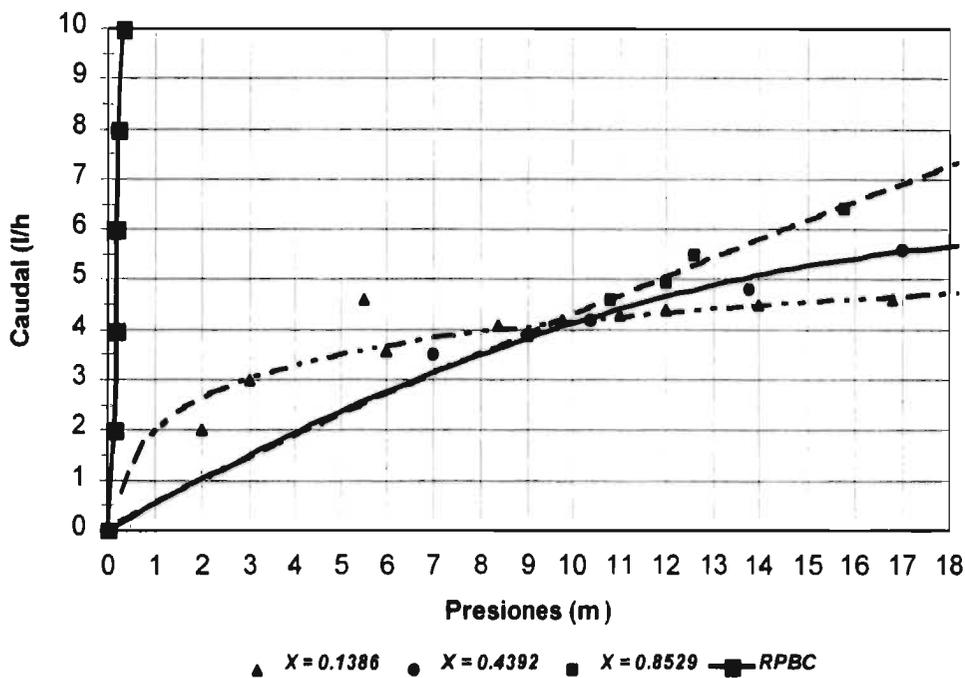


Figura 2.2. Comparación de curvas caudal - presión en el RPBC con respecto a emisorios convencionales (con distintos valores de x).

También, para los emisores no autocompensantes el diseñador o fabricante debe proporcionar la presión nominal de ensayo y el caudal nominal, con el agua a 23 ± 1 °C. En los emisores autocompensantes el caudal nominal será, para la misma temperatura, el correspondiente a una presión del intervalo de autocompensación.

Como se trata más adelante, a consecuencia de la variabilidad entre emisorios, dada una determinada presión, los caudales de diferentes unidades de un mismo tipo de emisor son distintos, por lo que se obtendrán tantas curvas caudal - presión como

diferentes unidades se usen, para una misma temperatura del agua. Se debe, por tanto, definir una curva característica del tipo de emisor considerado.

El número de unidades que deben ensayarse para obtener la curva característica dependerá, en consecuencia, de la bondad de fabricación. Se ha comprobado que para un nivel de confianza del 95%, si se toman 24 elementos, la máxima imprecisión en la estimación del caudal sería del 1% para un emisor excelente, mientras que para emisores deficientes, para el mismo nivel de confianza la máxima imprecisión sería del 6%, también ensayando 24 unidades.

En las normas (reportadas en la bibliografía existente) para los ensayos en goteros con un solo punto de emisión y las tuberías emisoras se toman 4 unidades o unidades de emisión, respectivamente. Cuando se trate de difusores o microaspersores se tomarán dos unidades. Todas ellas se elegirán de un conjunto que ha sido sometido previamente a la prueba de uniformidad.

Se somete cada uno de los emisores elegidos a presiones crecientes con incrementos no superiores a 5 m hasta alcanzar $1.2 h_{max}$ midiendo los correspondientes caudales. En el caso de los autocompensantes, por razón de sus materiales elásticos se pueden presentar fenómenos de histéresis, por lo que, además, de tomar los caudales correspondientes a puntos ascendentes de presiones, una vez que se alcance la presión máxima dentro de su intervalo de trabajo, posteriormente se efectúa el ensayo en sentido descendente de presiones. Obtenidos las parejas de valores caudal - presión para cada emisor ensayado se ajustará una curva potencial mediante la expresión:

$$x = \frac{\sum \log h_i \log q_i - \frac{1}{n} \sum \log h_i \sum \log q_i}{\sum (\log h_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log h_i)^2} \quad (2.4)$$

$$K_d = e^{\left(\frac{1}{n} (\sum \log q_i - x \sum \log h_i)\right)} \quad (2.5)$$

donde

i varía desde 1 a n.

n número de parejas de valores de q y h obtenidos en el ensayo.

Para comprobar la bondad del ajuste se puede obtener el coeficiente de correlación mediante la expresión siguiente:

$$R^2 = \frac{\log K_d \sum \log q_i + x \sum \log q_i \log h_i - \frac{1}{n} (\sum \log q_i)^2}{\sum (\log q_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \log q_i)^2} \quad (2.6)$$

Cuanto más se aproxime el valor de R^2 a la unidad mejor será el ajuste obtenido, siempre y cuando el ajuste obtenido si se acerque adecuadamente a las mediciones. En el caso de los emisores autocompensantes el ajuste mediante una función potencial es bastante deficiente resultando valores muy bajos de R^2 . En muchos casos se realizará un

mejor ajuste mediante una línea recta que puede llegar a tener pendiente negativa, de tal forma que:

$$q = a - b \cdot h \quad (2.7)$$

donde

$$b = \frac{\sum q_i h_i - \frac{1}{n} \sum h_i \sum q_i}{\sum h_i^2 - \frac{1}{n} (\sum h_i)^2} \quad (2.8)$$

$$a = \frac{1}{n} \sum q_i - b \sum h_i \quad (2.9)$$

$$R^2 = \frac{a \sum q_i + b \sum q_i h_i - \frac{1}{n} (\sum q_i)^2}{\sum (q_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum q_i)^2} \quad (2.10)$$

La temperatura durante el ensayo debe ser de 23 ± 1 °C.

2.3.1. PÉRDIDA DE CARGA POR CONEXIÓN

Entre los diferentes tipos de emisores existentes en el mercado, las conexiones de éstos a las tuberías laterales pueden clasificarse en cuatro grandes grupos (Figura 2.3).

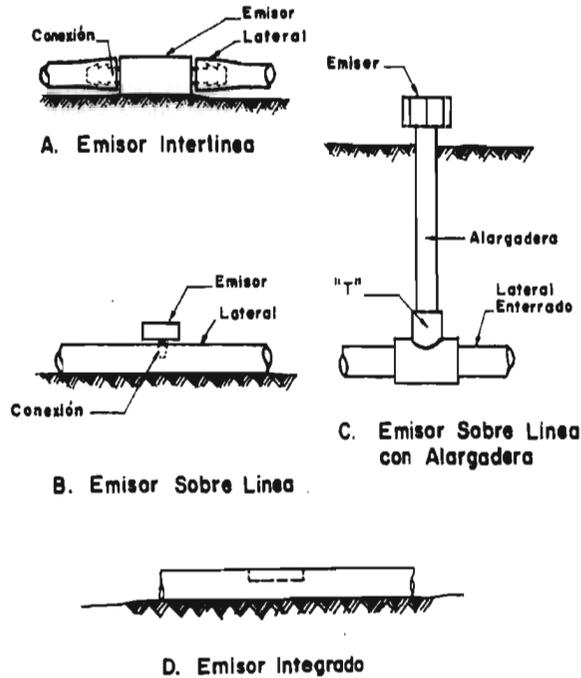


Figura 2.3 Distintas conexiones utilizadas en la interconexión entre tuberías laterales y emisores.

2.3.1.1. CONEXIÓN INTERLÍNEA

Con ella el propio emisor sirve para unir segmentos del lateral. Normalmente los emisores se consiguen de fábrica ya instalados a una distancia determinada en la tubería. La conexión suele ser en forma de diente de tiburón, o variante como en el caso del RPBC que se discutirá en detalle más adelante.

2.3.1.2. CONEXIÓN SOBRE LÍNEA

En este caso la tubería lateral es perforada mediante un punzón, introduciendo en el orificio producido la conexión del emisor (Figuras 2.3 y 2.4).

2.3.1.3. Conexión Sobre Línea con Alargadora

Variante del anterior, donde la perforación hecha en la tubería lateral, o bien con una T, se conecta un trozo de tubo que termina en el emisor.

2.3.1.4. SISTEMAS INTEGRADOS

En ellos el emisor va insertado en el interior del lateral (Figura 2.3).

Todas estas conexiones producen un obstáculo a la circulación del agua dentro de la tubería lateral que se traduce en una pérdida de carga que dependerá del tamaño y tipo de conexión en relación al diámetro interior del lateral y del caudal que pase por éste.

Como se trata de una pérdida de carga que se origina en un punto singular, siempre podrá hacerse equivalente a la que se produce en una longitud f_e de lateral, así:

$$f_e = \frac{h_{r2} - h_{r1}}{nh_{r1}} \quad (2.11)$$

donde

- f_e longitud del lateral cuya pérdida de carga equivale a la producida por la conexión del emisor en m.
- h_{r1} pérdida de carga producida en la tubería sin emisores en m.
- h_{r2} pérdida de carga producida en la misma tubería con los emisores en m.
- l longitud de la tubería en m.
- n número de emisores instalados en la tubería.

La Figura 2.4. Sirve para estimar estas longitudes equivalentes que se aplican a las expresiones siguientes:

- Emisores sobre línea con conexión tipo "grande".

$$f_e = \frac{23.04}{D^{1.84}} \quad (2.12)$$

- Emisores sobre línea con conexión tipo "estándar".

$$f_e = \frac{18.91}{D^{1.87}} \quad (2.13)$$

- Emisores sobre línea con conexión tipo "pequeño".

$$f_e = \frac{14.38}{D^{1.89}} \quad (2.14)$$

- Emisores interlínea.

$$f_e = 6.23m \quad (2.15)$$

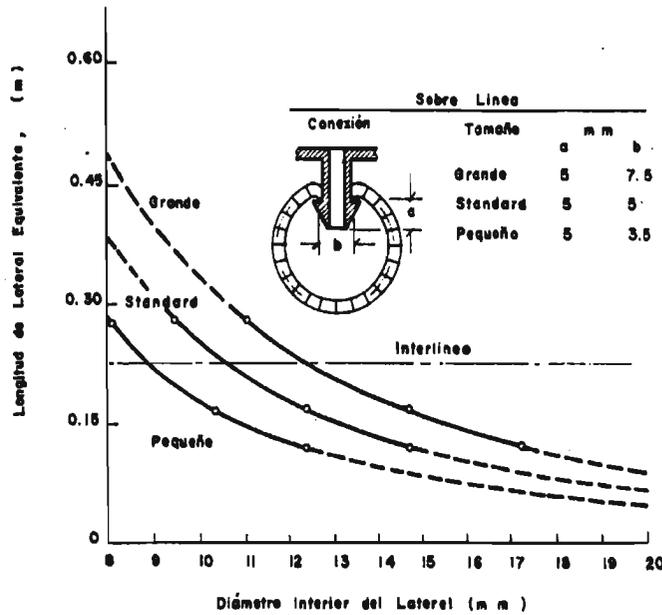


Figura 2.4. Longitudes equivalentes para el cálculo de pérdidas en emisores con conexión sobre línea.

En las ecuaciones anteriores se considera que esta pérdida de carga es independiente del caudal que pasa por la tubería lateral y de la separación de los emisores en ella, lo cual no es del todo cierto, aunque puede servir cuando se usan caudales y separaciones consideradas normales para los diámetros y tipos de emisores elegidos.

Un método recomendado sería determinar una ecuación que permita calcular para cada diámetro de tubería y espaciamento de emisores, su gradiente de pérdida de carga. Este tendría una expresión semejante a la siguiente:

$$J' = K'Q^b \quad (2.16)$$

donde

J' gradiente de pérdida de carga de la tubería de diámetro D, con emisores de un determinado tipo situados a la distancia S.

- K' constante a determinar experimentalmente.
 Q caudal que pasa por la tubería.
 β exponente de descarga a determinar experimentalmente.

También se puede expresar, para un determinado diámetro interior de la tubería lateral, el equivalente en longitud de la pérdida de carga de la conexión directamente en función del caudal que pasa por la tubería mediante la expresión:

$$f_e = CQ^M \quad (2.17)$$

Algunos valores de C y M para un diámetro interior del lateral de 14.7 mm pueden obtenerse en la Tabla 2.1.

La pérdida de carga producida por las conexiones debe tenerse muy en cuenta, pues en emisores colocados muy juntos, con conexión interlínea, puede llegar a aumentar en un 30 - 40% la pérdida que se tendría en el lateral sin emisores.

Para microtubos insertados en un lateral, y dirigidos en el sentido del flujo. Según la longitud de microtubo insertada y el diámetro del lateral se han obtenido los resultados de longitud de lateral (f_e) en un equivalente a la conexión que figuran en la Tabla 2.2, para microtubos de 3 - 1.5 mm.

Gotero	M	C	Coeficiente de Correlación	Tamaño de Conexión	
				a	b
Interlínea	0.40	257.10	0.93	=	=
Sobrelínea	1.88	3.37	0.97	5	3.5
Sobrelínea	1.69	7.57	0.97	6	5.0
Sobrelínea	1.14	5.47	0.98	5	7.5

Adaptada de Howell y Barinas, ASAE Technical paper N° 78-2014

Tabla 2.1. Valores de C y M para la obtención de f_e .

Longitud Insertada (cm)	ϕ Exterior del Lateral	
	16 mm	20 mm
1	0.17	0.06
10	0.20	0.06
20	0.25	0.10
30	0.31	0.13

Tabla 2.2. Valores de f_e comúnmente utilizados en el dimensionamiento de microtubos.

Estos resultados fueron determinados para un caudal de 500 l/h en 0.16 mm y 850 l/h en 0.20 mm, pero se pueden considerar prácticamente independientes a dichos caudales.

2.4. COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE FABRICACIÓN

Por muy estrictos que sean los procesos de fabricación de los emisores, es imposible obtenerlos con el mismo valor de K_d y x .

Si se toma una muestra representativa de emisores del mismo tipo y se someten a idéntica presión, sin que varíe la temperatura del agua, el caudal de cada uno de ellos será distinto. Se ha comprobado que sus caudales se distribuyen estadísticamente, según una distribución normal (Figura 2.5). Esta distribución estará, por tanto, definida por su media y desviación estándar. Si se llama q_m a la media de todos los caudales medidos a la misma presión y temperatura y σ su desviación estándar, se puede definir el coeficiente de variación de fabricación CV como:

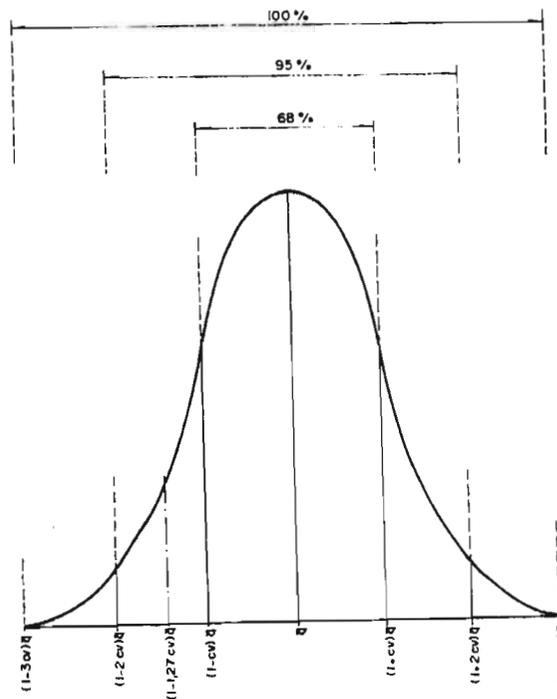


Figura 2.5. Distribución normal de caudales en emisores.

$$CV = \frac{\sigma}{q_m} \quad (2.18)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (q_i - q_m)^2}{n - 1}} \quad (2.19)$$

donde

- q_i caudales experimentales.
- q_m promedio de los caudales.
- n número de ensayos.

La variabilidad de fabricación depende del diseño del emisor, de los materiales utilizados en su fabricación y del cuidado y tolerancia utilizados en el proceso de la misma. El significado estadístico del coeficiente de variación será: prácticamente todos los caudales observados en el ensayo están comprendidos en el entorno $(1 \pm 3CV)q_m$. Aproximadamente el 95% de las observaciones se encuentran comprendidas en el entorno $(1 \pm 2CV)q_m$.

Si se toman el 25% de las observaciones de valor más bajo, su media será aproximadamente igual a $(1 \pm 1.27CV)q_m$. El 68% de las observaciones realizadas estarán en el intervalo $(1 \pm CV)q_m$.

La norma ASAE EP405-1 basada en la del US Soil Conservation Service clasifica los emisores de acuerdo con los valores de CV en:

Goteros, miniaspersores y difusores:

$CV \leq 0.05$	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

Tuberías emisoras de gotas:

$CV \leq 0.10$	buenas
$0.10 < CV \leq 0.20$	normales
$0.20 < CV$	deficientes a inaceptables

En las normas ISO la clasificación de los emisores se realiza únicamente en dos grupos: Categoría de uniformidad A y B de acuerdo con la Tabla 2.3.

Categoría de Uniformidad	Para la Presión Nominal Desviación del Caudal	Coefficiente de Variación de Fabricación, CV
A	< 5%	< 5%
B	< 10%	< 10%

Tabla 2.3. Clasificación de emisores según norma ISO.

El estándar americano refleja mucho mejor que las normas ISO la realidad del mercado (López, 1992), sobre todo en lo referente a las tuberías emisoras. Difícilmente pueden encontrarse comercializadas tuberías emisoras que tengan los parámetros anteriores inferiores al 10%, lo normal es que los superen ampliamente y es por ello que en el estándar ASAE se admiten valores de hasta el 20%. No se entiende cómo no se ha dejado para este tipo de emisores una categoría C que llegara hasta el 15%.

En la práctica, el dato realmente importante es la diferencia de dosis de riego que reciben las plantas. Por tanto, en el caso que cada planta reciba el agua de más de un emisor, se define el coeficiente de variación del sistema CV, por:

$$CV_s = \frac{CV}{\sqrt{e}} \quad (2.20)$$

donde

CV_s coeficiente de variación de fabricación del sistema.

CV coeficiente de variación de fabricación del emisor.

e número de emisores que proporcionan agua a una planta.

Es importante reseñar que en cultivos de alta densidad de plantación, aunque haya más plantas que emisores, por lo poco espaciados que normalmente se encuentran éstos, cada planta puede recibir agua de dos o tres emisores y ésta es la cifra que deberá tomarse para (e).

Cuando se trata de goteros multisalida se debe tener en cuenta si se trata de un gotero con varios puntos de emisión o de varios goteros agrupados en una misma carcaza. En este caso e sigue siendo el número de goteros independiente de los puntos de emisión que tenga. Siempre debe aplicarse el mismo criterio que se utilizó al hacer la determinación de CV en laboratorio.

En el caso de difusores o miniaspersores, también se debe guardar un mínimo de uniformidad en su pluviometría sobre el terreno, para evitar que se produzcan, en determinadas zonas, encharcamientos. Normalmente, no se admiten aquellos emisores en los que se producen fluctuaciones de pluviometría de 1 a 2 entre puntos separados a 1 m.

En general, puede decirse que el coeficiente de variación de fabricación es prácticamente independiente de la presión usada en la prueba, siempre que ésta esté comprendida en el entorno normal de uso del emisor.

Frecuentemente los emisores que son desmontables tienen un alto coeficiente de variación de fabricación, así como los llamados autocompensantes.

La influencia del CV en la variación de caudales en la subunidad de riego suele ser más importante que la variación de presiones debida a la pérdida de carga en las tuberías, incluso para valores realmente bajos de CV.

El CV definido se refiere a emisores recién fabricados, es decir, nuevos. Es muy importante conocer el CV de emisores usados, en unas determinadas condiciones o bien su variación con el tiempo. Lógicamente éste se verá afectado por las obturaciones parciales o totales o envejecimiento de los materiales de que están fabricados los emisores. Por ejemplo, con sólo un 5% de emisores totalmente obturados, CV pasara de 0.05 a 0.24, si se usa uno por planta.

2.5. SENSIBILIDAD A LAS OBTURACIONES

La sensibilidad del emisor a las obturaciones para una misma calidad de agua depende fundamentalmente del diámetro de su sección mínima de paso, de la velocidad del agua a través de esta sección y de la configuración o diseño de la misma. Según el

diámetro de la sección mínima de paso, los goteros, tuberías emisoras y sistemas integrados pueden clasificarse en:

Muy sensibles a las obturaciones	$d < 0.7 \text{ mm.}$
Sensibles	$0.7 < d < 1.5 \text{ mm.}$
Poco sensibles	$d > 1.5 \text{ mm.}$

Para el RPBC se tiene que los emisores tienen una dimensión mínima de 1/8" (3.175 mm) razón por la cual este sistema resulta ser poco sensible a las obturaciones.

La presencia de zonas muertas en los conductos del agua dentro del emisor puede aumentar su sensibilidad a las obturaciones.

El diseño debe prevenir no sólo las posibles obturaciones internas sino también las que pueden producirse de fuera para dentro cuando se corta el riego por efecto de la entrada de aire en la tubería lateral a través de los emisores.

La velocidad dentro de los conductos del emisor tiene tanta importancia como el diámetro, ya que en emisores de largo conducto se pueden llegar a producir sedimentaciones. Velocidades mayores de 4.5 m/s reducen mucho las obturaciones.

En general, se recomienda que el sistema de filtrado no deje pasar partículas sólidas, cuyo diámetro sea superior a 1/10 del diámetro de la sección mínima de paso en goteros, como en el caso del RPBC es de 0.3175 mm esto hace que no se taponen, aún con la utilización de aguas tratadas.

En miniaspersores y difusores esta norma puede rebajarse a 1/5, ya que la velocidad de paso por los conductos suele ser mayor y éstos mucho más cortos.

Para difusores y miniaspersores se puede establecer la clasificación siguiente:

Muy sensibles a la obturación	$d < 0.4 \text{ mm.}$
Sensibles	$0.4 < d < 0.7 \text{ mm.}$
Poco sensibles	$d > 0.7 \text{ mm.}$

No obstante, las recomendaciones de filtrado del fabricante del emisor, y, sobre todo, la experiencia local serán, sin duda, los datos más prácticos para conocer la sensibilidad a la obturación del emisor y, por consiguiente, sus requerimientos de filtrado.

Se está tratando de normalizar algunos ensayos que permitan evaluar la sensibilidad de los emisores a las obturaciones físicas y químicas. En el primer caso la prueba se realiza en cuatro fases, de 24 horas de duración cada una, con agua mezclada con 250 mg/l de arena de una granulometría creciente en cada fase. Mientras se está realizando el ensayo se miden caudales en los emisores. La prueba termina cuando en el 40% de las unidades ensayadas se observa una disminución del caudal de un 20%.

Más interesante se considera la prueba de resistencia a las obturaciones químicas. Consiste en hacer circular agua a una temperatura de $30 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, para facilitar su acción, en la que se han disuelto 1 g/l de CaSO_4 , 3 g/l de $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y 1 g/l de

NaHCO₃. Se realiza un número determinado de ciclos de funcionamiento y desecado, midiendo caudales de los emisores hasta un máximo de 30 ciclos o cuando el 40% de las unidades presenta caudales disminuidos en más del 20%.

2.6. SENSIBILIDAD A LA TEMPERATURA

La variación de la temperatura a lo largo del lateral, contraria en signo a su variación de presión, es común en casi todos los sistemas de riego por goteo con tuberías expuestas a la radiación solar. Es por ello necesario tener presente esta característica para el cálculo de estos sistemas.

Los resultados obtenidos de la descarga de varios tipos de emisores sometidos a distintas temperaturas, ha llevado a la conclusión de que

$$q = m + nT \quad (2.21)$$

donde

m y n son constantes determinadas al realizar el ajuste de los datos (ver Tabla 2.4).

T temperatura del agua en °C.

La sensibilidad a la temperatura, expresada por n, depende fundamentalmente del grado de turbulencia del flujo dentro del emisor, ya que cuanto mayor sea este grado, menor será la dependencia del caudal de la viscosidad que, a su vez, se ve grandemente afectada por la temperatura. Del diseño del emisor, tanto en forma como en composición, ya que la temperatura influye en las características de los materiales elásticos que, a veces, forman parte del emisor, pero sobre todo produce dilataciones variando las dimensiones de los conductos.

A pesar de la escasa información con la que se cuenta, puede decirse, a nivel general, que la sensibilidad de la temperatura es grande en los emisores de largo conducto, aumentando con la presión interior y su sección de paso de agua; son poco sensibles los emisores de tipo laberinto, aumentando ésta con la presión de trabajo y, por último, en los emisores tipo vortex la descarga decrece cuando aumenta la temperatura. Cuando las tuberías laterales se entierran (o están en la sombra), las variaciones de temperatura disminuyen.

En cuanto a la estimación de la variación del factor de fricción para el diseño de los sistemas de irrigación, se ha realizado, considerando para las diferentes temperaturas del agua dado que cambios en la viscosidad pueden afectar significativamente la estimación de las pérdidas de energía.

En particular, un estudio experimental requiere verificar esta variación, para un determinado diámetro y una descarga, la variación del factor de fricción con la temperatura puede ser explicado por un cambio en las propiedades del agua (Mc Enroe 1989; Von Bernuth 1989).

En un estudio llevado a cabo en la Universidad de Palermo, Italia, en el cual mediante la experimentación en el laboratorio, para poder estudiar la ley de resistencia para tubería de polietileno (PE) de diámetros pequeños. En particular, dado que en las

aplicaciones de riego se tienen significativos cambios en la temperatura del agua, los experimentos fueron llevados a cabo usando un amplio rango de números de Reynolds, obtenidos mediante la variación de caudales y de temperaturas del agua. La ley de resistencia al flujo se obtuvo mediante la utilización de dos metodologías, una fue un análisis regresional de los datos experimentales, asumiendo una modelo potencial y la otra fue una aproximación semiteórica.

Presión en kPa	n	m	Coefficiente de Correlación (R ²)
(a) Helicoidal 2 l/h			
100	0.0169	1.6872	0.9946
200	0.0254	2.8927	0.9964
	0.0303	3.9242	0.9878
(b) Helicoidal 4 l/h			
100	0.0323	3.0612	0.9948
200	0.0470	5.1131	0.9964
300	0.0651	6.7083	0.9898
(c) Laberintico 4 l/h			
100	0.0079	4.8769	0.9040
200	0.0092	7.3293	0.8574
300	0.0139	9.1871	0.8594
(d) Vortex 7.5 l/h			
100	0.0180	7.2695	0.9913
	0.0222	9.8105	0.9740
	0.0213	11.6188	0.9817

Adaptada de Zur y Tal. ASCE, Vol. 107 N° 20 marzo 1981.

Tabla 2.4. Valores experimentales de las constantes m y n para varios tipos de emisores.

2.6.1. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

Los experimentos se realizan utilizando para las pruebas, tuberías PE de 100 m de longitud, con diámetro nominal de 16, 20 y 25 mm.

La instalación experimental que se muestra en la Figura 2.6 contiene los componentes principales siguientes:

- Un tanque de alimentación (Ta), localizado a una elevación de aproximadamente 20 m sobre la superficie del piso.
- Una bomba eléctrica (P) cerrando el circuito desde el tanque de alimentación.

- Manómetros diferenciales de mercurio instalados a lo largo del tramo de prueba (P_1 , P_2 , P_3 , P_4 y P_5).
- Un sistema de resistencias eléctricas con los cuales se calienta en agua que circula por las tuberías.
- Un arreglo de tuberías como el ilustrado en la Figura 2.6.

Las tuberías probadas fueron instaladas aumentando su tamaño, desde aguas arriba hacia aguas abajo, el tramo de prueba se instaló dándole una pendiente de 0.4% para facilitar la remoción de pequeñas burbujas de aire, antes de comenzar cada una de las pruebas.

Para tener en cuenta la dilatación transversal causada por el incremento en la temperatura, para cada tubo se tomaron trozos de muestra de 0.5 m de longitud, tomadas de las tuberías utilizadas en los ensayos, cada muestra fue pesada en una balanza de precisión ambas antes y después de llenadas, con agua destilada de temperatura conocida..

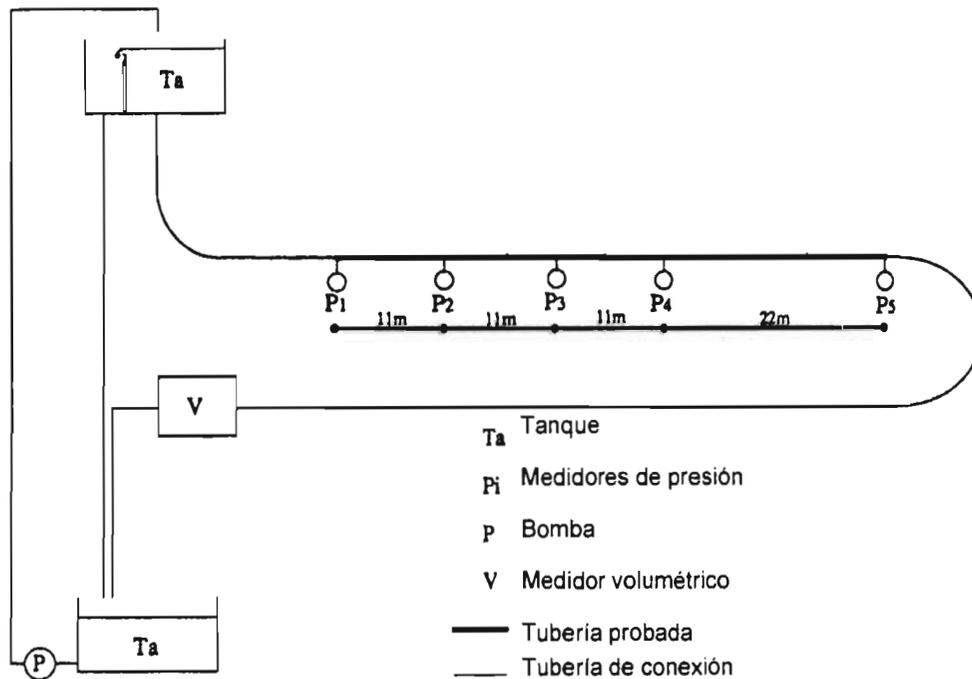


Figura 2.6. Instalación utilizada por Bargadello (1996) para estudiar como influye la temperatura en tuberías de PE de diámetros pequeños.

Se determinó la siguiente relación entre el diámetro inicial y el consecuente con agua a diferente temperatura.

$$D = b_0 + b_1 T \quad (2.22)$$

En la cual b_0 y b_1 son constantes determinadas experimentalmente y que se reportan en la Tabla 2.5, T , es la temperatura a la cual se opera el sistema.

Diámetro (mm)	b_0 (mm)	b_1 (mm °C ⁻¹)
16	13.55	5.18×10^{-3}
20	16.82	5.70×10^{-3}
25	20.36	6.21×10^{-3}

Tabla 2.5. Coeficientes b_0 y b_1 de la ecuación de ajuste obtenida.

Las tuberías fueron probadas para un amplio rango de caudales (86 - 1,264 l/h) y distintas temperaturas del agua (10 - 50 °C), para lograr tener una gran variedad de números de Reynolds. Para todas y cada una de las tuberías ensayadas se midieron las dilataciones ocurridas en el diámetro. En la Tabla 2.6 se muestran los rangos de temperaturas y los números de Reynolds logrados.

Diámetro (mm)	Rango de Temperaturas (°C)	Números de Reynolds	Repeticiones
16	10 - 15	6,074 - 12,650	8
	15 - 20	3,037 - 11,927	13
	20 - 25	3,446 - 18,455	12
	25 - 30	3,037 - 11,927	10
	30 - 35	4,719 - 22,212	15
	35 - 40	5,469 - 25,310	15
	40 - 45	4,034 - 28,797	15
	45 - 50	3,664 - 33,461	15
20	20 - 25	4,578 - 22,673	19
	30 - 35	5,149 - 24,524	10
	35 - 40	4,836 - 29,856	15
	40 - 45	4,327 - 33,411	16
	45 - 50	6,327 - 36,112	12
25	25 - 30	6,020 - 25,827	14
	40 - 45	6,514 - 29,529	7
	45 - 50	19,056 - 31,373	8

Tabla 2.6. Características de las pruebas efectuadas.

Para prevenir los errores sistemáticos durante la prueba, se variaron los caudales de manera aleatoria (Von Bernuth - Wilson, 1989).

2.7. CLASIFICACIÓN DE EMISORES

- Goteros.
- Tuberías emisoras.
- Miniaspersores o difusores.

2.7.1. GOTEROS

La configuración de los goteros es muy variable, pero por facilidad, se pueden agrupar en cuatro grandes grupos en función de su diseño y acabado:

- Goteros sellados: Con dos o más piezas acopladas en fábrica que no pueden separarse si no es provocando su rotura. Con ellos se consiguen los más bajos CV, cuando se obturan deben reemplazarse.
- Goteros desmontables: De dos o más piezas que pueden separarse para proceder a su limpieza manual. Tienen CV más altos que los anteriores por los problemas de ajuste en el montaje.
- Goteros en carcaza: En los que su carcaza es la propia tubería: Son goteros interlínea, de una sola pieza que se insertan dentro de la tubería utilizando parte de ésta como pieza exterior. Los mejores tipos vienen montados en la tubería desde fábrica. A pesar de esto suelen tener un alto CV. Son desmontables, aunque, algunas veces con dificultad.
- Goteros integrados.

Según la configuración de los conductos de paso del agua, pueden clasificarse en:

2.7.1.1. DE LARGO CONDUCTO

En ellos (Figura 2.7-D), la pérdida de carga tiene lugar en un largo conducto (de hasta 2 m de longitud) y de pequeño diámetro (de 0.5 a 2 mm). El flujo dentro del emisor es laminar, pero debido a la influencia de la entrada y salida, las fórmulas teóricas que podrían aplicarse no se ajustan a la realidad, para ello se deben realizar pruebas y ajustes.

A este grupo pertenecen los microtubos con diámetros interiores de 0.6 mm a 2 mm. Su CV puede ser bastante bueno (0.02 a 0.05), pero dependerá en gran medida del cuidado que se tenga cuando se corten a una determinada longitud.

El exponente x (ecuación 2.1) de estos emisores varía entre 0.55 a 0.80 aumentando con su longitud, con una K_d que va desde 4 a 8 disminuyendo cuando la longitud se incrementa. Con microtubos de 1.5 mm y pequeña longitud (unos 30 cm) se consiguen instalaciones muy sencillas y poco costosas, pudiéndose alcanzar una buena uniformidad de aplicación, aunque los caudales unitarios, de hasta 20 l/h, puedan parecer altos. En estos casos la sensibilidad a obturación es prácticamente nula, por lo que se pueden instalar estaciones de filtrado muy sencillas.

Al grupo de emisores de largo conducto pertenecen también aquellos goteros con el conducto helicoidal, fabricados así para evitar la incomodidad que suponen los largos microtubos. Existe una amplia gama de goteros de mayor o menor tamaño y con caudales variables de 2 a 4 l/h. Su CV es muy variable, ya que existen modelos con

valores de 0.02 y otros con 0.13. Sus exponentes de descarga varían de 0.65 a 0.85 y sus K_d entre 0.4 a 0.8.

A este grupo en particular pertenecen los emisores del RPBC, pero con algunas diferencias en sus dimensiones y formas de operar.

2.7.1.2. DE LABERINTO

Pertenecen a este grupo una serie de goteros a los que se les ha llamado la segunda generación (Figura 2.7-E), con largos conductos irregulares debido a los cuales se aumenta la turbulencia del flujo, consiguiéndose valores menores de x (de 0.5 a 0.6) y menor sensibilidad a las obturaciones (secciones de paso de 1 a 2 mm) y a los cambios de temperatura. Normalmente tienen un bajo CV (menor de 0.05). Pueden ser de interlínea o sobrelínea.

2.7.1.3. DE ORIFICIO

En ellos el agua sale al exterior a través de uno o varios orificios de diámetro pequeño, en donde tiene lugar la mayor pérdida de carga (Figura 2.7-A). El régimen de flujo es completamente turbulento y el exponente de descarga x suele ser próximo a 0.5. Son emisores muy sensibles a las obturaciones.

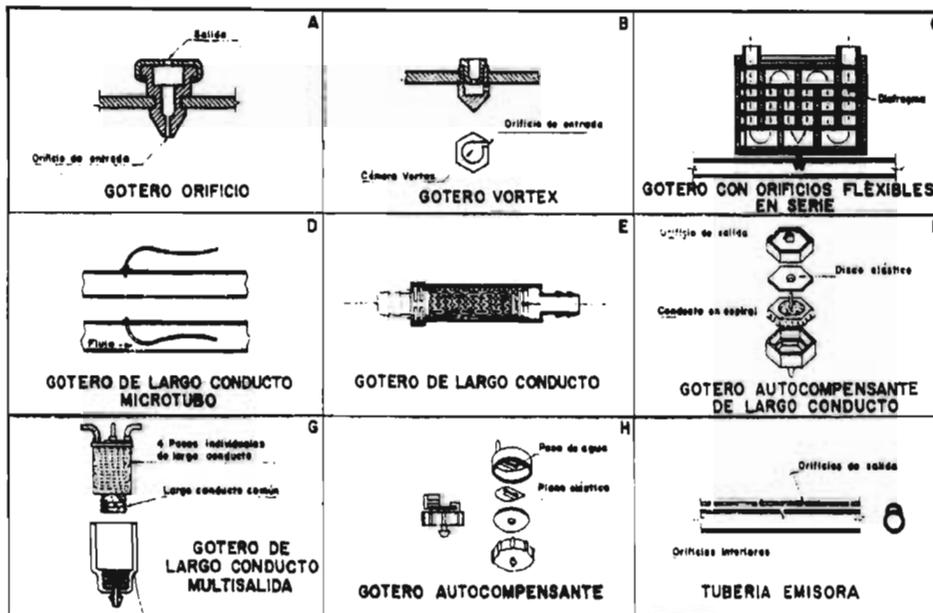


Figura 2.7. Diferentes tipos de goteros y de tuberías emisoras.

2.7.1.4. DE TIPO VORTEX

Estos goteros tienen una cámara circular en donde se produce un flujo en forma de vórtice (Figura 2.7-B). Este movimiento se consigue al entrar el agua tangencialmente a la pared circular de la cámara. El rápido movimiento de rotación consigue que el eje del

vortex obtenido está en el eje de la cámara. Como consecuencia de ello la pérdida de carga que se produce es superior que la del emisor de orificio del mismo diámetro. El CV puede ser bajo (0.04), el exponente de descarga también (de 0.4 a 0.5) y K_d es aproximadamente 1.

2.7.1.5. AUTOCOMPENSANTES

Se trata de goteros con flujo turbulento o en transición en los que se intenta obtener un caudal constante independiente de la presión (Figuras 2.7-F y H). La autorregulación se consigue normalmente mediante una pieza móvil y flexible de caucho que se deforma bajo el efecto de la presión, disminuyendo la sección de paso del agua y limitando así el caudal.

La durabilidad de estos goteros y, sobre todo, de su membrana flexible puede verse afectada por el tiempo y la temperatura, sobre todo cuando son empleados con aguas bicarbonatadas. La sensibilidad a las obturaciones puede llegar a ser grande, ya que cuando la presión aumenta disminuye la sección de paso, pudiendo llegar a valores inferiores a 0.5 mm. Su defecto mayor puede ser el alto valor de CV, debido a la existencia de piezas móviles. El efecto autorregulante no se consigue sino a partir de una determinada presión que deberá indicar el fabricante, existiendo también una presión máxima a partir de la cual el emisor deja de funcionar correctamente. El límite inferior suele estar en los 10 m y el superior en los 30 a 40 m (intervalo de autocompensación).

2.7.1.6. AUTOLIMPIANTES

Existen fundamentalmente dos tipos de goteros autolimpiantes: los que pueden estar o no en posición limpiante y los que continuamente lo estén.

Los primeros sólo se limpian durante el corto tiempo que tarda el sistema en ponerse en funcionamiento y alcanzar la presión de régimen, o en pararse y pasar de ésta a la presión atmosférica.

Los segundos (Figura 2.7-C), de limpieza continua, están fabricados para que partículas relativamente grandes sean expulsadas durante su funcionamiento. Esto se consigue mediante una serie de orificios flexibles que disipan la presión y que son deformables cuando una partícula de mayor tamaño que el orificio llega a él, consigue pasar, deformándolo, a causa de la diferencia de presión que se crea entre las dos cámaras que comunican a el orificio.

Con los del primer tipo debe tenerse la precaución de que la capacidad del sistema en caudal sea suficiente para poder llegar a la presión de régimen, ya que descargan más caudal cuando están en la posición de limpieza. Por otra parte, la pieza móvil (generalmente una esfera), que suele servir para efectuar estos cambios de funcionamiento, obliga a que el gotero esté perfectamente en vertical y a pesar de ello suele llegar a bloquearse. Estos inconvenientes han hecho que hoy en día están prácticamente en desuso.

En los segundos las deformaciones y desgastes que se producen en los orificios flexibles hacen que al poco tiempo de uso los caudales producidos varíen considerablemente. Este hecho unido a su elevado precio han reducido su utilización.

Existe un tercer grupo en los que a la entrada del emisor va situada una rejilla que opera como filtro para evitar la entrada de partículas en el cuerpo del emisor; el exponente de descarga de los de limpieza continua es de 0.7 y el CV varía de 0.05 a 0.07.

2.7.1.7. SISTEMAS INTEGRADOS

En estos sistemas, los goteros convencionales se sitúan en el interior de las tuberías, en el mismo proceso de fabricación, sin que exista ningún tipo de acoples o juntas. En algunos casos se trata de goteros tipo largo conducto o laberinto, sin carcasa exterior, actuando como tal la propia tubería. En otros se trata de goteros autocompensantes, etc. El caudal de los emisores suele ser inferior a 4 l/h.

Basándose en ese caudal, en la tolerancia de presiones y el diámetro de la tubería, los laterales tendrán longitudes muy variables que en el caso más favorable pueden llegar a tener hasta 300 m.

Estos sistemas integrados, al igual que las tuberías emisoras, se diseñan para reducir costos en los cultivos que requieren una gran cantidad de goteros. La duración de estos sistemas es variable, en función de la calidad de la tubería.

El diámetro de la tubería es normalmente inferior a 25 mm. Los intervalos a que se sitúan los emisores son variables según sean las necesidades. Los tipos más usuales ofrecen amplias gamas de espaciado, entre 0.30 y 1.50 m. La presión de trabajo depende del tipo de emisor; en general, necesitan presiones mínimas del orden de 0.3 - 0.5 atmósferas (3.1 - 5.1 m), y máximas entre 3 y 4 atmósferas (31 a 41.3 m).

En riego subterráneo existen goteros con herbicida incorporado de emisión lenta para evitar la entrada de raíces en ellos.

2.7.2. TUBERÍAS EMISORAS

Se emplean, por su bajo costo, en cultivos de tamaño de plantación muy estrechos que requerirían una gran densidad de goteros. En general, son bastante sensibles a las obturaciones ya que cuentan generalmente con orificios de salida de diámetro inferior a 1 mm. Trabajan a presiones inferiores a los 10 m con exponentes de descarga que varían entre 0.4 a 0.8 y CV desde 0.10 a 0.20 o más.

Están, frecuentemente, fabricadas a base de PE, de espesor variable, por lo que convendrá cerciorarse de que su precio este relacionado con su vida útil. En términos generales, estas tuberías deben colocarse enterradas a poca profundidad.

2.7.2.1. MANGUERAS POROSAS

En estas el agua sale al exterior a través de material poroso, su vida útil también es corta. Son muy sensibles a obturaciones por acción de carbonatos, especialmente las de material poroso. Para conseguir una buena distribución de agua, debe utilizarse en longitudes cortas.

2.7.2.2.MANGUERAS DE DOBLE PARED

Constan de dos tubos excéntricos o adyacentes. El agua circula por uno de ellos y pasa a través de unos pequeños orificios al segundo tubo, desde donde sale al exterior por otras perforaciones. Por cada orificio interior hay varios exteriores, por lo que pueden considerarse como goteros de orificio con multisalida.

Suelen ser de polietileno de distinto espesor, lo que influye en su vida útil. Estas mangueras permiten regar grandes longitudes (hasta unos 200 m) con una buena uniformidad de distribución a lo largo de ellas. Su presión de trabajo es de 0.4 a 0.6 atmósferas

2.7.2.3.MANGUERAS CORRUGADAS

Formadas por dos tuberías concéntricas, la exterior lisa y la interior corrugada, dejando entre ambas un conducto, de pequeño diámetro, a modo de resorte. El agua circula por la tubería interior y pasa al conducto a través de unas perforaciones practicadas regularmente en el mismo. Después de perder presión en el largo conducto, el agua sale a través de unas perforaciones practicadas en la manguera exterior.

2.7.2.4.MANGUERAS PERFORADAS

Son tuberías de PE, generalmente de poco espesor, con perforaciones espaciadas uniformemente, de forma lineal en sentido axial o circulares, efectuadas por procedimientos sofisticados, se emplea incluso técnica láser, para que la longitud o diámetro de la perforación sean lo más iguales posibles. Su funcionamiento hidráulico es similar al de un gotero de orificio, pero con la particularidad de que su sección de salida aumenta con la presión hidráulica interior en función de la elasticidad de la pared de la tubería. A bajas presiones pueden gotear, pero a presiones todavía relativamente bajas, inferiores a 10 m, el goteo se convierte en chorro continuo. Por el pequeño tamaño de las perforaciones, son bastante sensibles a las obturaciones.

2.7.3. DIFUSORES Y MINIASPERSORES

Este tipo de emisores están usándose cada vez más (Figura 2.8), sustituyendo, en algunos casos con ventaja, a los goteros. Se caracterizan porque el agua se desplaza a través del aire alguna distancia antes de llegar a la superficie del suelo. En general, las pérdidas de agua debidas a evaporación son mínimas.

Como ya se ha dicho, según tengan o no alguna de sus partes en movimiento de rotación se denominan miniaspersores o difusores. En la Figura 2.8 los dos E son miniaspersores, los demás son difusores. Atendiendo a su funcionamiento hidráulico se pueden hacer cuatro grandes grupos, similares a los goteros en los principios usados para la disipación de energía.

2.7.3.1.DE LARGO CONDUCTO

Son llamados así porque la pérdida de carga se produce fundamentalmente a través de una sección de corona circular o a través de una acanaladura, aunque éstos sólo tengan una longitud de 8 a 12 mm (Figura 2.8-A y D). Estos difusores tienen una λ que varía de 0.45 a 0.50.

2.7.3.2. DE ORIFICIO

Con secciones de 1 a 2 mm de espesor y con x variando entre 0.45 a 0.85 (Figura 2.8-B).

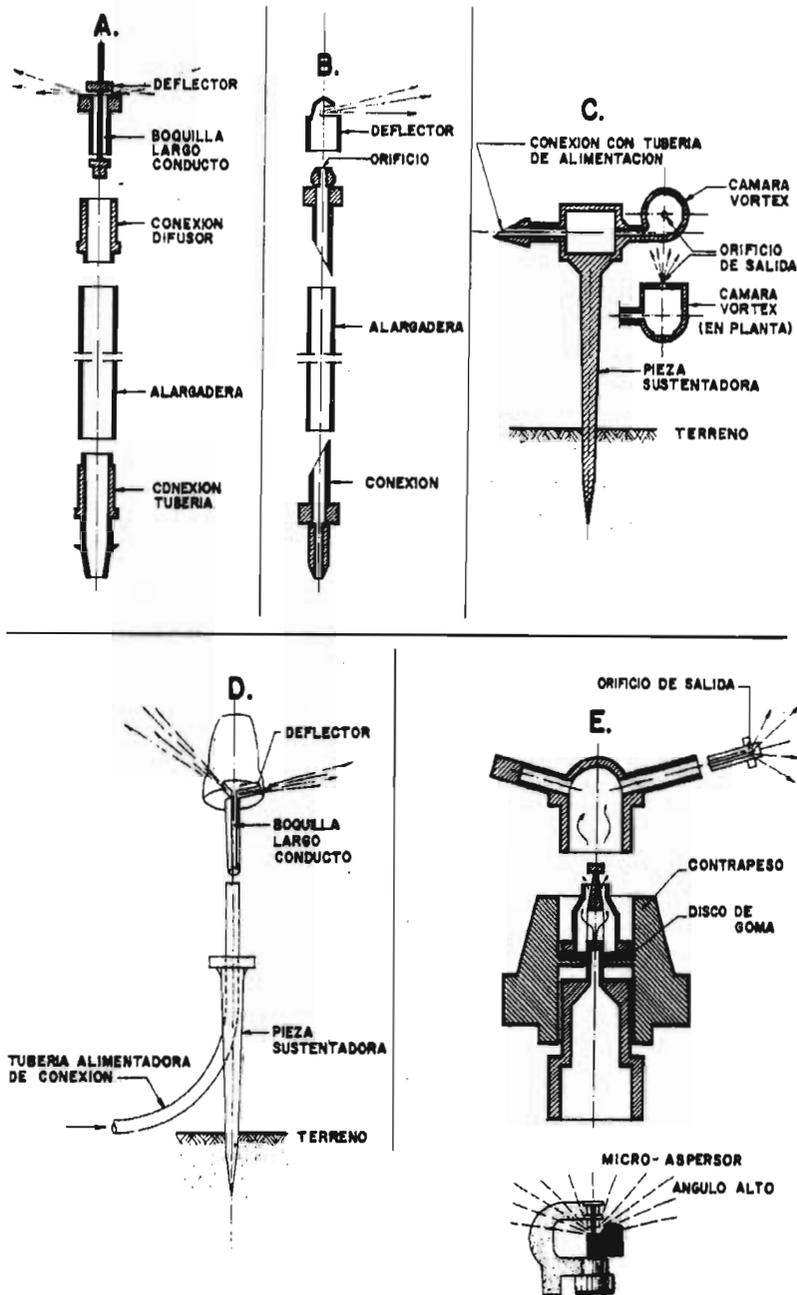


Figura 2.8. Difusores y miniaspersores (generalmente de importación) que no requiere el sistema de RPBC.

2.7.3.3. VORTEX

Con valores del exponente x (ver ecuación 2.1), comprendidas entre 0.35 a 0.45 (Figura 2.8-C).

2.7.3.4. AUTOCOMPENSANTES

A los modelos de orificio o de largo conducto se les pueden acoplar unas piezas con lengüetas flexibles que disminuyen la sección de paso del agua al aumentar la presión. Existe un modelo que consigue la autorregulación mediante un contrapeso (Figura 2.8-E, superior).

A pesar de tener diámetros de paso relativamente pequeños, son poco sensibles a las obturaciones debido a la velocidad del agua. Casi todos ellos tienen un deflector contra el cual choca el chorro de agua, cambiando de dirección y distribuyéndose a través del aire.

En ocasiones los deflectores pueden colocarse en diferentes posiciones y cambiar así el ángulo de apertura del chorro o la forma y tamaño de la superficie mojada.

En estos emisores, además de la curva característica caudal - presión y del coeficiente de variación de fabricación, deben conocerse lo siguiente:

- Superficie cubierta o mojada, descrita mediante un sector circular, por ejemplo, sector circular de 90 grados sería un cuarto de círculo.
- Perfil de distribución pluviométrica en función de la distancia del pluviómetro al emisor, con este se mide la cantidad de agua que cae a dicha distancia y en un determinado intervalo de tiempo).
- Alcance efectivo o distancia desde el emisor hasta el pluviómetro que recoge, al menos, el 10% de la pluviometría media.
- Altura de la trayectoria o apogeo de la trayectoria del agua por encima de la boquilla del emisor.
- Ángulo de salida con respecto al plano horizontal.

2.8. APARATOS DE CONTROL: REGULADORES DE PRESIÓN Y DE CAUDAL

La regulación de presiones o caudales a la entrada de las subunidades de riego es imprescindible en las instalaciones de riego por goteo. Como se analizó anteriormente, la descarga de un emisor depende de la presión disponible que tenga este. Un buen diseño hidráulico garantiza que las pérdidas de carga que se producen dentro de la subunidad de riego (a lo largo de las líneas laterales y terciarias) no sobrepasen determinados valores, de tal forma que la máxima diferencia de presiones entre emisores es tal que la correspondiente diferencia de caudales no supera un valor prefijado, en función de la uniformidad de riego deseada.

Sin embargo, en dos subunidades de riego de la misma instalación individualmente bien diseñadas, los emisores de una pueden presentar diferencias de caudales respecto a los de la otra, debido a diferencias importantes en las presiones de entrada a las mismas. En consecuencia, para un buen diseño del conjunto de la instalación, en muchos casos es necesario colocar aparatos que permitan efectuar la regulación de presiones o caudales.

Los reguladores son aparatos que absorben el exceso de energía de la red, proporcionando un valor constante de presión o caudal de agua. El principio de funcionamiento es crear una pérdida de carga adicional como medio de controlar la presión o caudal en la red. A su vez, al estar la presión y el caudal directamente relacionados para un diámetro dado de tubería, se logra una regulación de caudales o presiones. Los reguladores se pueden clasificar como sigue:

- **Reguladores de caudal:** Mantienen un caudal aproximadamente constante dentro de un determinado rango de presiones de entrada. La presión de salida depende de las características hidráulicas de la red de riego aguas abajo del aparato.
- **Reguladores de presión:** Mantienen una presión de salida aproximadamente constante dentro de un determinado rango de presiones de entrada. El caudal depende de las características hidráulicas de la red de riego, aguas abajo del aparato. Los reguladores de presión pueden ser de dos tipos: Reguladores de presión dinámica que actúan sólo con flujo de agua y los reguladores de presión estática y dinámica los cuales trabajan con y sin flujo de agua.

2.8.1. REGULADORES DE CAUDAL

Son aquellos dispositivos capaces de regular el caudal que circula por una tubería dentro de un rango de presiones en el que funcionan eficientemente.

La pérdida de carga que producen estos reguladores, mostrados en la Figura 2.9, es debida a la variación de la sección de paso del agua. Al aumentar o disminuir la presión a la entrada del regulador, su área de paso disminuye o aumenta, respectivamente, de manera que se cumple la ecuación:

$$Q = f(A_1, P_1) \approx f(A_2, P_2) \approx f(A_3, P_3) \approx \dots \approx f(A_n, P_n) \quad (2.23)$$

En la Figura 2.9 (Gilaad, 1978), se presentan los mecanismos más usados.

En el tipo 1a se trata de un disco perforado de material flexible (elastómero). Un incremento en la presión de entrada, produce una deformación en el disco que disminuye el área de paso. Cuando la presión decrece el disco recupera su forma original. En el tipo 1b, el disco es sustituido por una esfera, de material flexible, con un funcionamiento similar al anterior. En el tipo 1c, el paso de agua tiene tres dimensiones fijas, pero la forma del cuarto lado está regulada por una membrana de material flexible. En el tipo 1d, un resorte controla la posición de un pistón respecto al orificio de salida. Estos aparatos presentan en su funcionamiento el fenómeno de histéresis que lleva consigo cualquier mecanismo que utilice elementos elásticos.

Si a una presión P_1 el área de paso en el regulador es A_1 , y el caudal sería $Q_1 = f(A_1, P_1)$. Si elevamos la presión a un valor P_2 el área de paso se reducirá a A_2 de forma que el caudal permanecerá constante $Q_2 = f(A_2, P_2)$, siendo $Q_2 \approx Q_1$, si P_1 y P_2 están en el rango de presiones de trabajo del regulador. Si se disminuye la presión hasta alcanzar nuevamente el valor P_1 , el área de paso no volverá a ser A_1 , sino que alcanzará un valor A_3 menor que A_1 , por lo que el caudal $Q_1' = f(A_3, P_1)$ será menor que el original Q_1 . Por tanto, debido al fenómeno de histéresis, se obtendrán dos caudales Q_1 y Q_1' para un mismo valor de presión P_1 según se alcance este valor mediante aumento o disminución

de presiones (Figura 2.10). La amplitud de este fenómeno depende de las características del material utilizado, siendo deseable que sea lo más estrecha posible.

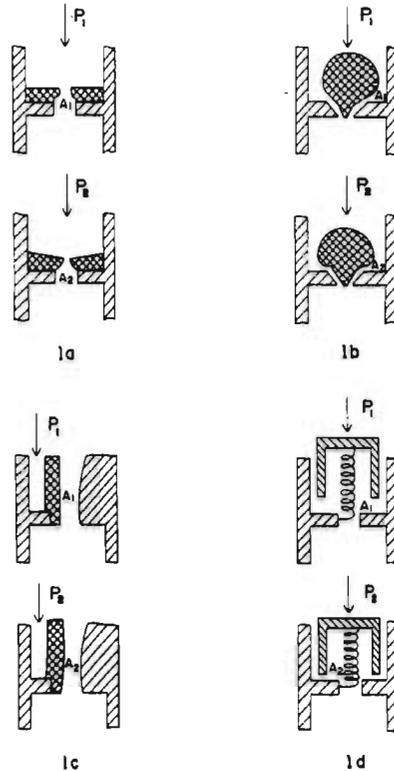


Figura 2.9. Reguladores de caudal más utilizados en sistemas convencionales de riego por goteo.

2.8.1.1. CAUDALES Y PRESIONES DE TRABAJO

Se denomina caudal nominal (Q_n) de un regulador a aquel para el que ha sido calibrado este. La máxima desviación admisible de este caudal debe estar dentro del rango $Q_n \pm 7\%$. En la Figura 2.11 se muestra la relación caudal - presión y el ciclo de histéresis de un regulador, la curva 1 muestra la relación caudal - presión en una tubería sin regulador, y la curva 2 muestra la misma relación con regulador.

Se determina, por tanto, sobre la rama superior de la curva 2. El rango de presiones de trabajo, es aquel que proporciona caudales comprendidos entre el $\pm 7\%$ del nominal. Será, por tanto, la diferencia $P_{m\acute{a}x} - P_{m\acute{i}n}$.

La presión nominal (P_n) es aquella que produciría el caudal nominal sin regulador de caudal (curva 1). La diferencia entre la presión de trabajo a la que se obtendría el caudal nominal con regulador y la presión nominal se denomina pérdida de carga nominal y es importante que sea lo más pequeña posible para evitar tener que dar al sistema de riego presiones altas.

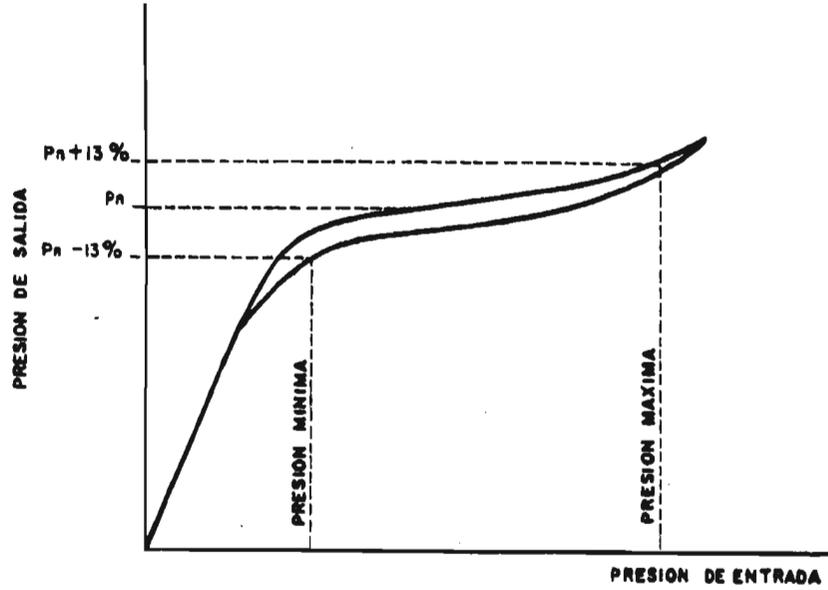


Figura 2.10. Fenómeno de histéresis en un regulador de caudal típico.

La presión mínima de trabajo, es la mayor que produce el caudal mínimo admisible ($Q_n - 7\%$). Se determina sobre la rama inferior de la curva 2, la presión máxima de trabajo, es la menor que produce el caudal máximo admisible ($Q_n + 7\%$).

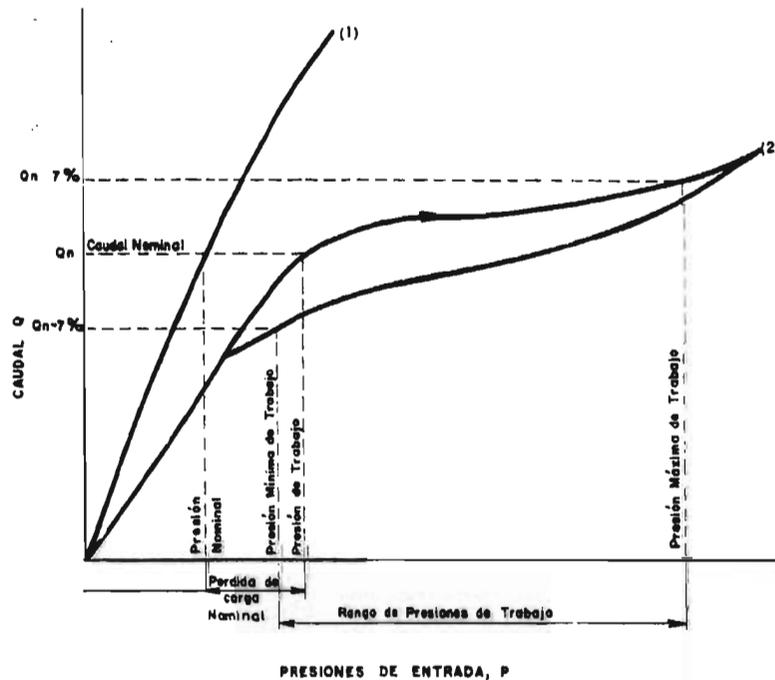


Figura 2.11. Regulador de caudal, curva caudal - presión de entrada (ciclo de histéresis).

La presión de salida afecta al régimen de trabajo del regulador, puesto que es necesaria una diferencia de presión umbral (presión a la entrada menos presión a la salida para que el regulador actúe. Por tanto, a medida que sea necesario operar con presiones mayores a la salida, la presión mínima de trabajo, aumentará consecuentemente.

2.8.1.1.1. RECOMENDACIONES Y USOS

- Los reguladores de caudal deben ser resistentes a los productos químicos que se inyecten en el agua de riego y no verse afectados por pequeñas partículas en suspensión. En la práctica usual consiste en instalarlos antes de cada emisor, también se pueden colocar en el inicio de subunidades y unidades de riego
- En el proceso de fabricación de los reguladores se producen inevitables diferencias, de forma que sus curvas de funcionamiento no son idénticas. Esto hace que dos reguladores del mismo tipo, trabajando a la misma presión, suministren caudales ligeramente diferentes. Para poder evaluar la bondad en la fabricación de los reguladores se define un coeficiente de variación, de forma análoga a como se hizo para los emisores. Este coeficiente de variación de fabricación es un dato importante para estimar las uniformidades de riego.

2.8.2. REGULADORES DE PRESIÓN

Son aquellos dispositivos capaces de regular la presión de salida dentro de un rango de presiones de entrada en el cual actúan eficientemente.

El mecanismo que acciona la mayor parte de los reguladores (Figura 2.12) es un pistón con un resorte, que se mueve dentro de una carcaza o cuerpo provocando un estrangulamiento del paso de agua. En el modelo de regulador de presión de la Figura 2.12 pueden apreciarse los elementos siguientes:

Cuerpo o carcaza (1), pistón (2), resorte (3), carcaza superior (4), tornillo de ajuste de la tensión del resorte (5), disco obturador (6), junta del disco obturador (7), asiento de cierre del obturador (8), cámara alta (9), juntas de estanqueidad (10) y conducto a la cámara (11).

Una vez puesta en régimen la tubería, la presión aguas abajo actúa por un lado bajo la sección inferior del disco obturador (6) y por otro sobre la sección del pistón situado en la cámara alta (11). Estas dos fuerzas dan lugar a un desplazamiento del pistón hacia arriba y, por tanto, el cierre del disco obturador sobre su asiento. El resorte (3) mantiene el disco obturador abierto mientras la fuerza que ejerce hacia abajo es superior a la de la presión aguas abajo. Cuando ésta la supera, el disco obturador tiende a cerrarse. La operación inversa se realiza cuando la presión aguas abajo disminuye: el disco obturador tiende a abrirse.

La presión de salida será tanto más grande cuanto mayor sea la compresión del resorte. Esta se puede variar maniobrando el tornillo de ajuste (5). Hay que hacer notar que la presión aguas arriba no realiza ninguna función de regulación ya que este equilibrada por las secciones internas del asiento y del pistón.

Los resortes que llevan estos reguladores producen un fenómeno de histéresis análogo al comentado para los reguladores de caudal.

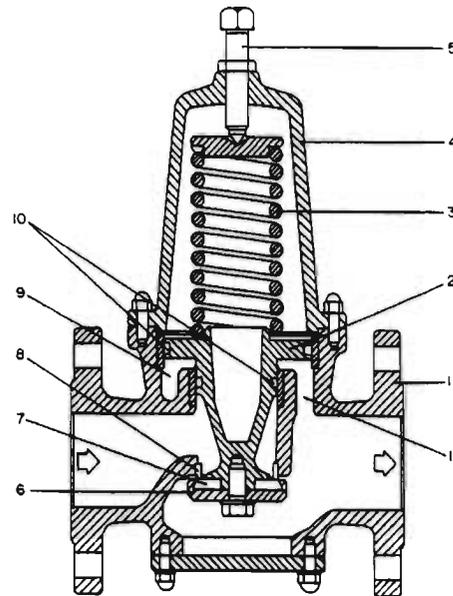


Figura 2.12. Apariencia de un regulador de presión.

2.8.2.1. CAUDALES Y PRESIONES DE TRABAJO

Se denomina presión nominal de un regulador aquella presión de salida para la cual ha sido calibrado. La máxima desviación admisible deberá estar aproximadamente en el rango $P_n \pm 13\%$. De forma análoga a la curva caudal - presión de entrada de los reguladores de caudal (Figura 2.10), en la Figura 2.11 se presenta una curva presión de salida - presión de entrada para un regulador de presión, donde se puede apreciar el fenómeno de histéresis. Igualmente son válidos los conceptos citados de presión mínima, presión máxima y rango de presiones de trabajo.

La curva de la Figura 2.11 correspondería a una red de riego dada, donde el rango de presiones admitido ($P_n \pm 13\%$), produciría un rango de caudales de aproximadamente $\pm 7\%$, análogo al definido para los reguladores de caudal.

2.8.2.1.1. RECOMENDACIONES Y USOS

Un buen regulador debe cumplir los requisitos siguientes:

- La pérdida de carga intrínseca y el efecto de histéresis deben ser lo más reducidos posible.
- El funcionamiento del regulador no debe ser afectado por agua que contenga limo, arena, algas, etc., en la proporción que normalmente se encuentran en el agua de riego.
- Su construcción y montaje deben ser simples, con pocas necesidades de mantenimiento.

- El rango de regulación definido por P_{\max} - P_{\min} debe ser como mínimo tres veces la presión nominal (P_n).
- Cuando la presión en la red de riego sea superior a la P_{\max} de trabajo, se puede optar por colocar dos o más reguladores en serie, de forma que sus rangos de actuación se sumen y permitan provocar la reducción deseada. Cuando, además, de las presiones dinámicas se desea controlar la presión estática en la red, pueden utilizarse modelos de reguladores de presión capaces de controlar ambas presiones, según se ha explicado. En caso de que estos reductores sean proporcionales, debe tenerse presente para el cálculo de la presión de salida que el radio de reducción se cumple tanto para la presión estática como para la dinámica.

2.9. OTROS DISPOSITIVOS DE CONTROL

2.9.1. MANÓMETROS

Para realizar un buen manejo del riego es indispensable conocer las presiones existentes, tanto en los diferentes elementos que componen el cabezal como en puntos singulares de la red de riego. El objetivo más importante de la medida de la presión es garantizar el correcto funcionamiento de la instalación y detectar las posibles averías. También permite saber en que momento se deben limpiar los filtros, el fertilizar correctamente, y comprobar que las piezas especiales operan con normalidad, etc. Estas presiones son medidas en la mayoría de los casos con manómetros metálicos, tipo Bourdon. En estos, la presión del líquido se comunica a un tubo flexible curvado, que tiene un extremo cerrado y conectado, por un acoplamiento mecánico (engranaje de cremallera) a una aguja indicadora que se mueve sobre una escala graduada. La presión del líquido tiende a desenrollar el tubo curvado, produciendo un movimiento de la aguja. La lectura 0 de la escala corresponde a la presión atmosférica. La precisión de este instrumento depende del rango de medida y de su calibración. Para los propósitos citados anteriormente es suficiente instalar modelos que permitan medir presiones de al menos 1 m aproximadamente. Conviene elegir los aparatos con un rango de medida lo más cercano posible al rango de presiones que se vaya a medir.

En instalaciones que funcionan a muy baja presión (menos de 3 m), son útiles los manómetros de columna de agua.

2.9.2. ROTÁMETROS

Son dispositivos que miden el flujo que circula a través de una tubería. Se componen de una cámara cilíndrica o cónica, en el interior de la cual se aloja un balón de volumen y peso conocidos. El rotámetro se coloca en posición vertical, bien directamente en la tubería o en derivación sobre ella, según modelos y caudales a medir. El agua circula en dirección ascendente desplazando más o menos el balón hacia arriba, según sea la magnitud del flujo. Con la ayuda de una escala se miden los desplazamientos del balón, que están en relación proporcional al flujo que circula.

2.9.3. CONTADORES DE AGUA

Cuando interesa un control del volumen de agua que pasa por la instalación pueden colocarse contadores de líquidos, eligiendo, entre los numerosos modelos existentes en el mercado, el más adecuado en cada caso.

Para el correcto funcionamiento de todos estos aparatos (rotámetros, manómetros y contadores de líquidos) deben instalarse en puntos donde no existan turbulencias provocadas por piezas especiales. En general, antes y después del aparato deben mantenerse tramos rectos, libres de puntos singulares, de una longitud del orden de 20 veces el diámetro. No obstante, deben consultarse las normas de instalación que generalmente suministran los fabricantes.

3. APROXIMACIONES INICIALES A LA PROBLEMÁTICA DEL FUNCIONAMIENTO DEL RPBC

3.1. CONCEPTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

Como se puede ilustrar en la Figura 3.1, el problema hidráulico experimental que lleva consigo el modelar el tipo del flujo que se presenta en el RPBC, se puede dividir en dos partes: La primera en la que se determine la variación de la carga de presión en el lateral a lo largo de éste y mientras sale por cada emisor un caudal de diseño q_{Lj} y la segunda y no menos importante, el comportamiento de la descarga vertida por el emisor respecto de su geometría y la carga disponibles H_{Lj} o ΔH_j en el punto de interconexión con el lateral. Ambas problemáticas enmarcadas dentro de otras variables relativas al funcionamiento mismo, como lo son:

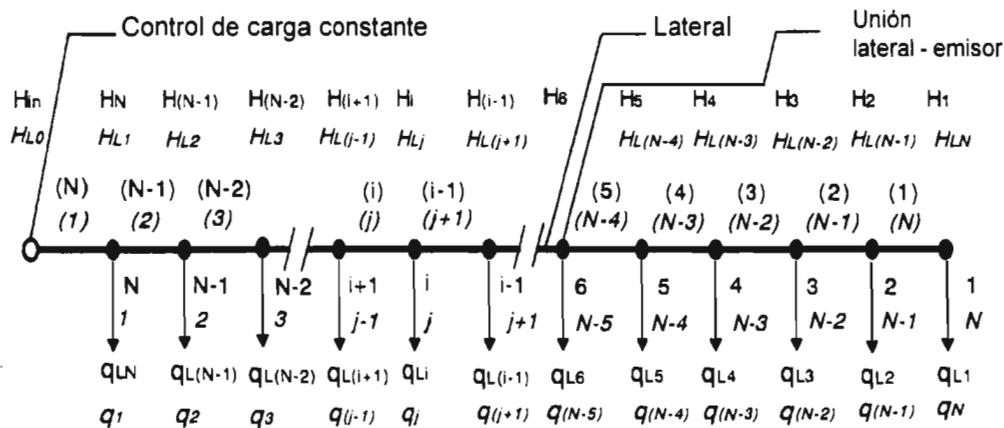


Figura 3.1. Modelo conceptual para el diseño de las pruebas de laboratorio y numeración utilizada en la programación.

- Los distintos regímenes de flujo que se dan en el lateral, básicamente laminar y crítico.
- Las dimensiones (diámetros y longitudes) de laterales y emisores.
- El tipo de interconexión entre lateral y emisor.
- La variación de la viscosidad cinemática (ν) y del peso específico (γ) en función de la temperatura de funcionamiento.

Debido a la importancia que tienen estas dos últimas variables, se obtuvieron ecuaciones de tipo exponencial y polinomial respectivamente (Figuras 3.2 y 3.3), con el objeto de representar de forma cuantitativa, el comportamiento de estas propiedades del agua, en los rangos de funcionamiento previstos (0 a 55 °C), y además para facilitar la elaboración del modelo numérico de cálculo del RPBC.

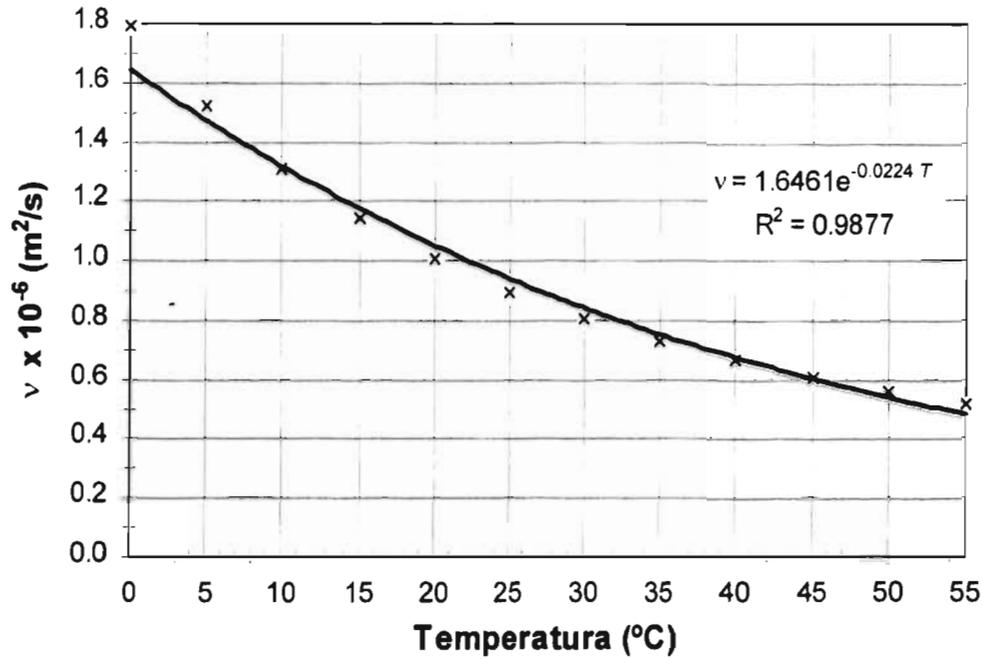


Figura 3.2. Viscosidad cinemática en los rangos de funcionamiento previstos (en unidades del sistema internacional).

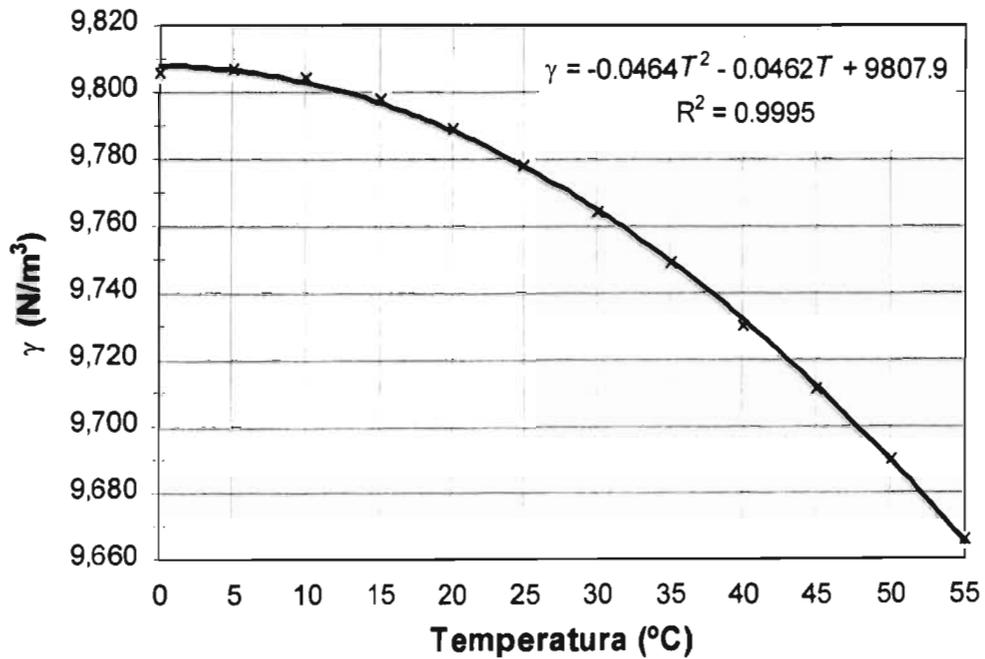


Figura 3.3. Peso específico en los rangos de funcionamiento previstos (en unidades del sistema internacional).

Para poder determinar una combinación de diámetros, tipos de unión lateral - emisor, longitudes, caudales de operación y cargas requeridas, que permitieran la implantación del equipo experimental, se planteo un modelo numérico bastante sencillo, con el objeto de diseñar adecuadamente las pruebas a realizar, la representación del funcionamiento se muestra de manera esquemática en la Figura 3.1, la cual ilustra un flujo linealmente variado y permanente.

Los experimentos se realizaron en dos instalaciones: Una en el laboratorio, para estudiar el comportamiento de los emisores, y la otra en el campo para ver el funcionamiento hidráulico de las líneas laterales.

3.2. ANÁLISIS CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO

Se simularon numéricamente el comportamiento ante distintas longitudes y diámetros de lateral, teniendo en cuenta distintas combinaciones de diámetros en los emisores.

Se propone una ecuación de pérdidas distribuidas para cada tramo en función de la posición que ocupa.

$$h_{fi} = f_i \frac{l}{D_L} \frac{Q_i^2}{2gA_L^2} \quad (3.1)$$

donde

- h_{fi} pérdida distribuida en el i-ésimo tramo.
- f_i factor de fricción para el tramo analizado.
- l separación entre emisores.
- D_L diámetro interior del lateral.
- Q_i caudal que pasa por el tramo en análisis.
- g aceleración gravitacional local.
- A_L área del lateral en el tramo analizado.

3.3. ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR "f" DE FRICCIÓN

El diagrama de Moody de la Figura 3.4 es un medio conveniente y lo suficientemente preciso para determinar el factor de fricción cuando se resuelven problemas mediante cálculos manuales. Sin embargo, si los cálculos se requieren hacer a través de modelos numéricos, como en el RPBC, es necesario tener ecuaciones con que obtener dicho factor. La ecuación que se utiliza en el trabajo reportado por Moody (1944) cubre tres diferentes zonas del diagrama. En la *zona de flujo laminar*, para valores del número de Reynolds por debajo de 2000, f puede encontrarse con la ecuación siguiente:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (3.2)$$

Esta relación, esta representada en el diagrama de Moody como una línea recta en el lado izquierdo del diagrama. Desde luego, para los números de Reynolds desde 2000 hasta 4000, el flujo se encuentra en la *zona crítica* (transición entre laminar y

turbulento) donde es incierto el comportamiento de f , por tanto en el modelo numérico desarrollado aquí se asume para los valores de f los que se obtienen de evaluar la ecuación de C.E Colebrook en dicho rango, dado que como se menciona anteriormente los materiales más adecuados para el RPBC son tuberías de PVC o de polietileno y como se menciona también dichas tuberías se comportan como hidráulicamente lisas, y aunque es probable una sobre estimación del factor f , este estaría siempre del lado de lado conservativo.

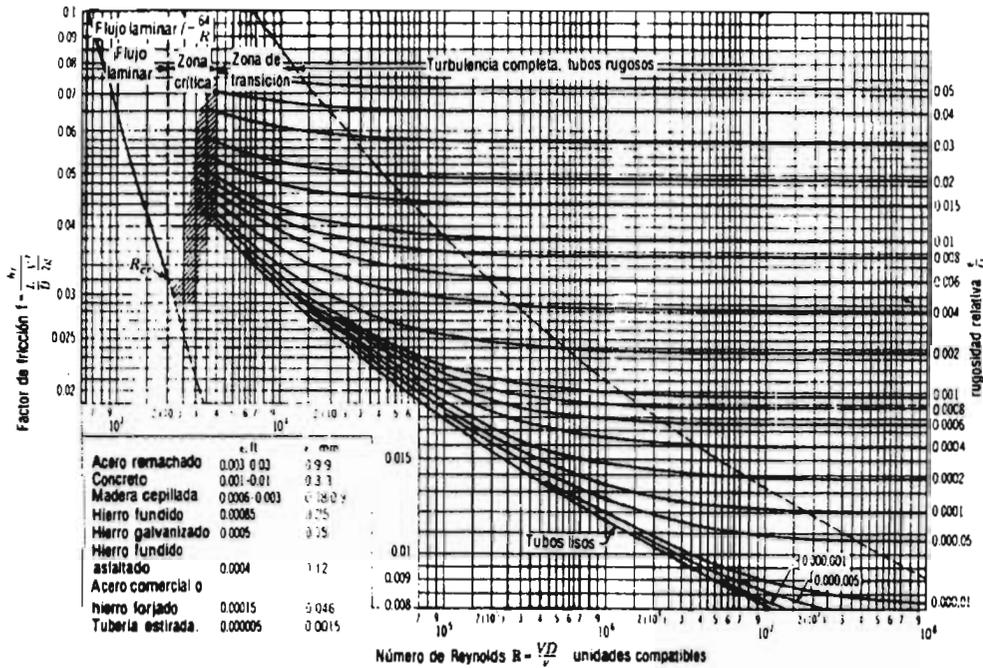


Figura 3.4. Diagrama de Moody (adaptado de Streeter - Wylie, 1994).

A partir de números de Reynolds superiores a 4000, el flujo es *turbulento*. Sin embargo, sin embargo en esta región se pueden distinguir dos zonas de interés; hacia el lado derecho del diagrama, el flujo está en la zona de turbulencia completa, se puede observar que el valor de f no depende del número de Reynolds, sino sólo de la rugosidad relativa ϵ/D . En este intervalo, se aplica la siguiente ecuación para el cálculo de f .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{3.71}{\epsilon/D} \right) \quad (3.3)$$

La frontera de esta zona es la línea punteada parte de la parte superior izquierda a la parte inferior derecha del diagrama de Moody. La ecuación de esta línea es:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \frac{R_e}{200(D/\epsilon)} \quad (3.4)$$

La tercera zona del diagrama de Moody, que se conoce como *zona de transición*, se encuentra entre la zona de *turbulencia completa* y la línea que se identifica como *tubos lisos*, la cual se representa mediante la ecuación siguiente:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} \right) \quad (3.5)$$

Siendo lisos, estos conductos no presentan irregularidades superficiales al flujo, de modo que el factor de fricción solo es función del número de Reynolds. En la zona de transición, el factor de fricción es función tanto del número de Reynolds como de la rugosidad relativa ε/D . C.E Colebrook desarrolló la relación para el factor de fricción en esta zona:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2.51}{R_e \sqrt{f}} + \frac{\varepsilon/D}{3.71} \right) \quad (4.6)$$

para las ecuaciones 3.2 a 3.6 se tiene que:

- ε rugosidad absoluta, en mm (se toma 0.02 para el PVC y tuberías de polietileno).
- f factor de fricción para el cálculo de pérdidas en conductos a presión.
- D diámetro del conducto a diseñar, en mm.
- R_e número de Reynolds.

Trabajos anteriores sobre el desarrollo de ecuaciones fueron hechos por varios investigadores, entre los que destacan C.E. Colebrook, L. Prandtl, H. Rouse, T. van Karman y J. Nikuradse. La ecuación (3.7) se aproxima a la ecuación para turbulencia completa, ecuación (3.3), para números de Reynolds grandes, a medida que el primer término que está dentro del paréntesis de la ecuación 3.6, se vuelve muy pequeño. Se observa también, que, para valores pequeños de ε/D , el segundo término se vuelve pequeño y la ecuación se reduce a la correspondiente a conductos lisos, ecuación (3.5).

3.3.1. ECUACIÓN EXPLÍCITA PARA EL FACTOR DE FRICCIÓN

Como la ecuación (3.6) requiere un esquema de solución implícito. P.K. Swamee y A.K. Jain (1976), desarrollaron la ecuación (3.7).

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{R_e^{0.9}} \right) \right)^2} \quad (3.7)$$

La cual produce valores para f que se encuentran entre 1% del valor de los correspondientes a la ecuación de Colebrook (3.6), dentro del intervalo de rugosidad relativa, ε/D , comprendido entre 0.001 y 1×10^{-6} , y para números de Reynolds que van de 5000 hasta 1×10^8 . esta es virtualmente la zona de turbulencia completa del diagrama de Moody.

3.4. DEFINICIÓN DEL RANGO DE CARGAS EN UN LATERAL DEL RPBC

Teniendo en cuenta los conceptos establecidos en las secciones anteriores se procedió a realizar los cálculos reportados en las Tablas 3.1 a 3.3, en las cuales se siguió la siguiente secuencia de cálculo: En las columnas 1 a 3 se muestran la numeración previamente establecida, longitud de cada tramo y diámetro respectivamente. En la columna 4 se distribuyen linealmente los caudales; en la columnas 5 y 6, las características hidráulicas (V_{fi} , R_{ei}) y por último, en las columnas 7 y 8 las correspondientes pérdidas (h_{fi} , Σh_{fi}).

Tramo N°	Long, L_{fi} (m)	Diám, D_{fi} (m)	Caudal, Q_{fi}		Vel, V_{fi} (m/s)	R_{ei} (adim.)	Pérd, h_{fi} (m)	Σh_{fi} (m)
			(m^3/s)	(l/h)				
1	1.0	0.0167	0.0000194	70	0.089172	1,475	0.001058	0.0010583
2	1.0	0.0167	0.0000189	68	0.086625	1,433	0.001028	0.0020863
3	1.0	0.0167	0.0000183	66	0.084077	1,391	0.000998	0.0030841
4	1.0	0.0167	0.0000178	64	0.081529	1,349	0.000968	0.0040517
5	1.0	0.0167	0.0000172	62	0.078981	1,307	0.000937	0.0049890
6	1.0	0.0167	0.0000167	60	0.076434	1,265	0.000907	0.0058961
7	1.0	0.0167	0.0000161	58	0.073886	1,223	0.000877	0.0067729
8	1.0	0.0167	0.0000156	56	0.071338	1,180	0.000847	0.0076195
9	1.0	0.0167	0.0000150	54	0.068790	1,138	0.000816	0.0084359
10	1.0	0.0167	0.0000144	52	0.066242	1,096	0.000786	0.0092221
11	1.0	0.0167	0.0000139	50	0.063695	1,054	0.000756	0.0099780
12	1.0	0.0167	0.0000133	48	0.061147	1,012	0.000726	0.0107036
13	1.0	0.0167	0.0000128	46	0.058599	970	0.000695	0.0113991
14	1.0	0.0167	0.0000122	44	0.056051	927	0.000665	0.0120643
15	1.0	0.0167	0.0000117	42	0.053503	885	0.000635	0.0126992
16	1.0	0.0167	0.0000111	40	0.050956	843	0.000605	0.0133040
17	1.0	0.0167	0.0000106	38	0.048408	801	0.000574	0.0138784
18	1.0	0.0167	0.0000100	36	0.045860	759	0.000544	0.0144227
19	1.0	0.0167	0.0000094	34	0.043312	717	0.000514	0.0149367
20	1.0	0.0167	0.0000089	32	0.040765	675	0.000484	0.0154205
21	1.0	0.0167	0.0000083	30	0.038217	632	0.000454	0.0158740
22	1.0	0.0167	0.0000078	28	0.035669	590	0.000423	0.0162973
23	1.0	0.0167	0.0000072	26	0.033121	548	0.000393	0.0166904
24	1.0	0.0167	0.0000067	24	0.030573	506	0.000363	0.0170532
25	1.0	0.0167	0.0000061	22	0.028026	464	0.000333	0.0173858
26	1.0	0.0167	0.0000056	20	0.025478	422	0.000302	0.0176882
27	1.0	0.0167	0.0000050	18	0.022930	379	0.000272	0.0179603
28	1.0	0.0167	0.0000044	16	0.020382	337	0.000242	0.0182022
29	1.0	0.0167	0.0000039	14	0.017834	295	0.000212	0.0184139
30	1.0	0.0167	0.0000033	12	0.015287	253	0.000181	0.0185953
31	1.0	0.0167	0.0000028	10	0.012739	211	0.000151	0.0187465
32	1.0	0.0167	0.0000022	8	0.010191	169	0.000121	0.0188674
33	1.0	0.0167	0.0000017	6	0.007643	126	0.000091	0.0189581
34	1.0	0.0167	0.0000011	4	0.005096	84	0.000060	0.0190186
35	1.0	0.0167	0.0000006	2	0.002548	42	0.000030	0.0190488

Tabla 3.1. Cálculos preliminares de la evolución de las pérdidas de carga en una tubería lateral hipotética de diámetro interior 3/4" con un caudal de diseño $Q_d = 2$ l/h por emisor.

Nótese que a lo largo de los 35 tramos entre emisor y emisor se presenta régimen laminar ($42 \leq R_{ei} \leq 1475$). Estos resultados preliminares sugieren que un lateral, bajo estas condiciones específicas solo requeriría de una carga disponible al inicio del aproximadamente 2 cm, para lograr descargar por cada emisor 2 l/h. Se debe notar que el modelo es bastante sencillo y solo pretende proporcionar resultados aproximados que den una idea del orden de magnitud de las cargas que utiliza el RPBC, posteriormente se elabora la metodología para tener en cuenta el comportamiento de los emisores y las variaciones en el caudal que descarga.

Tramo N°	Long, L_{ii} (m)	Diám, D_{ii} (m)	Caudal, Q_{ii}		Vel, V_{ii} (m/s)	R_{ei} (adim.)	Pérd, h_{fi} (m)	Σh_{fi} (m)
			(m^3/s)	(l/h)				
1	1.0	0.0167	0.0000389	140	0.178345	2,951	0.004276	0.0042765
2	1.0	0.0167	0.0000378	136	0.173249	2,867	0.004072	0.0083481
3	1.0	0.0167	0.0000367	132	0.168154	2,782	0.003871	0.0122192
4	1.0	0.0167	0.0000356	128	0.163058	2,698	0.003675	0.0158940
5	1.0	0.0167	0.0000344	124	0.157963	2,614	0.003483	0.0193769
6	1.0	0.0167	0.0000333	120	0.152867	2,529	0.003295	0.0226722
7	1.0	0.0167	0.0000322	116	0.147771	2,445	0.003112	0.0257844
8	1.0	0.0167	0.0000311	112	0.142676	2,361	0.002933	0.0287179
9	1.0	0.0167	0.0000300	108	0.137580	2,276	0.001633	0.0303506
10	1.0	0.0167	0.0000289	104	0.132485	2,192	0.001572	0.0319229
11	1.0	0.0167	0.0000278	100	0.127389	2,108	0.001512	0.0334347
12	1.0	0.0167	0.0000267	96	0.122294	2,024	0.001451	0.0348861
13	1.0	0.0167	0.0000256	92	0.117198	1,939	0.001391	0.0362769
14	1.0	0.0167	0.0000244	88	0.112102	1,855	0.001330	0.0376073
15	1.0	0.0167	0.0000233	84	0.107007	1,771	0.001270	0.0388772
16	1.0	0.0167	0.0000222	80	0.101911	1,686	0.001209	0.0400867
17	1.0	0.0167	0.0000211	76	0.096816	1,602	0.001149	0.0412357
18	1.0	0.0167	0.0000200	72	0.091720	1,518	0.001089	0.0423242
19	1.0	0.0167	0.0000189	68	0.086625	1,433	0.001028	0.0433522
20	1.0	0.0167	0.0000178	64	0.081529	1,349	0.000968	0.0443198
21	1.0	0.0167	0.0000167	60	0.076434	1,265	0.000907	0.0452269
22	1.0	0.0167	0.0000156	56	0.071338	1,180	0.000847	0.0460735
23	1.0	0.0167	0.0000144	52	0.066242	1,096	0.000786	0.0468596
24	1.0	0.0167	0.0000133	48	0.061147	1,012	0.000726	0.0475853
25	1.0	0.0167	0.0000122	44	0.056051	927	0.000665	0.0482505
26	1.0	0.0167	0.0000111	40	0.050956	843	0.000605	0.0488552
27	1.0	0.0167	0.0000100	36	0.045860	759	0.000544	0.0493995
28	1.0	0.0167	0.0000089	32	0.040765	675	0.000484	0.0498832
29	1.0	0.0167	0.0000078	28	0.035669	590	0.000423	0.0503065
30	1.0	0.0167	0.0000067	24	0.030573	506	0.000363	0.0506694
31	1.0	0.0167	0.0000056	20	0.025478	422	0.000302	0.0509717
32	1.0	0.0167	0.0000044	16	0.020382	337	0.000242	0.0512136
33	1.0	0.0167	0.0000033	12	0.015287	253	0.000181	0.0513951
34	1.0	0.0167	0.0000022	8	0.010191	169	0.000121	0.0515160
35	1.0	0.0167	0.0000011	4	0.005096	84	0.000060	0.0515765

Tabla 3.2. Cálculos preliminares de la evolución de las pérdidas de carga en una tubería lateral hipotética de diámetro interior 3/4" con un caudal de diseño $Q_d = 4$ l/h por emisor.

Se puede observar que en los 12 primeros tramos se presenta flujo en la zona crítica, ($2024 \leq R_{ei} \leq 2951$), mientras que en los restantes 23 tramos en régimen de flujo es laminar ($84 \leq R_{ei} \leq 1939$). Estos resultados preliminares sugieren que un lateral, bajo estas condiciones específicas solo requeriría de una carga disponible al inicio del aproximadamente 5 cm, para lograr descargar por cada emisor 4 l/h. Se debe notar además, que el modelo es bastante sencillo y solo pretende proporcionar resultados aproximados que den una idea del orden de magnitud de las cargas que utiliza el RPBC, posteriormente se elabora la metodología para tener en cuenta el comportamiento de los emisores y la variación en su comportamiento hidráulico, debido a los cambios de temperatura que se den en él.

Tramo N°	Long. L_{ii} (m)	Diám. D_{ii} (m)	Caudal, Q_{ii}		Vel. V_{ii} (m/s)	R_{ei} (adim.)	Pérd. h_{fi} (m)	Σh_{fi} (m)
			(m^3/s)	(l/h)				
1	1.0	0.0167	0.0000778	280	0.356690	5,902	0.013966	0.0139661
2	1.0	0.0167	0.0000756	272	0.346499	5,733	0.013287	0.0272530
3	1.0	0.0167	0.0000733	264	0.336307	5,565	0.012622	0.0398754
4	1.0	0.0167	0.0000711	256	0.326116	5,396	0.011973	0.0518479
5	1.0	0.0167	0.0000689	248	0.315925	5,227	0.011337	0.0631854
6	1.0	0.0167	0.0000667	240	0.305734	5,059	0.010717	0.0739027
7	1.0	0.0167	0.0000644	232	0.295543	4,890	0.010112	0.0840151
8	1.0	0.0167	0.0000622	224	0.285352	4,722	0.009522	0.0935375
9	1.0	0.0167	0.0000600	216	0.275161	4,553	0.008947	0.1024844
10	1.0	0.0167	0.0000578	208	0.264969	4,384	0.008388	0.1108728
11	1.0	0.0167	0.0000556	200	0.254778	4,216	0.007845	0.1187176
12	1.0	0.0167	0.0000533	192	0.244587	4,047	0.007318	0.1260358
13	1.0	0.0167	0.0000511	184	0.234396	3,878	0.006804	0.1328402
14	1.0	0.0167	0.0000489	176	0.224205	3,710	0.006308	0.1391485
15	1.0	0.0167	0.0000467	168	0.214014	3,541	0.005828	0.1449763
16	1.0	0.0167	0.0000444	160	0.203823	3,373	0.005364	0.1503402
17	1.0	0.0167	0.0000422	152	0.193632	3,204	0.004916	0.1552565
18	1.0	0.0167	0.0000400	144	0.183440	3,035	0.004486	0.1597421
19	1.0	0.0167	0.0000378	136	0.173249	2,867	0.004073	0.1638147
20	1.0	0.0167	0.0000356	128	0.163058	2,698	0.003675	0.1674896
21	1.0	0.0167	0.0000333	120	0.152867	2,529	0.003295	0.1707849
22	1.0	0.0167	0.0000311	112	0.142676	2,361	0.002933	0.1737177
23	1.0	0.0167	0.0000289	104	0.132485	2,192	0.001572	0.1752900
24	1.0	0.0167	0.0000267	96	0.122294	2,024	0.001451	0.1767414
25	1.0	0.0167	0.0000244	88	0.112102	1,855	0.001330	0.1780718
26	1.0	0.0167	0.0000222	80	0.101911	1,686	0.001209	0.1792812
27	1.0	0.0167	0.0000200	72	0.091720	1,518	0.001089	0.1803697
28	1.0	0.0167	0.0000178	64	0.081529	1,349	0.000968	0.1813373
29	1.0	0.0167	0.0000156	56	0.071338	1,180	0.000847	0.1821839
30	1.0	0.0167	0.0000133	48	0.061147	1,012	0.000726	0.1829096
31	1.0	0.0167	0.0000111	40	0.050956	843	0.000605	0.1835143
32	1.0	0.0167	0.0000089	32	0.040765	675	0.000484	0.1839981
33	1.0	0.0167	0.0000067	24	0.030573	506	0.000363	0.1843609
34	1.0	0.0167	0.0000044	16	0.020382	337	0.000242	0.1846028
35	1.0	0.0167	0.0000022	8	0.010191	169	0.000121	0.1847237

Tabla 3.3. Cálculos preliminares de la evolución de las pérdidas de carga en una tubería lateral hipotética de diámetro interior 3/4" con un caudal de diseño $Q_d = 8$ l/h por emisor.

Es un hecho que en los 12 primeros tramos se presenta régimen turbulento ($4047 \leq R_{ei} \leq 5902$), en los subsiguientes 12 tramos en régimen de flujo es de transición entre laminar y turbulento ($2024 \leq R_{ei} \leq 3878$) y en restantes y últimos 11 tramos el régimen es francamente laminar ($169 \leq R_{ei} \leq 1855$). Estos resultados preliminares sugieren que un lateral, bajo estas condiciones específicas solo requeriría de una carga disponible al inicio del aproximadamente 8 cm al inicio para lograr descargar por cada emisor 8 l/h. Se debe notar que el modelo es bastante sencillo y solo pretende proporcionar resultados aproximados que den una idea del orden de magnitud de las cargas que utiliza el RPBC.

En resumen, esta aproximación conceptual da como resultado que con un lateral de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y caudales que pueden ir de 2 hasta 8 l/h respectivamente, es posible con cargas al inicio del lateral menores de 1 metro, que es precisamente el rango de cargas previsto. Los resultados aquí reportados corresponden a una tubería que tiene un diámetro real (medido) de 16.7 mm y no de 19.1, si se considera que es de $\frac{3}{4}$ ". A manera de resumen de los resultados previos obtenidos se presenta la Figura 4.5, en la que se puede notar que el diámetro de $\frac{3}{4}$ ", para el lateral es adecuado, desde el punto de vista energético, pues presenta pérdidas moderadamente menores a un metro para longitudes normalmente usadas, en lateral de riego por goteo (30 a 100 m).

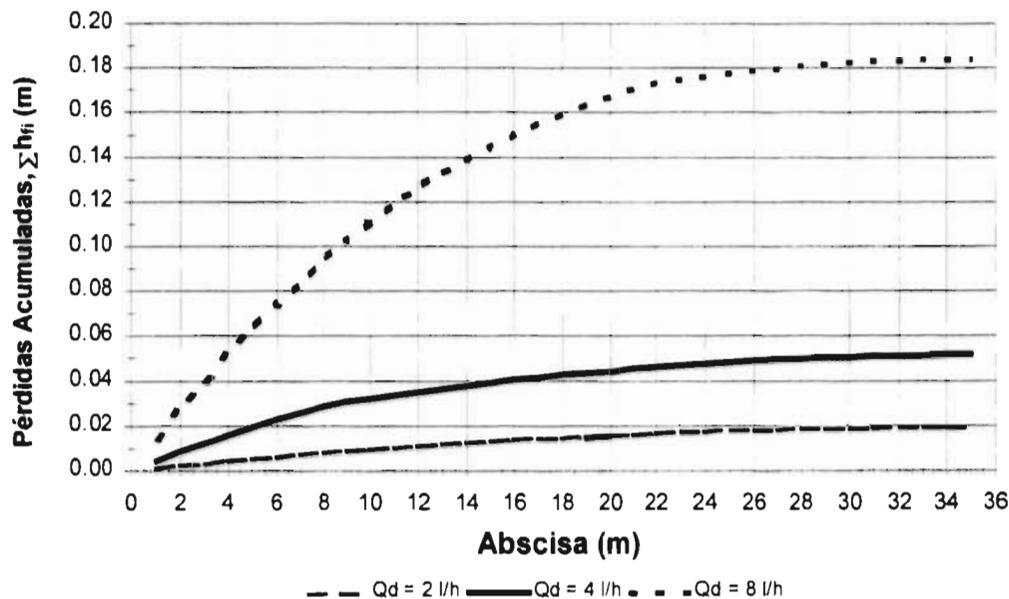


Figura 3.5. Comportamiento típico de las pérdidas en un lateral con diámetro de $\frac{3}{4}$ " y caudales de diseño de 2, 4 y 8 l/h por emisor.

Realizando un análisis diferencial del comportamiento de las pérdidas de carga en el lateral simulado (Figura 3.5), se puede notar que en aproximadamente en el primer tercio de la longitud del lateral, se presenta cerca del 70% de la pérdida total, mientras que el segundo tercio se produce un 25% y en el último tercio solo se produce el restante 5%. Adicionalmente se muestra la Figura 3.6, donde se puede observar la distribución

linealmente distribuida de caudales que se presentaría en un lateral típico del sistema de RPBC.

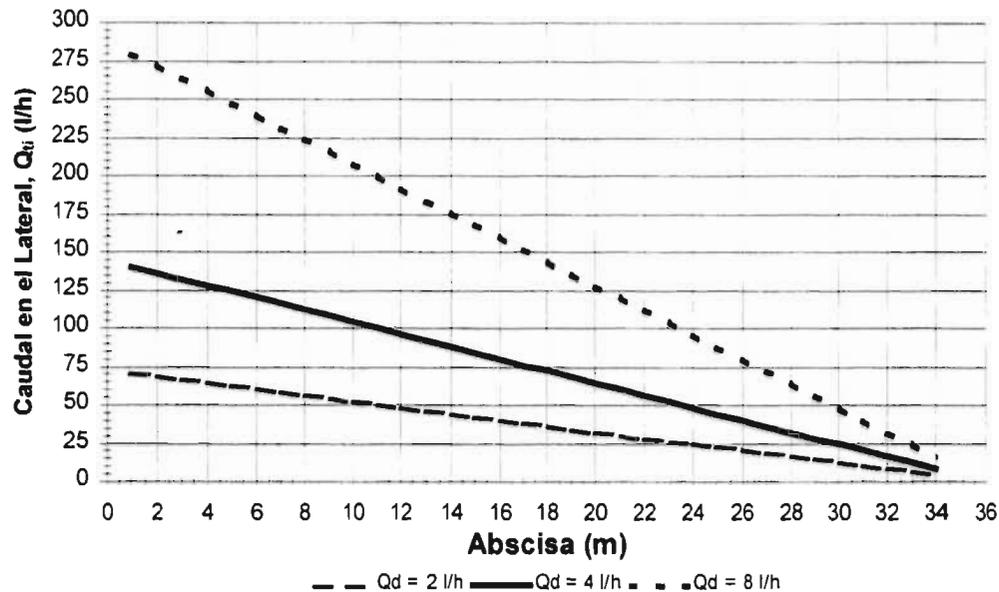


Figura 3.6. Comportamiento esperado de los caudales en un lateral con diámetro de $\frac{3}{4}$ " y caudales de diseño de 2, 4 y 8 l/h por emisor.

3.5. DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE CAMPO

Los análisis numéricos efectuados en la sección anterior sirven para definir la disposición que tendrá el tramo de prueba. De tal forma se disponen los siguientes componentes, ensamblados convenientemente e instalados en un terreno previamente nivelado, ubicado en los predios de la UAC, Torreón.

3.5.1. PLANTEAMIENTO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA LÍNEA LATERAL EN EL PROTOTIPO

El comportamiento de una línea lateral real, se estudia mediante una instalación en campo de 35 m de longitud de $\frac{3}{4}$ " en PVC hidráulico y con mangueras emisoras de $\frac{1}{8}$ " de diámetro separadas a cada metro. La apariencia de esta instalación se muestra en la Figura 3.7. En la que se puede diferenciar los componentes principales siguientes.

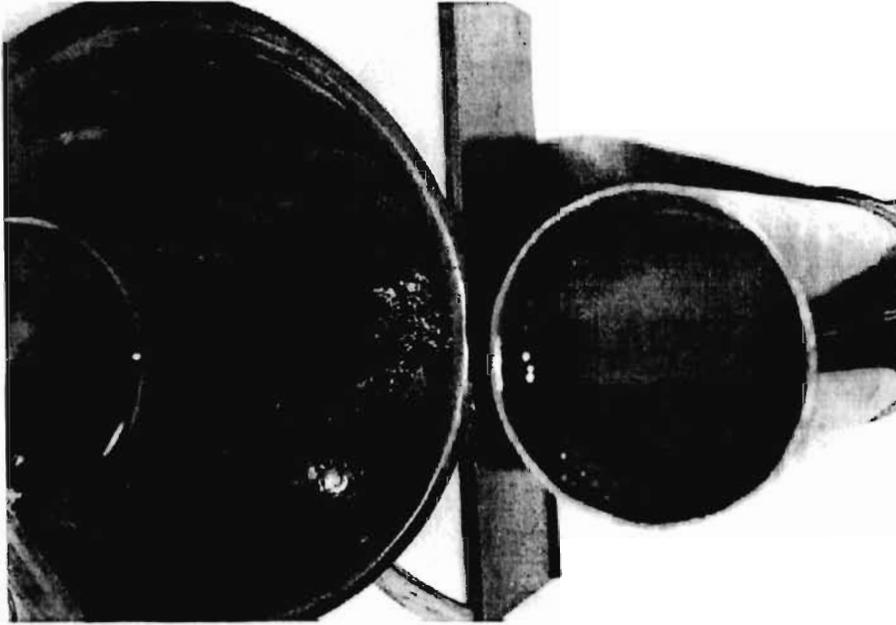
3.5.1.1. DISPOSITIVO DE ALIMENTACIÓN Y DE CARGA CONSTANTE

Tiene la apariencia ilustrada en la Fotografía 3.1, cada uno de sus componentes se describen de forma detallada en la sección 3.6 ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LOS EMISORES.

3.5.1.2. TRAMO DE PRUEBA

A la tubería lateral de 35 m se adhieren también, 35 emisores convenientemente interconectados, cada uno de estos está provisto de un soporte vertical removible, el cual posee una regla graduada. El extremo final del emisor puede ser posesionado y fijado al

soporte (por medio de una pinza), a una distancia ΔH , respecto de la línea de ceros, demarcada por la altitud de cero caudal en cada uno de los emisores.



Fotografía 3.1. Dispositivo de alimentación y de carga constante diseñado para la instalación del prototipo.

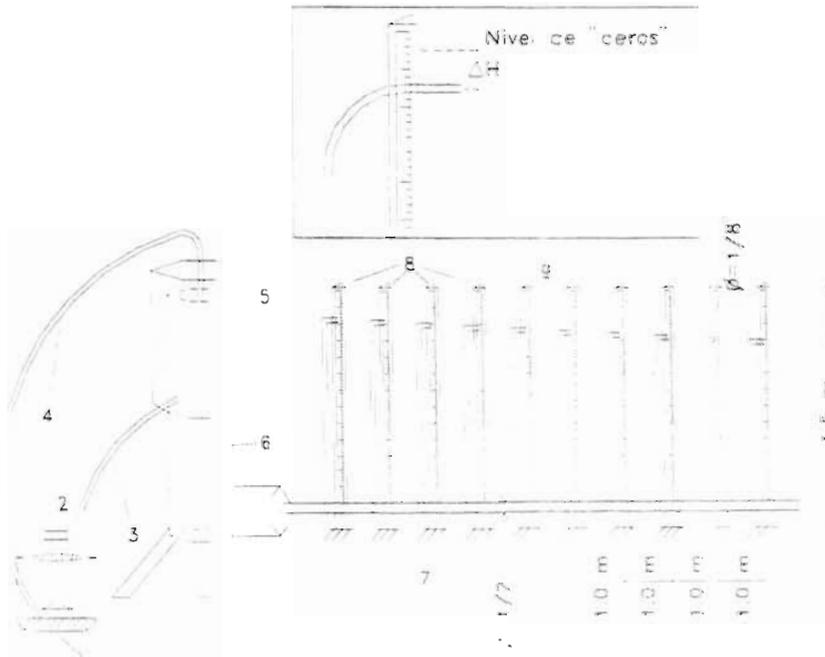


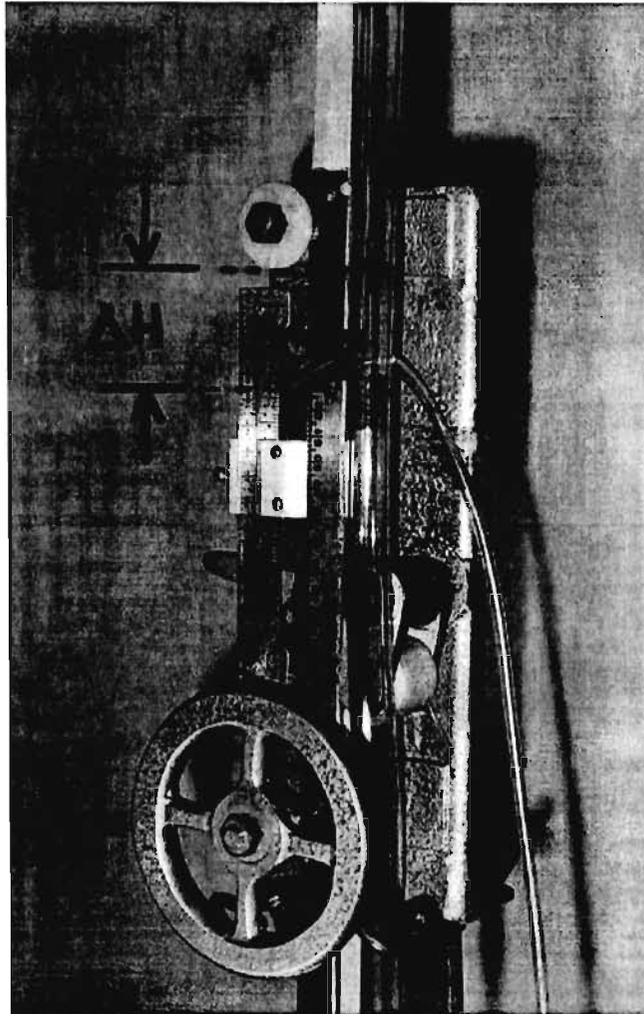
Figura 3.7. Esquema general del arreglo para las mediciones sobre el lateral.

FALTA PAGINA

No. 47 a la 49

3.6.9. LÍMNIMETRO GRADUABLE

La unidad experimental esta dotada de un limnómetro, como el mostrado en la Fotografía 3.2. el cual sirve para medir las cargas (ΔH) a las que se somete el emisor. Y el ascenso o descenso, produce variaciones en el caudal vertido, de este modo se obtienen los distintos caudales de prueba. Detalles de la localización de este componente se pueden ver en detalle en las Figuras 3.9 y 3.11.

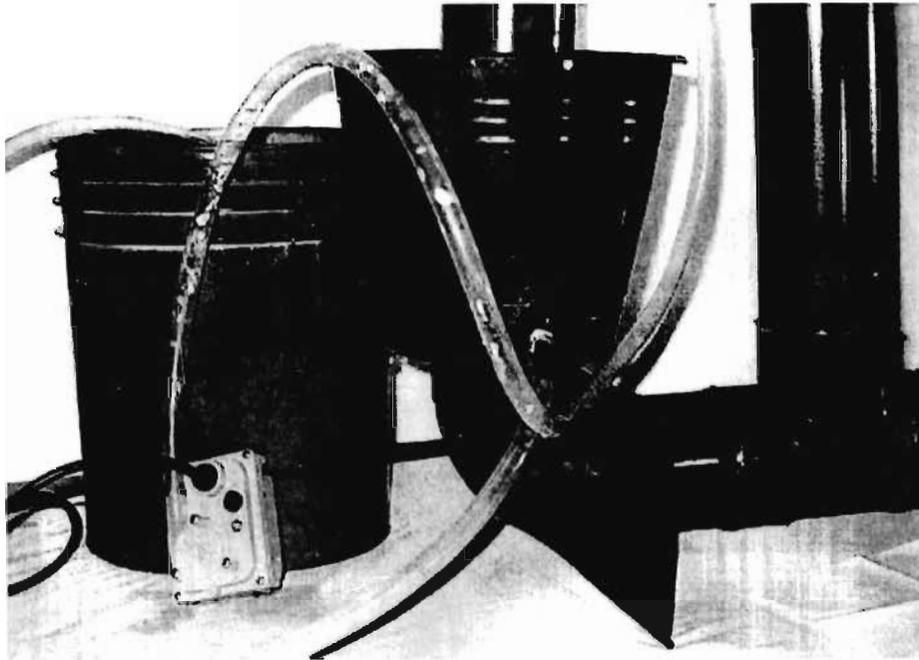


Fotografía 3.2. Arreglo de emisor y limnómetro utilizado durante las pruebas en el laboratorio.

3.6.10. SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA

Mediante un pequeño cárcamo o tanque, en el cual se encuentra una bomba modelo 283-2F-288/1 de 1/100 HP de potencia (que posteriormente fue reemplazada por una bomba sumergible 1-MA de 1/200 HP y 170 GPH a una altura de 1 pie), se forma un

sistema cerrado de recirculación de agua , que fue implementado con el objeto de no desperdiciar agua en la prueba, la ubicación de este dentro de la unidad experimental se muestra en las Figuras 3.9, 3.10 y Fotografía 3.3.

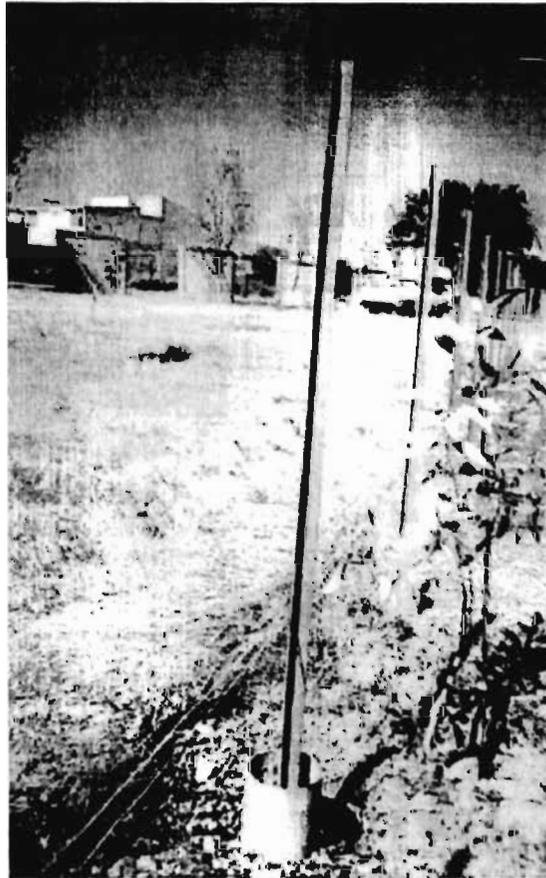


Fotografía 3.3. Arreglo de mangueras en el sistema de recirculación de agua.

4. EXPERIMENTACIÓN EN EL SISTEMA DE RPBC

4.1. *INSTALACIÓN EXTERNA PARA EL ESTUDIO DE LAS TUBERÍAS LATERALES*

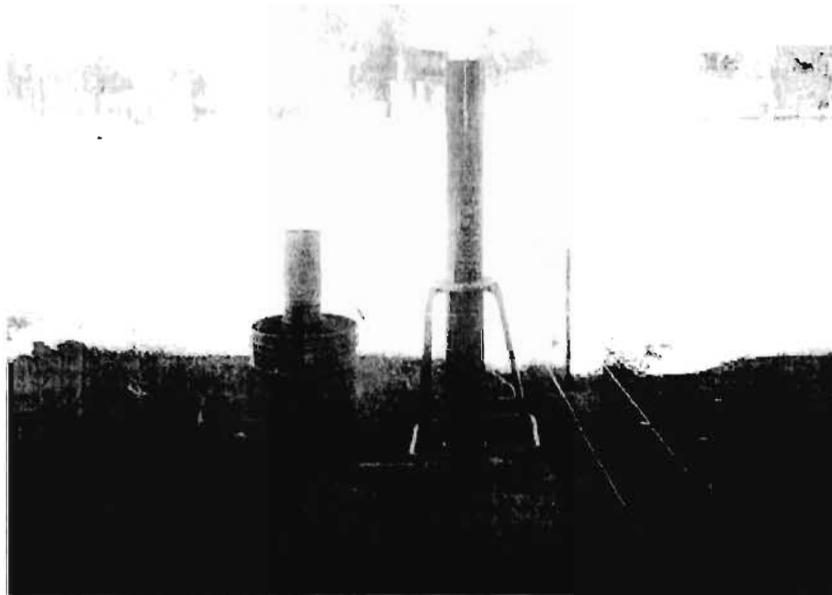
Se implementaron dos líneas laterales de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y 35 m de longitud, estas líneas se muestran en las Fotografías 4.1, 4.2 y 4.3. En la primera línea se hicieron ensayos preliminares, los cuales sirvieron para analizar ya en campo lo que sería el comportamiento de una línea lateral del sistema de RPBC, se utilizaron emisores de $\frac{3}{16}$ " de diámetro y se comprobó que con cargas menores de un metro era posible dar la suficiente energía para lograr que por cada emisor salieran caudales comprendidos en el rango de 2 a 8 l/h.



Fotografía 4.1. Vista general de la instalación de campo y soportes de los emisores.

La Fotografía 4.1, detalla el arreglo de los soportes en cada uno de los emisores. de la instalación hecha en predios de la UAL, Torreón. Nótese que en la Fotografía 4.2

hay dos dispositivos de control de carga constante, el segundo (izquierda) de unos 80 cm aproximadamente, sustituyó al primero (derecha) de 1.5 m de altura, ya que el sistema de RPBC requiere carga inferiores a un metro.



Fotografía 4.2. Dispositivo de control de carga constante instalado en el primer lateral.



Fotografía 4.3. Dispositivo de control de carga constante instalado en el segundo lateral.

La segunda línea donde se efectuaron las mediciones utilizadas en esta sección, se conecta a un control de carga constante, ver Fotografía 4.3, el cual es alimentado por una manguera que se encuentra unida a la red del acueducto local, la cual posee una reducción de 2 x ¾". Desde el dispositivo de control de carga constante sale una tubería, de ¾" y de 35 m de longitud, la cual conforma el lateral de prueba, con 35 emisores conectados, con una separación entre ellos de 1 m, así como cinco tubos piezométricos distribuidos de tal manera que se tuviera monitoreada adecuadamente la línea piezométrica en el lateral de prueba.

Para lograr variaciones en la carga disponible de cada uno de los emisores de la línea lateral, se utilizaron 35 soportes desmontables, ver Fotografía 4.1, que consistían de una base de concreto con una ranura, donde se introducía un perfil "L" angular de 1", de 1.2 m de altura. En ellos se colocaron escalas milimétricas, previamente niveladas a la misma altura del agua en el vertedor circular del dispositivo de control de carga constante; ubicando la elevación a la cual era inminente el inicio del goteo, de esta manera se obtuvo, la aquí denominada línea de ceros. Para ilustrar el fenómeno medido (observado) se incluye la Fotografía 4.4, donde se ve la apariencia que tiene el agua saliente por los emisores, cuando se vierte un caudal de 7 l/h aproximadamente.



Fotografía 4.4. Apariencia del agua en un emisor vertiendo aproximadamente 7 l/h.

Los emisores, seleccionados de acuerdo a los resultados de las pruebas en el laboratorio y reportada más adelante, fueron mangueras de plástico de 1/8" de diámetro y 1.5 m de longitud y con una conexión a la lateral a ras con la superficie de ella, sin entrantes, para reducir lo más posible los cambios de dirección en el flujo y en la trayectoria de las líneas de corriente dentro del lateral. Para medir los pequeños gastos en los emisores se utilizaron probetas graduadas de 100 y 1000 ml de capacidad y dos cronómetros, simultáneamente a la realización de las pruebas se realizaron mediciones de la temperatura del agua, tanto en el dispositivo de control de carga, como en las probetas, no habiendo diferencia significativa entre ambas lecturas que pudieran alterar los resultados obtenidos.

4.1.1. MEDICIONES EN LA INSTALACIÓN EXTERNA

Las pruebas se iniciaban con el llenado gradual del tramo de prueba, que se realizaba una vez estuvieran todos los emisores levantándolos en sus respectivos soportes, por arriba del nivel del agua en el vertedor circular para no permitir el derramen de agua, una vez hecho esto, se verificaban los ceros de los piezómetros y de los emisores, se procedía con el purgado de la instalación, y no se empezaban las mediciones hasta no verificar la inexistencia de burbujas de agua u otro elemento de distorsión. La temperatura del agua se media justo en el momento de iniciar la prueba, ya que en la región del norte se dan diferencias considerables de la temperatura ambiente (y por ende del agua) en función de la hora de la prueba. Después se bajaban los emisores lo suficiente para que por cada uno escurriera el caudal deseado de 2, 4 y 8 l/h respectivamente. Los caudales se determinaban de forma volumétrica, midiendo la cantidad de agua que goteaba en un periodo de un minuto, tiempo suficiente dado los bajos caudales de la prueba. Una vez uniformizados los caudales en cada uno de los 35 emisores, se media el nivel en el vertedor y en los cinco piezómetros, terminándose la prueba con una nueva lectura de la temperatura del agua.

4.1.2. ESTIMACIÓN DE LA UNIFORMIDAD DE RIEGO EN EL RPBC

La uniformidad de riego en una instalación depende básicamente de los siguientes factores:

- Diferencias de presión que se producen en la red, debidas a las pérdidas de carga y a la variación de la topografía del terreno donde se instala.
- Falta de uniformidad de fabricación de los emisores.
- Respuesta del emisor a las variaciones de temperatura y presión del agua.
- Variación de las características del emisor con su uso, debido a las posibles obturaciones o envejecimiento.
- Variaciones espaciales y temporales de la temperatura del agua.
- Variación del funcionamiento o fabricación de los dispositivos de control de carga constante.

El grado en que cada uno de estos factores puede afectar la uniformidad de riego ha sido establecido por Solomon (1985), en orden de mayor a menor importancia en:

1. Obturaciones.
2. Número de emisores de los que recibe agua cada planta.
3. coeficiente de variación de fabricación del emisor.
4. Exponente de descarga del emisor.

5. Sensibilidad del emisor a los cambios de temperatura.
6. Variaciones de presión.
7. Coeficiente de fabricación de los reguladores de carga.
8. Funcionamiento de la red de riego en general.

Este orden no es absoluto, y depende del rango de los valores asociados a cada uno de los parámetros, pero es, en general, aplicable para valores medios (condiciones normales).

La uniformidad aumenta cuando se incrementa el número de emisores instalados y su sensibilidad a la temperatura. También se incrementa, cuando disminuyen los restantes factores listados anteriormente.

Un coeficiente de uniformidad de riego adoptado por el Soil Conservation Service (USC) y también por la American Society of Agricultural Engineers (ASAE), fue propuesto por Christiansen (Merriam y Keller, 1978), se debe calcular de la siguiente forma:

$$UCC = 1 - \frac{1}{nQ_d} \sum_{i=1}^n |Q_i - Q_d| \quad (4.1)$$

donde

- | | |
|---------------|--|
| $ Q_i - Q_d $ | valor absoluto de las desviaciones con relación al caudal de diseño. |
| Q_d | caudal de diseño de los emisores. |
| n | número de emisores aforados. |

El grado de aceptabilidad de un sistema de riego por goteo se puede clasificar, como excelente si $0.95 \leq UCC \leq 1$, bueno si $0.85 \leq UCC \leq 0.95$, normal $0.75 \leq UCC \leq 0.85$, malo si $0.65 \leq UCC \leq 0.75$ e inaceptable para valores de UCC inferiores a 0.65.

4.1.3. PRUEBAS EFECTUADAS

Las pruebas que aquí se reportan, corresponden a dos mediciones distintas, hechas en dos laterales diferentes; el primero de 35 m y el segundo de 50 m de longitud. Para poder lograr los caudales a probar (2, 4, 8 l/h), fue necesario darle a cada uno de los emisores instalados, una carga ΔH , medida desde la línea de ceros, posteriormente se verificó que en cada uno de los emisores se estuviera dando el caudal de prueba, se dejó pasar un tiempo prudente para que se estableciera el flujo y se tomaron las mediciones reportadas en las Tablas 4.1, 4.2 y 4.3, las cuales fueron realizadas sobre el lateral de 35 m, muestran en la primera columna la numeración de cada uno de los emisores, en la segunda la carga proporcionada ΔH , en la tercera el volumen de agua colectado en un intervalo de tiempo de 1 minuto, en la cuarta el cálculo del caudal y en la quinta la desviación estándar de cada caudal medido, para cada prueba se obtuvo el coeficiente de uniformidad de riego de Christiansen (UCC). En el lateral de 50 m de longitud se hicieron las mismas mediciones descritas anteriormente y adicionalmente se midió la variación de la temperatura a lo largo del lateral, así como la piezométrica en 10 puntos diferentes. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.4, y con estos resultados se elaboraron las Figuras 4.1, donde se puede obtener los parámetros K_{dRPBC} y X_{RPBC} de la ecuación (2.1), la

Figura 4.2 que ilustra las líneas piezométricas obtenidas y la Figura 4.3 que muestra la variación de la temperatura para los tres gatos de prueba.

ϕ Lateral (pulg) = 0.75 ϕ Emisores (pulg) = 0.125 T (°C) = 20 Q Diseño (l/h) = 2.0				
Emisor N°	ΔH (cm)	Volumen (ml)	Caudal, Q (l/h)	$ Q_i - Q_{Prom} $ (l/h)
1	4.5	34.0	2.04	0.04
2	3.5	33.0	1.98	0.02
3	3.5	34.0	2.04	0.04
4	3.3	34.5	2.07	0.07
5	4.5	32.0	1.92	0.08
6	2.2	32.5	1.95	0.05
7	4.2	32.5	1.95	0.05
8	2.1	34.0	2.04	0.04
9	3.3	34.0	2.04	0.04
10	2.3	34.0	2.04	0.04
11	2.9	33.5	2.01	0.01
12	1.9	33.0	1.98	0.02
13	2.8	33.0	1.98	0.02
14	4.4	34.0	2.04	0.04
15	2.8	32.8	1.97	0.03
16	3.2	32.5	1.95	0.05
17	4.5	34.0	2.04	0.04
18	3.6	35.0	2.10	0.10
19	3.5	34.8	2.09	0.09
20	3.8	33.0	1.98	0.02
21	5.1	32.5	1.95	0.05
22	4.5	35.0	2.10	0.10
23	5.9	33.0	1.98	0.02
24	5.0	34.0	2.04	0.04
25	4.9	32.0	1.92	0.08
26	6.9	33.5	2.01	0.01
27	7.0	33.0	1.98	0.02
28	5.7	33.0	1.98	0.02
29	5.6	34.0	2.04	0.04
30	6.0	33.0	1.98	0.02
31	6.9	33.0	1.98	0.02
32	8.8	34.0	2.04	0.04
33	8.2	32.0	1.92	0.08
34	7.0	34.0	2.04	0.04
35	8.0	32.0	1.92	0.08
			Q_{Prom} (l/h)	UCC
			2.00	0.978

Tabla 4.1. Mediciones realizadas en el lateral de 35 m de longitud con $Q_d = 2$ l/h por emisor.

Nótese el alto coeficiente UCC logrado en la prueba (UCC = 0.978) y el la poca variabilidad del caudal vertido por los emisores.

ϕ Lateral (plg) = 0.75 ϕ Emisores (plg) = 0.125 T (°C) = 20 Q Diseño (l/h) = 4.0				
Emisor N°	ΔH (cm)	Volumen (ml)	Caudal, Q (l/h)	$ Q_i - Q_{Prom} $ (l/h)
1	10.4	66.0	3.96	0.01
2	8.5	68.0	4.08	0.11
3	8.0	65.0	3.90	0.07
4	8.0	67.0	4.02	0.05
5	11.2	65.5	3.93	0.04
6	7.6	65.5	3.93	0.04
7	11.2	66.0	3.96	0.01
8	7.5	66.0	3.96	0.01
9	8.7	67.0	4.02	0.05
10	7.6	65.5	3.93	0.04
11	8.1	66.5	3.99	0.02
12	8.5	68.0	4.08	0.11
13	8.4	65.0	3.90	0.07
14	12.7	65.0	3.90	0.07
15	11.5	66.0	3.96	0.01
16	9.0	67.0	4.02	0.05
17	10.6	65.0	3.90	0.07
18	9.0	65.0	3.90	0.07
19	10.0	67.0	4.02	0.05
20	10.2	67.0	4.02	0.05
21	8.7	66.0	3.96	0.01
22	10.4	67.5	4.05	0.08
23	14.9	65.5	3.93	0.04
24	12.0	68.0	4.08	0.11
25	11.8	67.5	4.05	0.08
26	15.5	66.0	3.96	0.01
27	16.0	65.0	3.90	0.07
28	13.1	65.5	3.93	0.04
29	12.5	67.0	4.02	0.05
30	13.5	66.0	3.96	0.01
31	14.9	65.0	3.90	0.07
32	18.4	66.5	3.99	0.02
33	17.0	65.0	3.90	0.07
34	14.3	68.0	4.08	0.11
35	18.6	67.0	4.02	0.05
			Q_{Prom} (l/h)	UCC
			3.97	0.987

Tabla 4.2. Mediciones realizadas en el lateral de 35 m de longitud con Qd = 4 l/h por emisor.

El coeficiente UCC logrado en la prueba (UCC = 0.987) indica la poca variabilidad del caudal vertido.

ϕ Lateral (plg) = 0.75 ϕ Emisores (plg) = 0.125 T (°C) = 20 Q Diseño (l/h) = 8.0				
Emisor N°	ΔH (cm)	Volumen (ml)	Caudal, Q (l/h)	$ Q_i - Q_{prom} $ (l/h)
1	25.5	132.0	7.92	0.11
2	21.1	134.0	8.04	0.01
3	21.3	132.0	7.92	0.11
4	20.7	135.0	8.10	0.07
5	27.0	135.0	8.10	0.07
6	20.8	134.0	8.04	0.01
7	31.4	135.0	8.10	0.07
8	23.0	135.0	8.10	0.07
9	21.6	133.0	7.98	0.05
10	23.5	135.0	8.10	0.07
11	23.8	135.0	8.10	0.07
12	21.9	135.0	8.10	0.07
13	23.8	135.0	8.10	0.07
14	36.4	135.0	8.10	0.07
15	28.6	135.0	8.10	0.07
16	25.4	135.0	8.10	0.07
17	27.2	134.0	8.04	0.01
18	25.8	135.0	8.10	0.07
19	25.6	134.0	8.04	0.01
20	29.6	135.0	8.10	0.07
21	25.9	134.0	8.04	0.01
22	26.5	135.0	8.10	0.07
23	34.4	132.0	7.92	0.11
24	28.4	134.0	8.04	0.01
25	28.9	135.0	8.10	0.07
26	39.5	132.0	7.92	0.11
27	38.8	132.0	7.92	0.11
28	31.0	132.0	7.92	0.11
29	32.0	132.0	7.92	0.11
30	34.0	135.0	8.10	0.07
31	36.3	135.0	8.10	0.07
32	40.3	132.0	7.92	0.11
33	44.0	132.0	7.92	0.11
34	34.0	132.0	7.92	0.11
35	46.3	135.0	8.10	0.07
			Q_{prom} (l/h)	UCC
			8.03	0.991

Tabla 4.3. Mediciones realizadas en el lateral de 35 m de longitud con $Q_d = 8$ l/h por emisor.

También fue logrado un alto coeficiente UCC (UCC = 0.991).

Con los gastos de la prueba, realizada sobre el lateral de 50 m, y teniendo en cuenta las lecturas tomadas de los piezómetros, con las cuales se pudo determinar la energía disponible por cada una de los emisores instrumentados, se obtuvo un exponente de descarga (x_{RPBC}) de 0.5826 y una constante de descarga del sistema RPBC (K_{dRPBC}) de 13.387, valores que se obtienen de un ajuste de tipo potencial, sobre los datos experimentales, la forma de la curva $q = K_d \Delta H^x$ se muestra en la Figura 4.1 y siendo altamente favorables, si se comparan con los distintos valores utilizados en los emisores convencionales.

Piezómetro Nº	Abscisa (m)	Carga Piezométrica (cm)		
		2 l/h	4 l/h	8 l/h
0	0.0	96.0	96.0	96.0
1	1.0	95.3	94.6	89.5
2	9.5	94.0	89.6	75.2
3	18.0	93.2	85.9	63.1
4	26.5	92.4	83.2	54.6
5	35.0	92.1	82.0	50.4
6	43.5	91.1	81.8	49.1
7	50.0	91.6	81.8	48.5

Termómetro Nº	Abscisa (m)	Temperatura (°C)		
		2 l/h	4 l/h	8 l/h
1	1	31.5	31.0	31.0
2	10	32.0	32.0	32.0
3	20	32.5	32.0	32.0
4	30	33.0	33.0	32.0
5	40	33.0	34.0	33.0
6	50	35.0	36.0	35.0

Tabla 4.4. Mediciones de altura piezométrica y temperatura, realizadas en el lateral de 50 m de longitud.

La Figura 4.4 muestra que la temperatura en el lateral va aumentando en el sentido del flujo, y en ningún caso la diferencia supero los 6 °C, vale la pena anotar que estas mediciones fueron realizadas, en la zona semidesértica del norte de México y que muy posiblemente en zonas templadas y frías, dicha diferencia seria menor.

Este resultado sugiere que se debe aplicar una corrección a la viscosidad cinemática del agua (ν), en el número de Reynolds utilizado para el cálculo del factor de fricción.

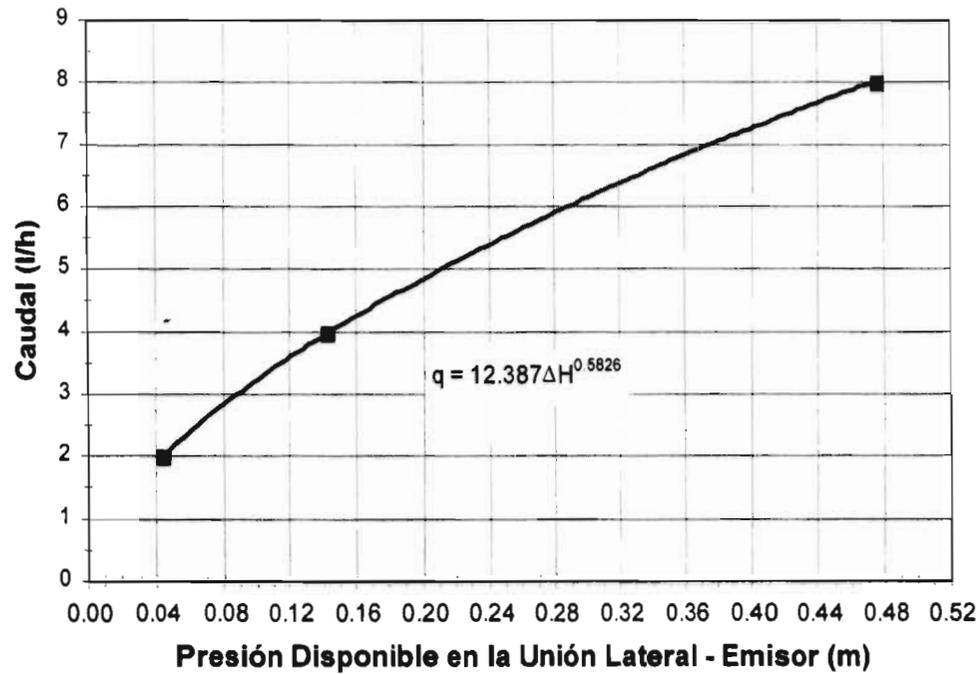


Figura 4.1. Curva caudal - presión en los emisores utilizados en el RPBC.

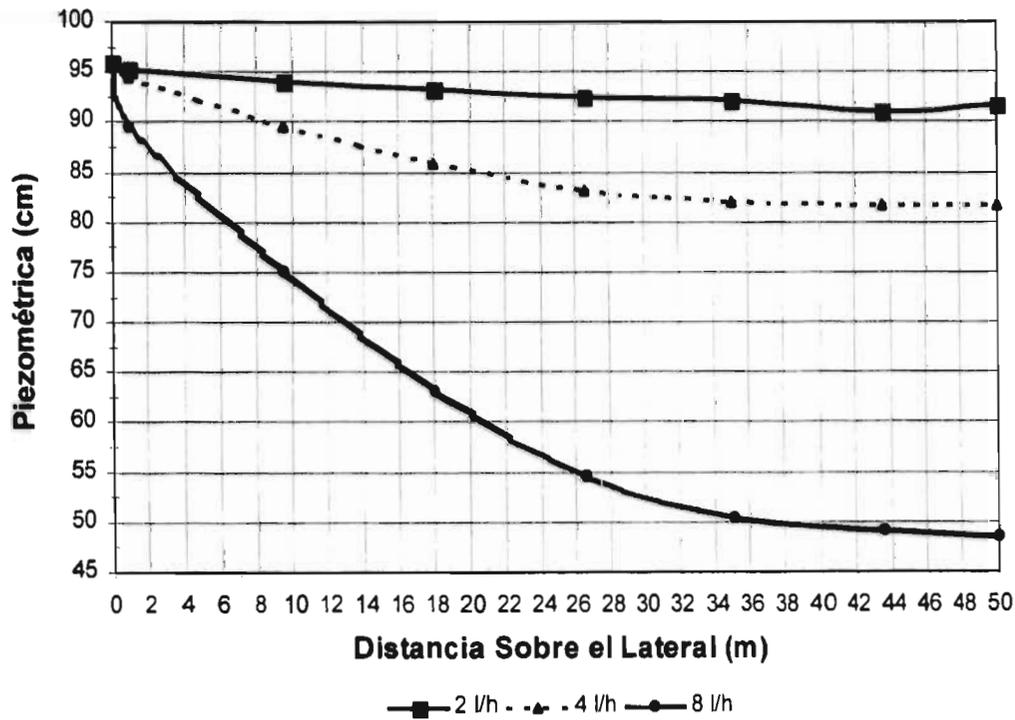


Figura 4.2. Líneas piezométricas en un lateral de 50 m y caudales de diseño de 2, 4 y 8 l/h.

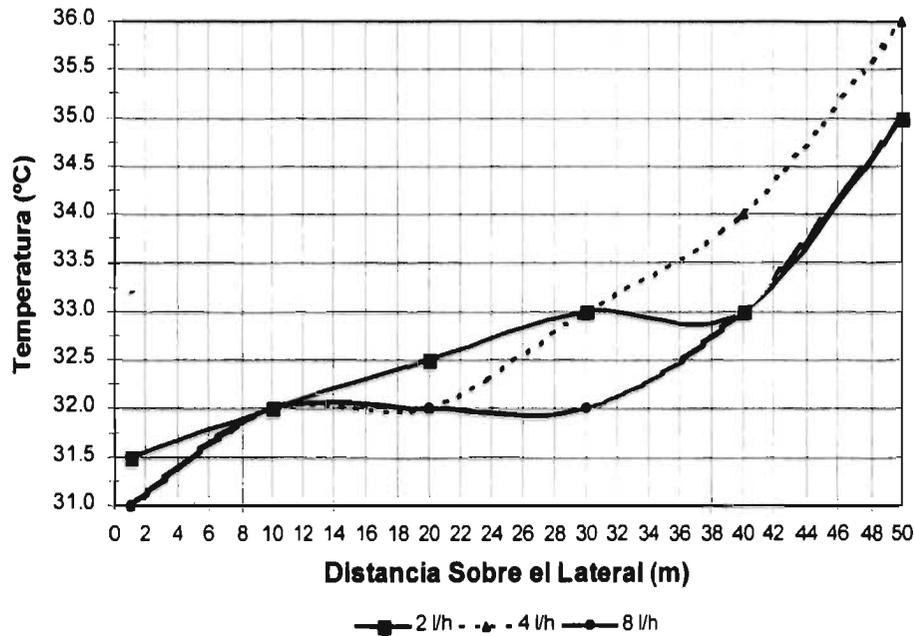


Figura 4.3. Variación de la temperatura a lo largo de un lateral de 50 m en el RPBC.

4.2. INSTALACIÓN DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE LOS EMISORES

4.2.1. MEDICIONES EN LA INSTALACIÓN DE LABORATORIO

Tal y como se muestra en las Figuras 4.4 y 4.5 dos geometrías en donde la unión con el lateral se hace a ras, por medio de un pequeño tubo de diámetro interior de 19 mm que se interconecta con una pequeña perforación practicada en el lateral de 1.1 y 1.6 mm de diámetro, adelante se muestra en detalle las mediciones logradas y las anotaciones más relevantes.

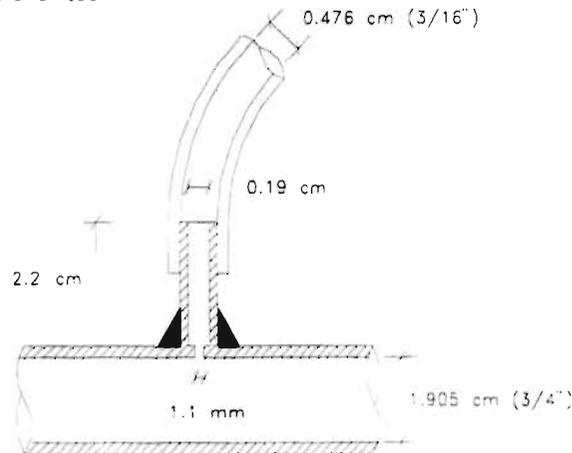


Figura 4.4. Conexión lateral - emisor, perforación de 1.1 mm de diámetro (geometría A).

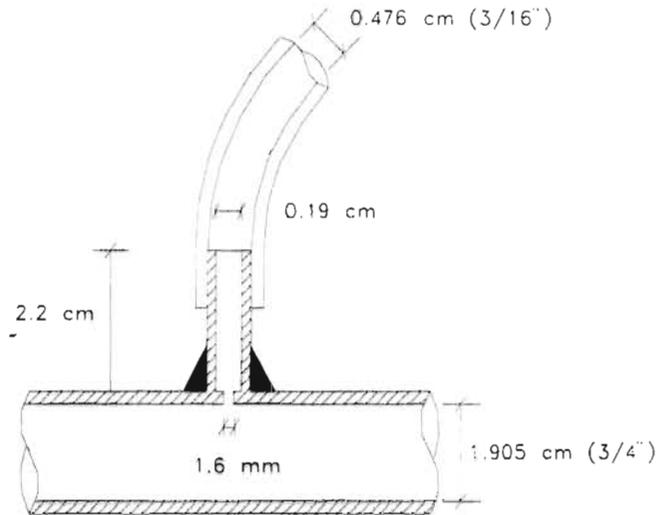


Figura 4.5. Conexión lateral - emisor, perforación de 1.6 mm (geometría B).

Otra alternativa que se considero en la Interconexión emisor - lateral, consistió en que al lateral se le practicara un agujero con el objeto de enchufarle directamente la manguera que sirve de emisor en el RPBC; de tal forma que se le causara a las líneas de corriente, una pequeña distorsión en su recorrido, y de esta manera inducir a una mayor pérdida local, para ilustrar de una manera más clara las geometrías aquí descritas se incluyen las Figuras 4.6 y 4.7 en las que se muestran las geometrías probadas; en los ensayos correspondientes se probaron dos diferentes diámetros de emisores: De 1/8" y de 3/16" respectivamente y para cada uno de las tres longitudes de emisor (3.0, 1.5 y 0.75 m), a cada una de estas variaciones se le denomina casos 1, 2 y 3.

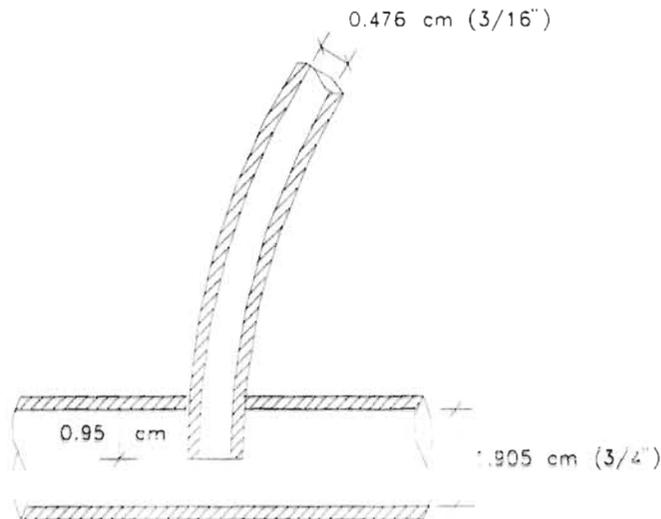


Figura 4.6. Conexión lateral - emisor de 3/16", entrando hasta la mitad del diámetro (geometría C).

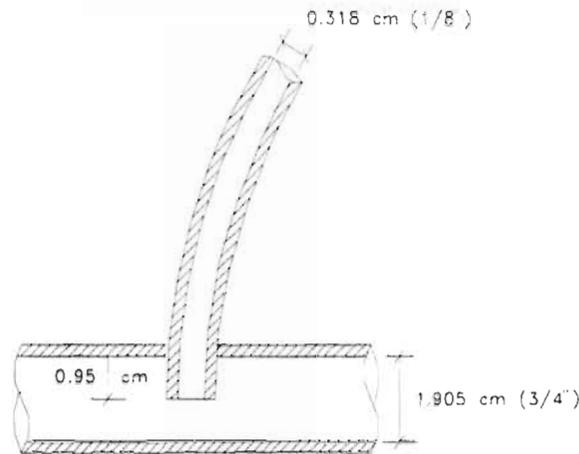


Figura 4.7. Conexión con el lateral - emisor de 1/8" entrando hasta la mitad del diámetro (geometría D).

4.2.2. PRUEBAS EFECTUADAS

Los ensayos se realizaron en la instalación experimental descrita anteriormente. Cada ensayo se hacía de la manera siguiente: Se llenaba el cárcamo pequeño, posteriormente se encendía la bomba, para presurizar el sistema, hasta que empezaba a derramar el vertedor circular. Una vez estabilizado el flujo y purgadas las tuberías, se tomaba la temperatura del agua y se iniciaban las mediciones captando el volumen de agua, que goteaba por el emisor, en un vaso graduado durante un tiempo de 6 minutos y para una cierta altura o carga, medida desde el nivel del agua en el vertedor (hacia abajo) hasta el centro de la boca de salida del tubo emisor.

Las diferentes cargas se seleccionaban en forma aleatoria, para evitar tendencias o errores acumulados, y los ensayos se hicieron dentro de un rango de gastos de 2 a 8 l/h por emisor. Una vez terminadas las mediciones (de 4 a 10 puntos repetidos un mínimo de dos veces cada uno) se volvía a tomar la temperatura del agua, se apagaba la bomba y se drenaba la instalación experimental.

En la Tabla 4.5 se muestran las mediciones (columna 1 y 3) y el procesamiento de ellas, que se detallará adelante, y que están en las otras columnas de la tabla para las cuatro geometrías de entrada ensayadas, que fueron: Geometría A, entrada con pequeño orificio y emisor de 3/16" de diámetro, ver Figura 4.4; geometría B, entrada con orificio un poco mayor, ver Figura 4.5, e igual emisor que en el caso anterior, geometrías C y D Figuras 4.6 y 4.7, tubo entrante en el emisor de 1/2" una mitad de su diámetro, o sea 1/4". En el caso C, con un emisor de 3/16" de diámetro y en el D con uno de 1/8", y en los dos la misma longitud de 1.5 m.

Dado que, como se mencionó anteriormente, la entrada a ras con la superficie interior de la línea lateral, se consideró la más práctica; en todos los ensayos hechos a continuación se usó esta geometría de entrada y solo se varió el diámetro y longitud de los emisores, así como la temperatura del agua.

Así, en la Tabla 4.6, se muestran las mediciones para tres longitudes de emisor: casos 1, 2 y 3 (3.0, 1.5 y 0.75 m respectivamente), y un diámetro de 3/16", con 40 °C de temperatura del agua.

En forma semejante, en la Tabla 4.7 están los casos anteriores pero ahora para temperaturas del agua entre 23 y 28 °C.

Como los emisores de 1/8" son los de mayor interés para los objetivos específicos, se analizaron con mayor cuidado, por lo que se hicieron mediciones, para las mismas tres longitudes de emisor y para varias temperaturas. De esta forma, en la Tabla 4.8, se muestran los valores para una temperatura de 40 °C, en la Tabla 4.9 para temperaturas de 22 y 23 °C y una conexión con geometría D.

Finalmente, para una conexión a ras con la pared del tubo, en la Tabla 4.10, para temperaturas de 18 y 19 °C y en la Tabla 4.11, para temperaturas de 38 y 43 °C.

ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA

GEOMETRÍA A:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 20
 ν (m²/s) = 1.052E-06 γ (N/m³) = 9.789
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 1.048

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _t) (m)
5	6	215.0	2.15	0.03353	152	0.42156	0.00761	0.00006	0.04233
10	6	343.0	3.43	0.05348	242	0.26424	0.01215	0.00015	0.08771
15	6	438.0	4.38	0.06830	309	0.20693	0.01551	0.00024	0.13425
20	6	520.0	5.20	0.08109	367	0.17430	0.01842	0.00034	0.18125
25	6	595.0	5.95	0.09278	420	0.15233	0.02107	0.00044	0.22849
30	6	660.0	6.60	0.10292	466	0.13733	0.02337	0.00054	0.27609
35	6	725.0	7.25	0.11305	512	0.12501	0.02568	0.00065	0.32367
40	6	799.0	7.99	0.12459	564	0.11344	0.02830	0.00079	0.37091

GEOMETRÍA B:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 30
 ν (m²/s) = 8.406E-07 γ (N/m³) = 9.766
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 835

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _t) (m)
2	6	282.0	2.82	0.04396	249	0.25693	0.00798	0.00010	0.01192
3	6	356.0	3.56	0.05550	314	0.20352	0.01007	0.00016	0.01977
4	6	420.0	4.20	0.06548	371	0.17251	0.01188	0.00022	0.02790
6	6	525.0	5.25	0.08185	464	0.13801	0.01485	0.00034	0.04480
9	6	650.0	6.50	0.10134	574	0.11147	0.01839	0.00052	0.07108
12	6	755.0	7.55	0.11770	667	0.09597	0.02136	0.00071	0.09793
13	6	800.0	8.00	0.12472	707	0.09057	0.02264	0.00079	0.10657

GEOMETRÍA C:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 30
 ν (m²/s) = 8.406E-07 γ (N/m³) = 9.766
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 835

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _t) (m)
1	4	161.5	2.42	0.03777	214	0.29909	0.00685	0.00007	0.00307
2	4	307.0	4.61	0.07179	407	0.15734	0.01303	0.00026	0.00671
3	4	435.0	6.53	0.10172	576	0.11104	0.01846	0.00053	0.01101
4	4	547.5	8.21	0.12803	725	0.08822	0.02324	0.00084	0.01593

GEOMETRÍA D:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 23
 ν (m²/s) = 9.833E-07 γ (N/m³) = 9.783
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 979

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _t) (m)
5	6	191.0	1.91	0.06701	380	0.16856	0.01825	0.00023	0.03153
10	6	339.0	3.39	0.11894	674	0.09497	0.03238	0.00072	0.06689
15	6	477.0	4.77	0.16735	948	0.06749	0.04557	0.00143	0.10301
20	6	592.0	5.92	0.20770	1.177	0.05438	0.05655	0.00220	0.14125
25	6	695.0	6.95	0.24384	1.382	0.04632	0.06639	0.00303	0.18058
30	6	788.0	7.88	0.27647	1.566	0.04086	0.07527	0.00390	0.22083

Tabla 4.5. Mediciones en las 4 geometrias analizadas (A, B, C y D).

ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA

CASO 1:

L (m) = 3.0
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 40
 v (m²/s) = 6.719E-07 γ (N/m³) = 9,734
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 665

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
3	6	290.0	2.90	0.04522	321	0.19968	0.01312	0.00010	0.01677
4	6	345.0	3.45	0.05380	381	0.16785	0.01561	0.00015	0.02424
5	6	390.0	3.90	0.06081	431	0.14848	0.01765	0.00019	0.03216
6	6	452.0	4.52	0.07048	500	0.12811	0.02045	0.00025	0.03929
9	6	564.0	5.64	0.08795	623	0.10267	0.02552	0.00039	0.06408
12	6	634.0	6.34	0.09886	701	0.09134	0.02869	0.00050	0.09081
13	6	700.0	7.00	0.10915	774	0.08273	0.03168	0.00061	0.09772
15	6	755.0	7.55	0.11773	834	0.07670	0.03417	0.00071	0.11513
16	6	786.0	7.86	0.12256	869	0.07367	0.03557	0.00077	0.12367
17	6	815.0	8.15	0.12709	901	0.07105	0.03688	0.00082	0.13230

CASO 2:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 40
 v (m²/s) = 6.719E-07 γ (N/m³) = 9,734
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 665

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
2	6	290.0	2.90	0.04522	321	0.19968	0.00656	0.00010	0.01333
3	6	365.0	3.65	0.05692	403	0.15865	0.00826	0.00017	0.02158
4	6	429.0	4.29	0.06690	474	0.13498	0.00971	0.00023	0.03007
6	6	535.0	5.35	0.08342	591	0.10824	0.01211	0.00036	0.04754
9	6	661.0	6.61	0.10307	731	0.08761	0.01496	0.00054	0.07450
12	6	762.0	7.62	0.11882	842	0.07599	0.01724	0.00072	0.10204
13	6	812.0	8.12	0.12662	897	0.07131	0.01837	0.00082	0.11081

CASO 3:

L (m) = 0.75
 ϕ (m) = 0.00476
 T (°C) = 40
 v (m²/s) = 6.719E-07 γ (N/m³) = 9,734
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 665

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
1	6	225.0	2.25	0.03508	249	0.25737	0.00255	0.00006	0.00739
3	6	417.0	4.17	0.06502	461	0.13887	0.00472	0.00022	0.02507
6	6	605.0	6.05	0.09434	669	0.09572	0.00684	0.00045	0.05270
8	6	699.0	6.99	0.10900	773	0.08284	0.00791	0.00061	0.07149
10	6	795.0	7.95	0.12397	879	0.07284	0.00899	0.00078	0.09022
11	6	826.0	8.26	0.12880	913	0.07011	0.00934	0.00085	0.09981
12	6	845.0	8.45	0.13176	934	0.06853	0.00956	0.00089	0.10955

Tabla 4.6. Mediciones para los casos 1, 2 y 3 en la geometría C, a una temperatura promedio de 40 °C.

CASO 1:

L (m) = 3.0
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 28
 ν (m²/s) = 8.792E-07 γ (N/m³) = 9.772
 g (m/s²) = 9.80 (N.s/m²) = 874

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
3	6	285	2.85	0.04444	241	0.26585	0.01687	0.00010	0.01302
4	6	339	3.39	0.05286	286	0.22350	0.02007	0.00014	0.01979
5	6	378	3.78	0.05894	319	0.20044	0.02238	0.00018	0.02744
6	6	422	4.22	0.06580	356	0.17954	0.02499	0.00022	0.03479
9	6	554	5.54	0.08639	468	0.13676	0.03280	0.00038	0.05682
12	6	628	6.28	0.09793	530	0.12065	0.03718	0.00049	0.08233
13	6	685	6.85	0.10681	579	0.11061	0.04056	0.00058	0.08886
15	6	740	7.40	0.11539	625	0.10239	0.04381	0.00068	0.10551
16	6	770	7.70	0.12007	650	0.09840	0.04559	0.00074	0.11367
17	6	798	7.98	0.12443	674	0.09494	0.04725	0.00079	0.12196

CASO 2:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.004763
 T (°C) = 28
 ν (m²/s) = 8.792E-07 γ (N/m³) = 9.772
 g (m/s²) = 9.80 (N.s/m²) = 874

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
2	6	282	2.82	0.04397	238	0.26867	0.00835	0.00010	0.01155
3	6	356	3.56	0.05551	301	0.21283	0.01054	0.00016	0.01930
4	6	420	4.20	0.06549	355	0.18040	0.01243	0.00022	0.02735
6	6	525	5.25	0.08186	443	0.14432	0.01554	0.00034	0.04412
9	6	650	6.50	0.10136	549	0.11656	0.01924	0.00052	0.07023
12	6	755	7.55	0.11773	638	0.10035	0.02235	0.00071	0.09694
13	6	800	8.00	0.12475	676	0.09471	0.02368	0.00079	0.10552

CASO 3:

L (m) = 0.75
 ϕ (m) = 0.00476
 T (°C) = 23
 ν (m²/s) = 9.833E-07 γ (N/m³) = 9.783
 g (m/s²) = 9.80 (N.s/m²) = 979

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
1	6	210	2.10	0.03275	177	0.36079	0.00311	0.00005	0.00684
3	6	389	3.89	0.06066	329	0.19477	0.00576	0.00019	0.02405
6	6	580	5.80	0.09044	490	0.13063	0.00859	0.00042	0.05100
8	6	670	6.70	0.10448	566	0.11308	0.00992	0.00056	0.06953
10	6	745	7.45	0.11617	629	0.10170	0.01103	0.00069	0.08828
11	6	770	7.70	0.12007	650	0.09840	0.01140	0.00074	0.09787
12	6	810	8.10	0.12631	684	0.09354	0.01199	0.00081	0.10720

Tabla 4.7. Mediciones para los casos 1, 2 y 3 en la geometría C, a una temperatura promedio de 26.3 °C.

ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA

CASO 1:

L (m) = 3.0
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 40
 ν (m²/s) = 6.719E-07 γ (N/m³) = 9.734
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 665

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	136.0	1.36	0.04772	225	0.28386	0.03116	0.00012	0.01873
10	6	248.0	2.48	0.08701	411	0.15567	0.05681	0.00039	0.04280
15	6	351.0	3.51	0.12315	582	0.10999	0.08041	0.00077	0.06882
20	6	433.0	4.33	0.15192	718	0.08916	0.09920	0.00118	0.09963
25	6	517.0	5.17	0.18139	857	0.07467	0.11844	0.00168	0.12988
30	6	586.0	5.86	0.20560	971	0.06588	0.13425	0.00216	0.16360

CASO 2:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 40
 ν (m²/s) = 6.719E-07 γ (N/m³) = 9.734
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 665

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	238.0	2.38	0.08350	395	0.16221	0.02726	0.00036	0.02238
10	6	424.0	4.24	0.14876	703	0.09105	0.04857	0.00113	0.05030
15	6	570.0	5.70	0.19998	945	0.06773	0.06529	0.00204	0.08267
20	6	704.0	7.04	0.24700	1,167	0.05484	0.08064	0.00311	0.11625
25	6	832.0	8.32	0.29191	1,379	0.04640	0.09530	0.00435	0.15035
30	6	940.0	9.40	0.32980	1,558	0.04107	0.10767	0.00555	0.18678

CASO 3:

L (m) = 0.75
 ϕ (m) = 0.00318
 T (°C) = 40
 ν (m²/s) = 6.719E-07 γ (N/m³) = 9.734
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 665

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	390.0	3.90	0.13683	647	0.09899	0.02234	0.00096	0.02671
10	6	667.0	6.67	0.23402	1,106	0.05788	0.03820	0.00279	0.05901
15	6	890.0	8.90	0.31226	1,475	0.04338	0.05097	0.00497	0.09405
20	6	1,080.0	10.80	0.37892	1,790	0.03575	0.06185	0.00733	0.13082
25	6	1,280.0	12.80	0.44909	2,122	0.03016	0.07331	0.01029	0.16640

Tabla 4.8. Mediciones para los casos 1, 2 y 3 en la geometría C, a una temperatura promedio de 23 °C.

CASO 1:

L (m) = 3.0
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 22
 ν (m²/s) = 1.006E-06 γ (N/m³) = 9.785
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 1.001

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	102.0	1.02	0.03579	113	0.56644	0.03497	0.00007	0.01496
10	6	195.0	1.95	0.06842	216	0.29629	0.06686	0.00024	0.03290
15	6	271.0	2.71	0.09508	300	0.21320	0.09291	0.00046	0.05662
20	6	342.0	3.42	0.11999	379	0.16894	0.11726	0.00073	0.08201
25	6	411.0	4.11	0.14420	455	0.14058	0.14091	0.00106	0.10802
30	6	485.0	4.85	0.17016	537	0.11913	0.16629	0.00148	0.13224

CASO 2:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 23
 ν (m²/s) = 9.833E-07 γ (N/m³) = 9.783
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 979

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	191.0	1.91	0.06701	216	0.29579	0.03202	0.00023	0.01775
10	6	339.0	3.39	0.11894	384	0.16666	0.05683	0.00072	0.04245
15	6	477.0	4.77	0.16735	540	0.11844	0.07996	0.00143	0.06861
20	6	592.0	5.92	0.20770	671	0.09543	0.09924	0.00220	0.09856
25	6	695.0	6.95	0.24384	787	0.08129	0.11650	0.00303	0.13046
30	6	788.0	7.88	0.27647	893	0.07170	0.13209	0.00390	0.16401

CASO 3:

L (m) = 0.75
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 22
 ν (m²/s) = 1.006E-06 γ (N/m³) = 9.785
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 1.001

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
3	6	200.0	2.00	0.07017	227	0.28248	0.01676	0.00025	0.01299
5	6	302.0	3.02	0.10596	342	0.18708	0.02531	0.00057	0.02411
10	6	552.0	5.52	0.19367	625	0.10235	0.04627	0.00191	0.05182
15	6	763.0	7.63	0.26770	864	0.07405	0.06395	0.00366	0.08239
20	6	942.0	9.42	0.33050	1,067	0.05998	0.07895	0.00557	0.11547

Tabla 4.9. Mediciones para los casos 1, 2 y 3 en la geometría C, a una temperatura promedio de 22 °C.

CASO 1:

L (m) = 3.0
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 18
 ν (m²/s) = 1.100E-06 γ (N/m³) = 9.793
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 1.097

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
15	6	396.0	3.96	0.13894	401	0.15958	0.14850	0.00098	0.00052
20	6	510.0	5.10	0.17893	517	0.12391	0.19125	0.00163	0.00712
25	6	600.0	6.00	0.21051	608	0.10532	0.22500	0.00226	0.02274
30	6	690.0	6.90	0.24209	699	0.09158	0.25875	0.00299	0.03826
35	6	780.0	7.80	0.27366	790	0.08102	0.29250	0.00382	0.05368
40	6	894.0	8.94	0.31366	905	0.07068	0.33525	0.00502	0.05973

CASO 2:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 19
 ν (m²/s) = 1.076E-06 γ (N/m³) = 9.791
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 1.072

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
10	6	495.0	4.95	0.17367	513	0.12483	0.09076	0.00154	0.00771
15	6	650.0	6.50	0.22805	673	0.09507	0.11917	0.00265	0.02817
20	6	819.0	8.19	0.28735	848	0.07545	0.15016	0.00421	0.04563

CASO 3:

L (m) = 0.75
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 18
 ν (m²/s) = 1.100E-06 γ (N/m³) = 9.793
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 1.097

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h _f) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	450.0	4.50	0.15788	466	0.13732	0.04125	0.00127	0.00748
10	6	750.0	7.50	0.26314	777	0.08239	0.06875	0.00353	0.02771
15	6	1.020.0	10.20	0.36787	1,056	0.06058	0.09351	0.00653	0.04996

Tabla 4.10. Mediciones para los casos 1, 2 y 3 en la geometría C, a una temperatura promedio de 18 °C.

CASO 1:

L (m) = 3.0
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 43
 ν (m²/s) = 6.283E-07 γ (N/m³) = 9.722
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 622

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	192.0	1.92	0.06736	340	0.18800	0.04113	0.00023	0.00864
10	6	382.5	3.83	0.13420	678	0.09437	0.08193	0.00092	0.01715
15	6	540.0	5.40	0.18946	957	0.06684	0.11567	0.00183	0.03250
20	6	708.0	7.08	0.24840	1,255	0.05098	0.15165	0.00315	0.04520
25	6	840.0	8.40	0.29471	1,489	0.04297	0.17993	0.00443	0.06564

CASO 2:

L (m) = 1.5
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 38
 ν (m²/s) = 7.027E-07 γ (N/m³) = 9.741
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 696

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
5	6	313.0	3.13	0.10982	496	0.12899	0.03750	0.00062	0.01189
10	6	558.0	5.58	0.19577	885	0.07235	0.06684	0.00196	0.03120
15	6	780.0	7.80	0.27366	1,236	0.05176	0.09344	0.00382	0.05274
20	6	938.0	9.38	0.32910	1,487	0.04304	0.11237	0.00553	0.08211

CASO 3:

L (m) = 0.75
 ϕ (m) = 0.003175
 T (°C) = 38
 ν (m²/s) = 7.106E-07 γ (N/m³) = 9.743
 g (m/s²) = 9.80 μ (N.s/m²) = 704

ΔH (cm)	t (min)	Vol (ml)	Q (l/h)	Vel, V (m/s)	Nº Re	F. Fric. f	Pérd. (h) (m)	V ² /2g (m)	Pérd. (h _L) (m)
2	6	249.0	2.49	0.08736	395	0.16214	0.01491	0.00039	0.00470
5	6	585.0	5.85	0.20525	927	0.06902	0.03504	0.00215	0.01281
10	6	960.0	9.60	0.33681	1,522	0.04206	0.05750	0.00579	0.03671

Tabla 4.11. Mediciones para los casos 1, 2 y 3 en la geometría C, a una temperatura promedio de 40 °C.

4.3. RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA EXPERIMENTACIÓN

4.3.1. FUNCIONAMIENTO DE LAS LÍNEAS LATERALES.

Las líneas laterales funcionan como una red abierta con flujo espacialmente variado, donde las extracciones ocurren en cada emisor. Se encontraron en la literatura

varios enfoques para resolver este problema haciendo diversas suposiciones. Aunque los enfoques son de buen nivel teórico, no deja de extrañar la casi total ausencia de valores experimentales, que permitan verificar lo acertado de las hipótesis.

Como se vio anteriormente, se midieron las pérdidas a lo largo de una línea lateral de ½" de 35 m de longitud, para gastos por emisor de 2, 4 y 8 l/h, colocados a cada metro.

Los coeficientes de uniformidad de Christensen (UCC) para esos tres gastos, que se muestran en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3, fueron bastante altos y clasifican al sistema de RPBC, desde el punto de vista de uniformidad de riego, como un sistema *excelente*.

4.3.2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LOS EMISORES.

En los Emisores las cargas ΔH 's suministradas al sistema durante cada prueba se pueden expresar de forma numérica como:

$$\Delta H = K_e \frac{V^2}{2g} + f \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} \quad (4.2)$$

donde

- D diámetro del emisor instalado.
- f coeficiente de pérdidas distribuidas.
- g aceleración gravitacional.
- K_e coeficiente de pérdida por entrada.
- l longitud del emisor.
- V velocidad del agua saliendo por el Emisor.

Como el flujo en el emisor es laminar con números de Reynolds, R_e inferiores a 2000, el coeficiente f se puede estimar con la ecuación:

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (4.3)$$

Aunque conviene recordar que el flujo en parte está en el rango de número de Reynolds moderados, donde tanto la inercia como las fuerzas de presión y viscosas son significativas, o sea como señala Panton (1994), que estas dos fuerzas contribuyen a la aceleración del flujo en la mayor parte del campo de interés, lo que hace que el número de Reynolds aparezca como un parámetro en las ecuaciones de movimiento y de vorticidad, o sea que el patrón de escurrimiento cambia al variar el número de Reynolds. Durante la fase de procesamiento de la información se pudo determinar que se encontraban mejores ajuste, en el sentido de que se encontraba la independencia del coeficiente para pérdidas locales K_e , con factores de pérdidas distribuidas modificados que tienen la forma. Donde C es una constante de ajuste que para los emisores del RPBC resultó ser aproximadamente igual a 39.

$$f' = \frac{C}{R_e} \quad (4.4)$$

Con la consideración anterior se explican las columnas de las Tablas 4.5 a 4.11, donde a partir de las diferentes cargas y de los volúmenes recolectados en seis minutos, se encuentra el gasto o caudal, la velocidad en el emisor, el número de Reynolds (y el valor de la f), así como las pérdidas distribuidas dadas por $(f/d)v^2/2g$, y se deja, en la última columna, la pérdida de carga debida a la entrada.

Como se muestra en la Figura 4.8 el gasto dibujado contra la energía disponible, sigue una ley aproximadamente lineal con la carga disponible, requiriéndose una carga de 4 cm para obtener un gasto de 8 l/h con la geometría C, y una carga de 40 cm para el mismo caudal con la geometría A, con el orificio de entrada pequeño.

En la Figura 4.9, se dibujan las pérdidas locales contra el cuadrado de la carga de velocidad, para obtener, de forma regresional, el coeficiente de entrada para cada geometría. Dado que este coeficiente es igual al cociente de estos dos valores, estará dado por la pendiente de la recta de regresión que representa cercanamente a los puntos y cuya ecuación se muestra en esa misma figura. Así, el coeficiente de pérdidas de entrada para la geometría A es de 453.4 y para la geometría C de 16.7.

De estos resultados se puede concluir que las geometrías con pequeños orificios (A y B) en la entrada, tienen coeficientes de pérdida elevados por lo que además de presentar problemas de fabricación y de taponamiento, interfieren con el objetivo de regular el gasto por medio de la longitud de las mangueras.

En las Figuras 4.10 a 4.17 están gráficas semejantes para mangueras de 3/16" y 1/8", y una conexión introduciendo la manguera hasta la mitad del diámetro de la línea lateral, diferentes temperaturas y las tres longitudes ensayadas (3.0, 1.5 y 0.75 m).

Aquí, se puede ver como los emisores de 1/8" tienen mayor variabilidad (o sea están más abiertas las rectas que las de 3/16") en las gráficas de carga - caudal, por lo que son mejores como controles de gasto. Posiblemente, esto indica que las mangueras de 3/16" sean las adecuadas si se utilizan soportes (raisers), y las de 1/8" para controlar el flujo variando la longitud de las mangueras.

En las Figuras 4.18 a 4.21 (que corresponden a las Tablas 4.10 y 4.11) se repiten los ensayos pero ahora con una conexión del emisor a ras con la pared interior de la línea lateral. Como en la práctica la conexión tendrá una geometría intermedia entre el tubo entrante y a ras, los valores consignados en estas figuras y los de las anteriores, Figuras 4.7 a 4.14, marcarán los límites de pérdidas para los conectores reales.

Como una variable importante es el efecto de la temperatura en los gastos de los emisores, en las Figuras 4.22 y 4.23, se dibujaron los datos para manguera de 3/16" y 1/8" tomando en cuenta todas las otras variables de interés. Como se puede ver, para mangueras de 3/16" un cambio de temperatura de 28 °C a 40 °C produce cambios en el gasto, para todos los casos ensayados, de alrededor del 4% únicamente; en cambio para mangueras de 1/8" el cambio es más acentuado y anda alrededor de un 20%.

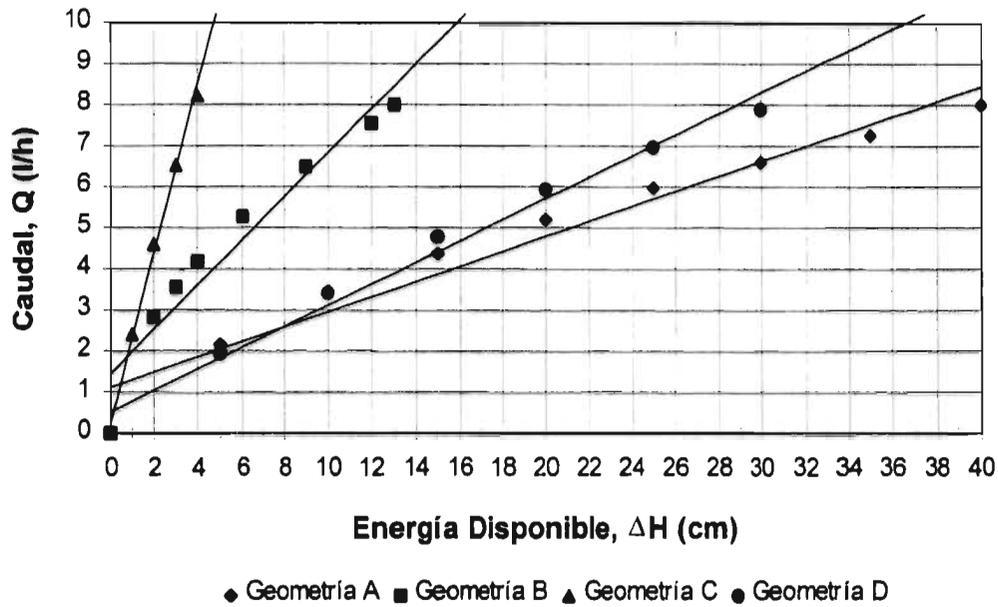


Figura 4.8. Sensibilidad de los emisores para distintas geometrías probadas.

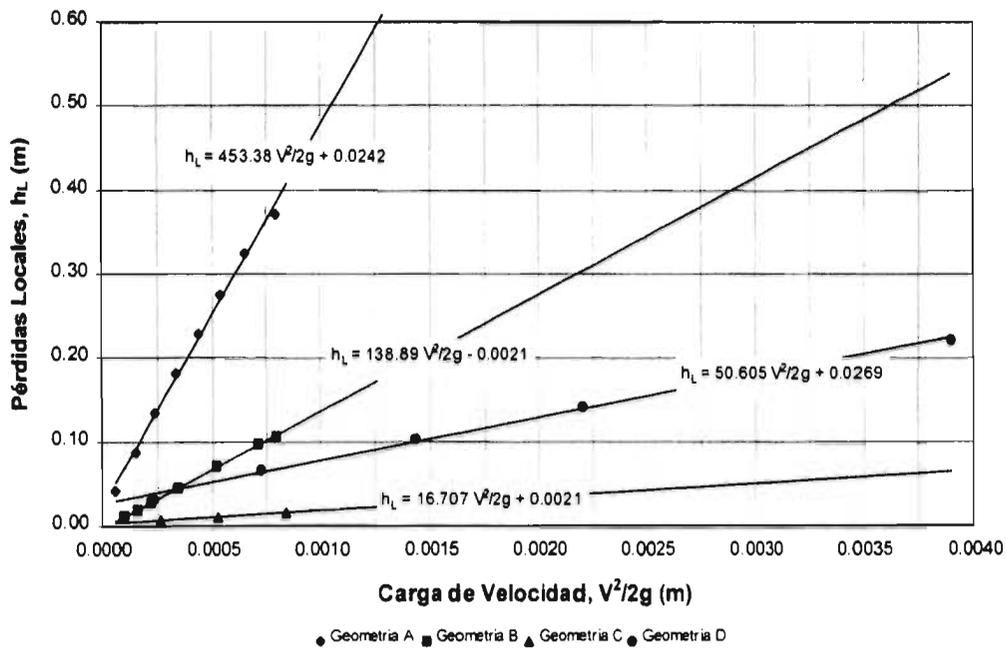


Figura 4.9. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, V²/2g vs h_L, para las geometrías ensayadas..

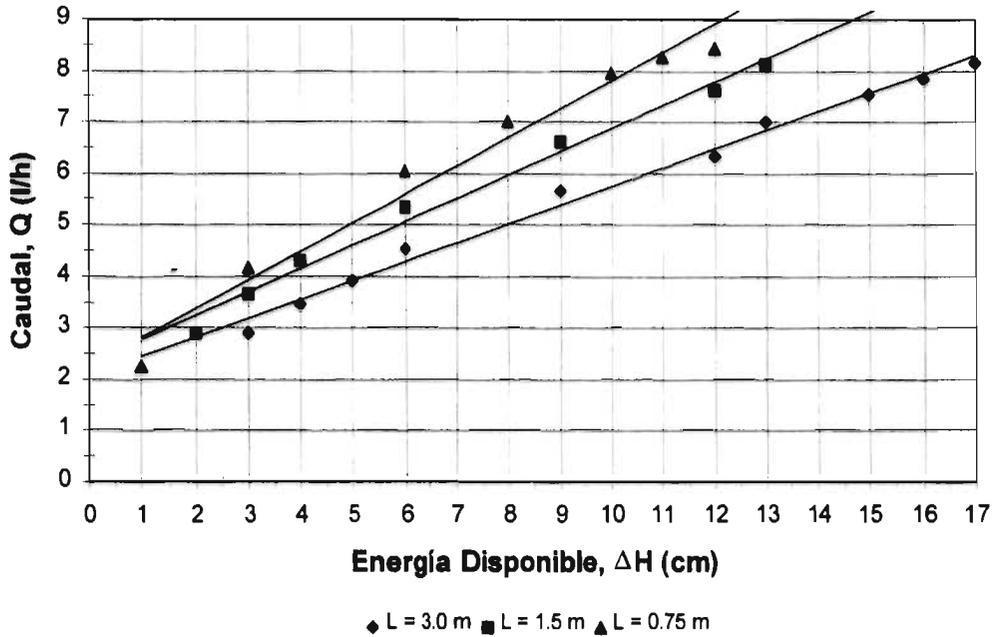


Figura 4.10. Variación del caudal vertido por emisores de distintas longitudes, con $\phi = 3/16''$ a una temperatura de 40 °C.

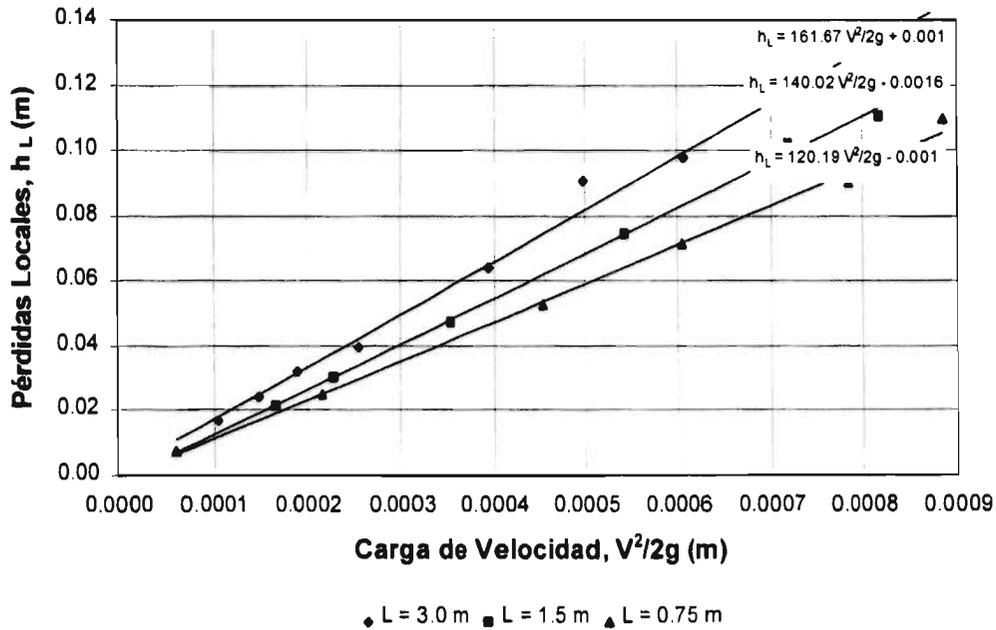


Figura 4.11. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, $V^2/2g$ vs h_L , para emisores con $\phi = 3/16''$ vertiendo a una temperatura de 40 °C.

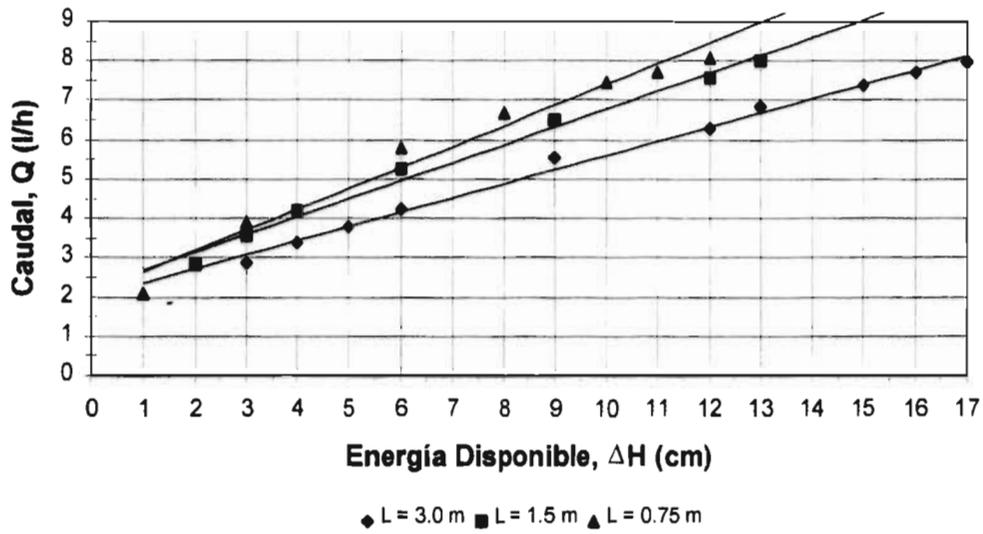


Figura 4.12. Variación del caudal vertido por emisores de distintas longitudes, con $\phi = 3/16''$ a una temperatura de 28 °C.

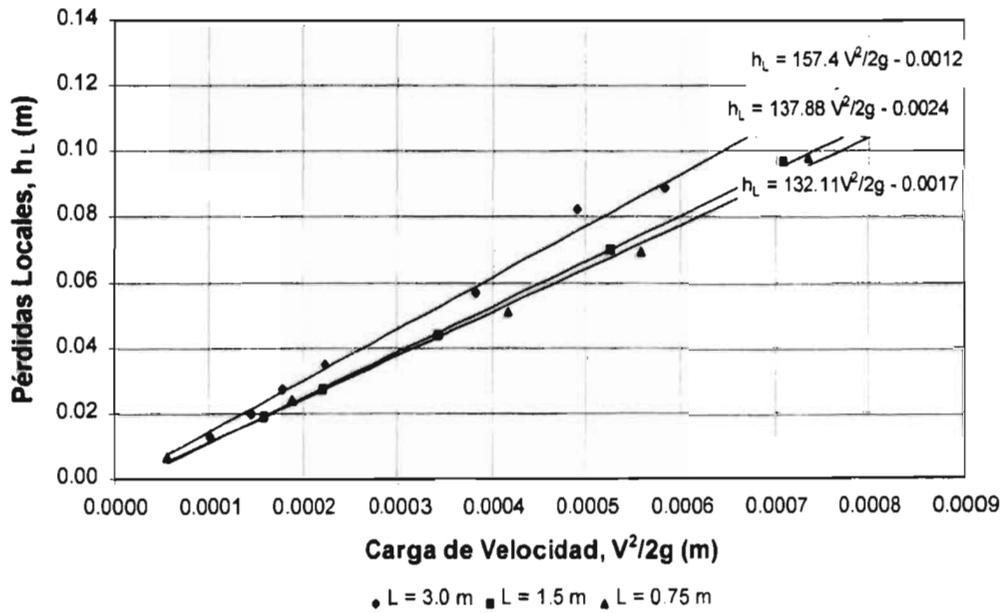


Figura 4.13. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, $V^2/2g$ vs h_L , para emisores con $\phi = 3/16''$ vertiendo a una temperatura de 28 °C.

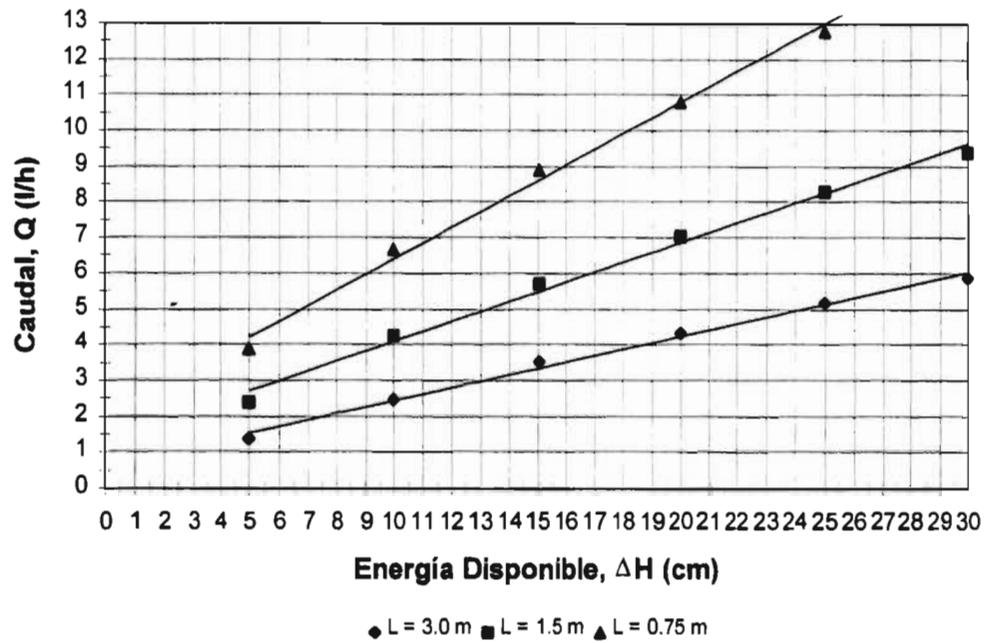


Figura 4.14. Variación del caudal vertido por emisores de distintas longitudes, con $\phi = 1/8''$ a una temperatura de 40 °C.

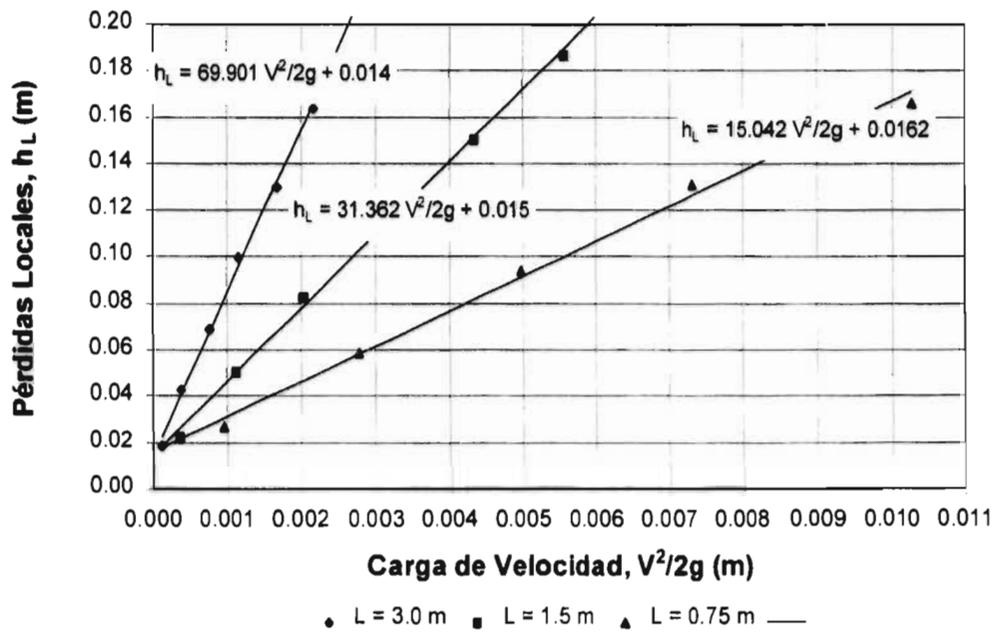


Figura 4.15. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, $V^2/2g$ vs h_L , para emisores con $\phi = 1/8''$ vertiendo a una temperatura de 40 °C.

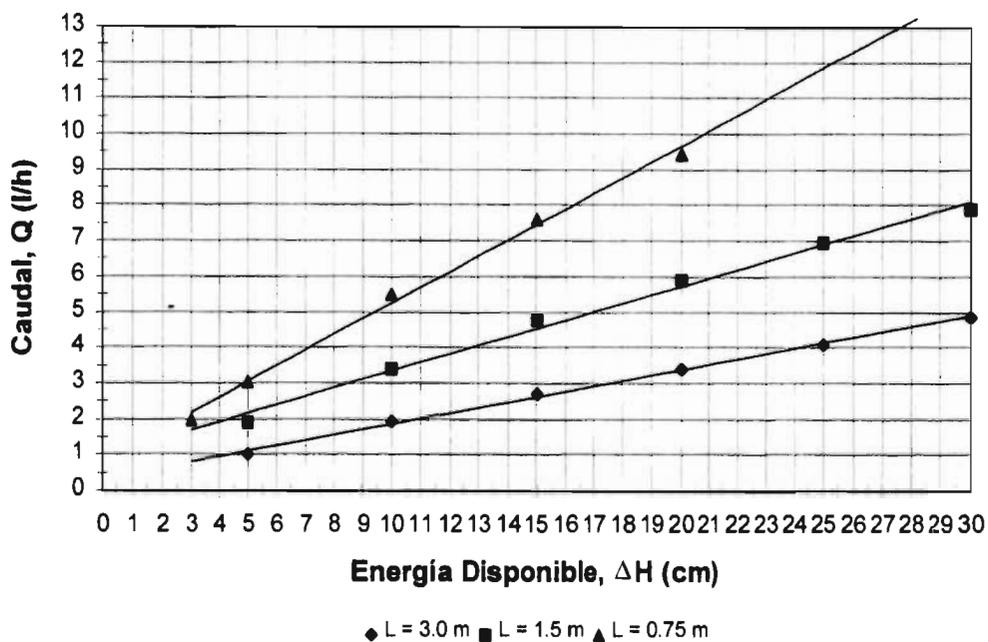


Figura 4.16. Variación del caudal vertido por emisores de distintas longitudes, con $\phi = 1/8''$ a una temperatura de 22 °C.

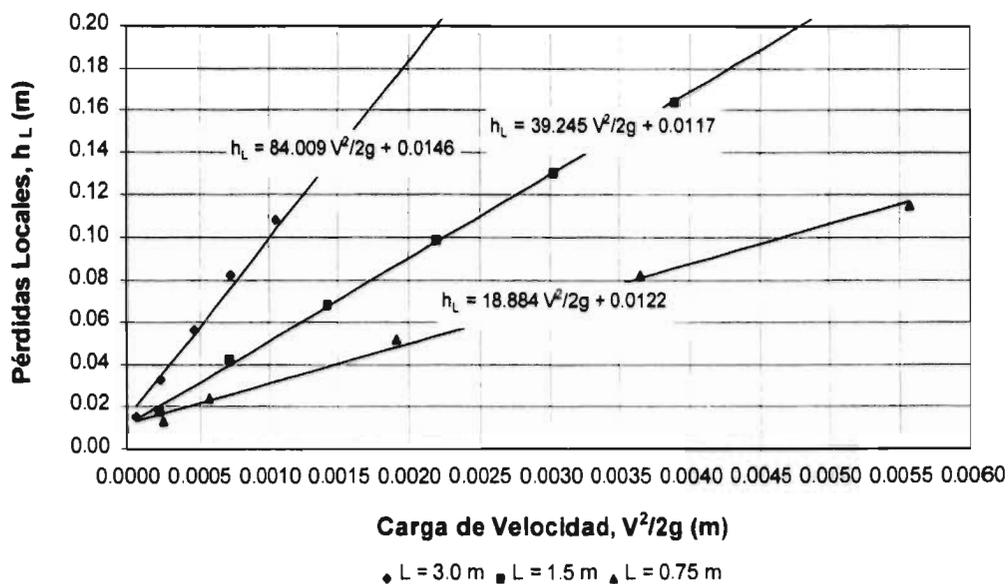


Figura 4.17. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, $V^2/2g$ vs h_L , para emisores con $\phi = 1/8''$ vertiendo a una temperatura de 22 °C.

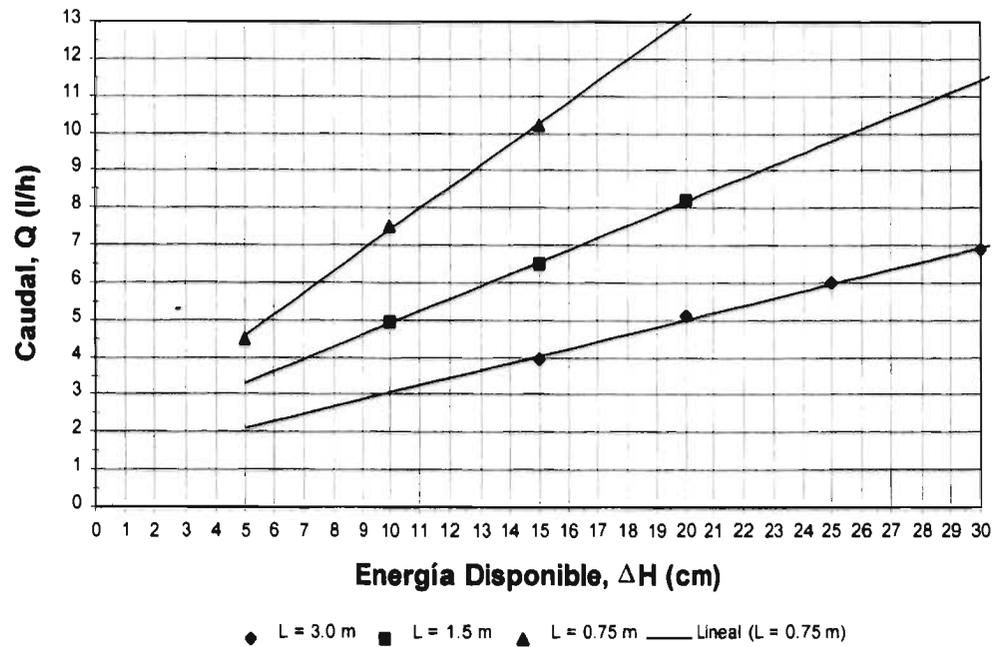


Figura 4.18. Variación del caudal vertido por emisores de distintas longitudes, con $\phi = 1/8''$ a una temperatura de 18 °C.

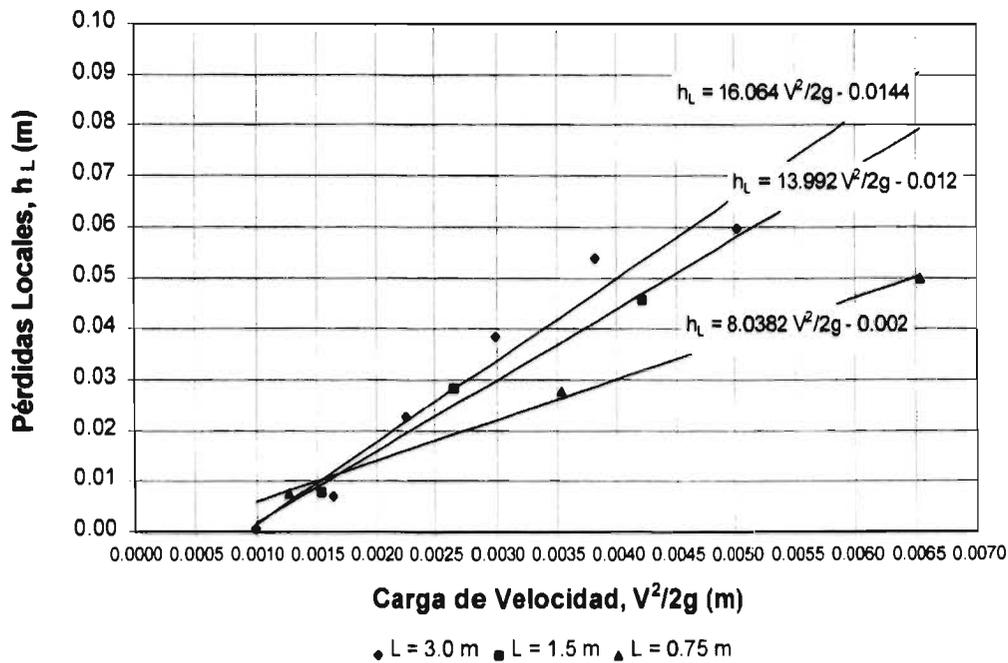


Figura 4.19. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, $V^2/2g$ vs h_L , para emisores con $\phi = 1/8''$ vertiendo a una temperatura de 18 °C.

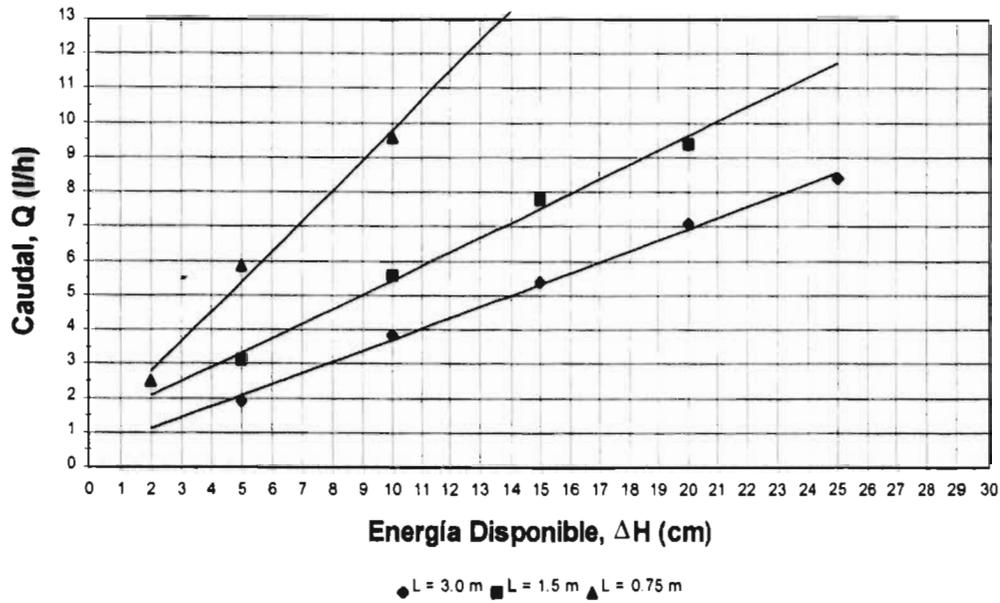


Figura 4.20. Variación del caudal vertido por emisores de distintas longitudes, con $\phi = 1/8''$ a una temperatura de 39 °C.

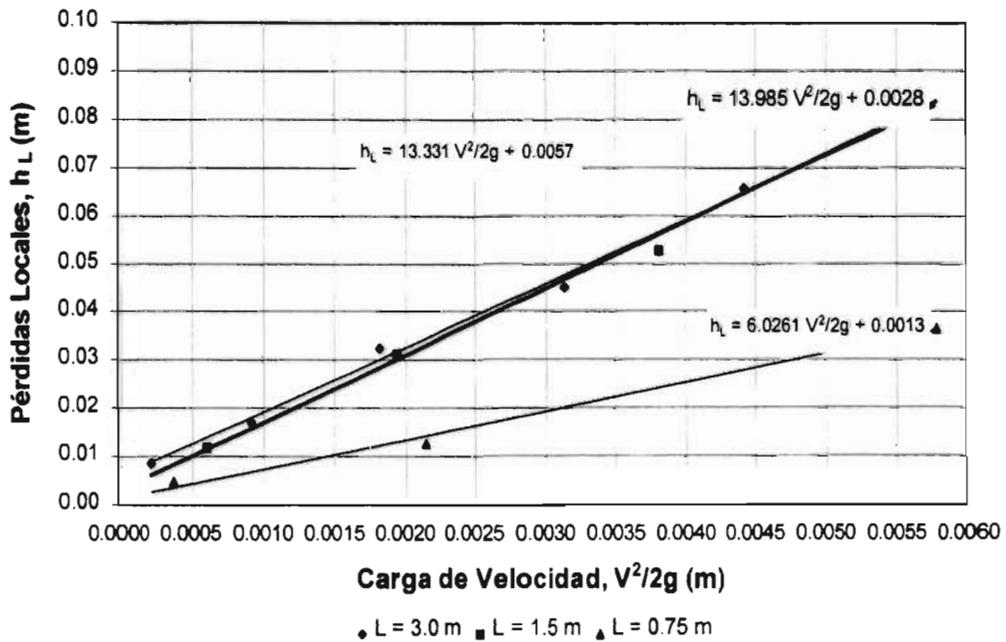


Figura 4.21. Comportamiento de la carga de velocidad con las pérdidas locales, $V^2/2g$ vs h_L , para emisores con $\phi = 1/8''$ vertiendo a una temperatura de 39 °C.

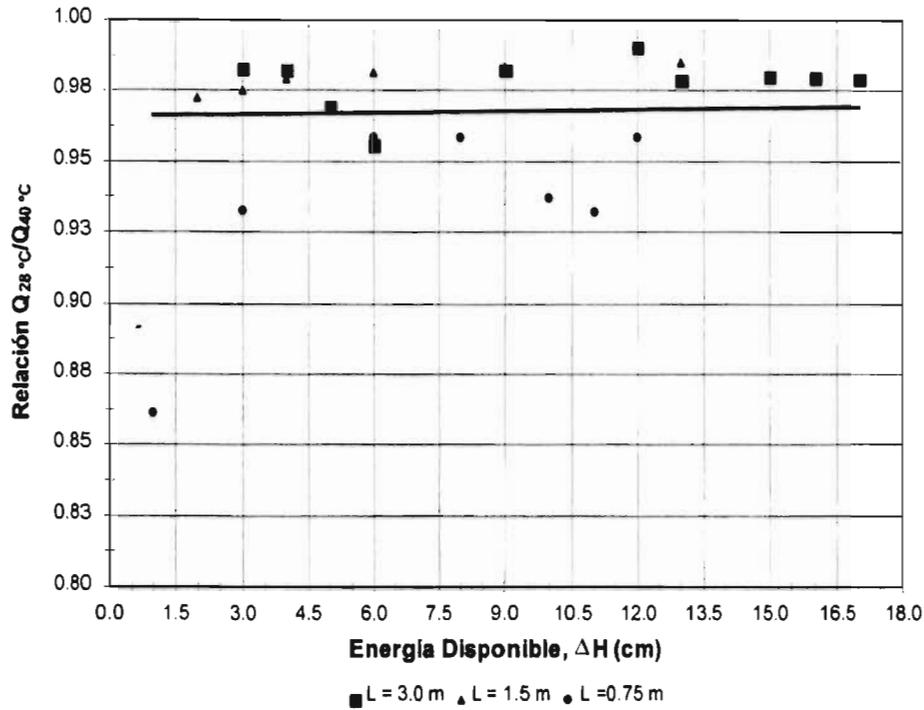


Figura 4.22. Variación de la Relación $Q_{40^\circ C}/Q_{28^\circ C}$ vs ΔH para emisores con $\phi = 3/16''$.

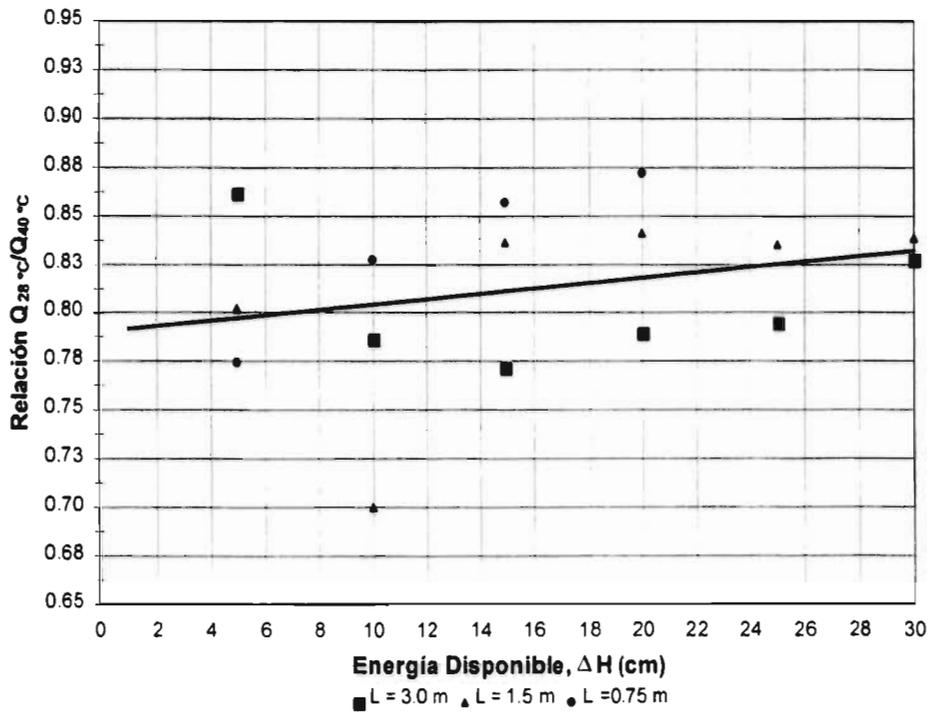


Figura 4.23. Variación de la Relación $Q_{40^\circ C}/Q_{28^\circ C}$ vs ΔH Para Emisores con $\phi = 1/8''$.

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

- De las mediciones realizadas en el tramo de 35 m de longitud, se ve que efectivamente la uniformidad de riego, es excelente, dado los altos valores de UCC obtenidos, que para los tres casos analizados (2, 4 y 8 l/h por emisor), estos valores fueron superior a 0.98.
- En los resultados logrados en el lateral de 50 m de longitud, se ve el favorable comportamiento q vs ΔH , comparados con los sistemas de riego por goteo convencionales, donde para lograr caudales de 8 l/h, es necesario disponer de cargas hasta de 20 m; mientras que en el RPBC se logra suministrar caudales de hasta 8 l/h, con presiones inferiores a 1 metro.
- se ve que en el lateral de 50 m, se pierde aproximadamente el 85% de la energía disponible (al inicio) en tan solo en 50% de su longitud total.
- En términos relativos, la temperatura a lo largo del lateral de 50 m, se incrementa en un 15%, este comportamiento es interesante, ya que esta variación (medida) se puede tener en cuenta ya en el diseño del lateral, haciendo la correspondiente corrección por temperatura en la viscosidad cinemática del agua, de esta manera el diseño se hace más acorde con la realidad.
- No resulta conveniente utilizar, una interconexión lateral - emisor, por medio de agujeros sobre la línea lateral; sino que conviene más realizar esta conexión penetrando directamente el emisor en la línea lateral.
- Para lograr independencia del coeficiente de pérdidas locales K_e , se debe utilizar un factor f de fricción calculado mediante la expresión (4.2) y no como usualmente se calcula f en flujo laminar.

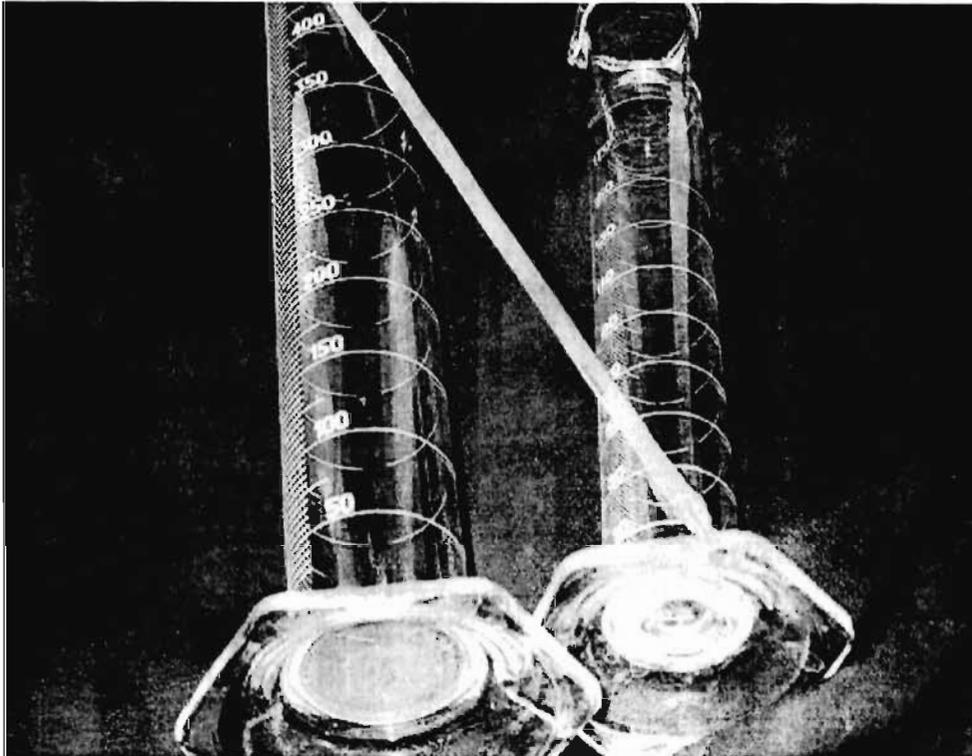
$$f = \frac{39}{Re} \quad (4.2)$$

- La variación de los caudales Q 28 °C/Q 40 °C, para emisores de 3/16 y 1/8", es inferior al 20%, y como dicha relación en todos los casos es menor de 1, se ve que el fenómeno de variación del caudal vertido, se debe fundamentalmente a una disminución de la viscosidad cinemática debido al aumento de la temperatura a lo largo de las pruebas y en la dirección del flujo.

4.5. CALIBRACIÓN DE EMISORES

Para obtener curvas o leyes de vertido en los emisores del RPBC se procedió a instalar una unidad experimental en el laboratorio de División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI-UNAM). En dicha instalación se controlaron las condiciones de funcionamiento con bastante detalle, de tal forma que la temperatura se media continuamente a intervalos de 1 minuto, y no se iniciaba la prueba, hasta tener una temperatura de equilibrio determinada. En la determinación de la elevación sobre línea de ceros, se utilizó un limnómetro de precisión.

Se eligió como intervalo de tiempo, para la medición del caudal (de forma volumétrica) 4 minutos, para de esta manera tener una cantidad representativa de agua dentro de las probetas, que además se seleccionaron en tamaños ascendentes desde una probeta de tan solo 40 ml, para mediciones de gastos bajos, hasta una de 1000 ml en la que se median los caudales más elevados (Fotografía 4.5).



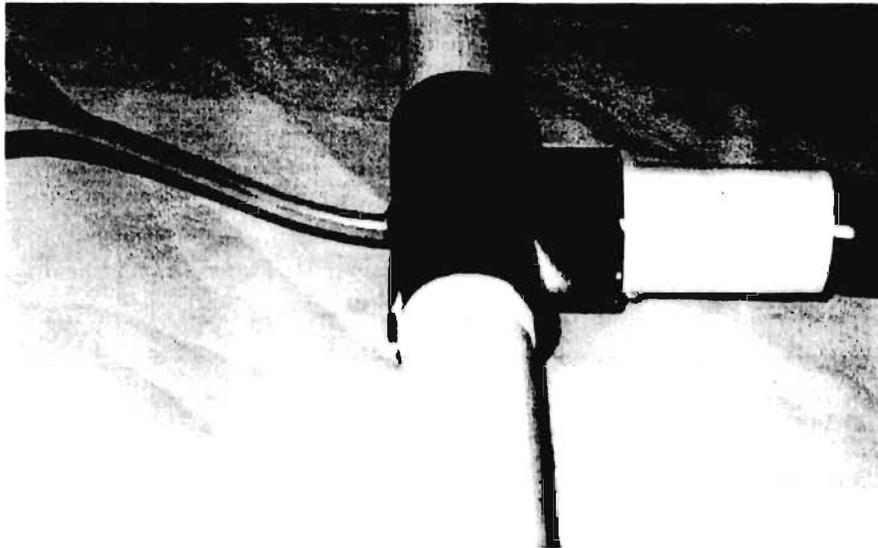
Fotografía 4.5. Probetas y termómetro utilizados en las pruebas realizadas en el laboratorio de la DEPMI-UNAM..

La bomba de alimentación utilizada en las pruebas anteriores fue reemplaza por una bomba sumergible de menor capacidad, pero con un funcionamiento más adecuado, en cuanto no producía palpitations en la descarga, por tanto la salida del agua la realiza de forma más tranquila. Se probaron con emisores de 2.5, 2.0, 1.5, 1.0 y 0.75 m de longitud y con cada uno de estos se obtuvieron caudales dentro del intervalo de 0.3 a 14.5 l/h, que corresponde al rango de funcionamiento del sistema RPBC.

En esta unidad experimental se implemento una unión lateral - emisor que permitiera tener mejor control de la carga disponible y del tipo de unión (ver Fotografías 4.6 y 4.7). Para ello se suspendió el tramo de lateral probado (de $\frac{3}{4}$ " de diámetro) y se le inserto una "T" de tal forma que se pudiera controlar de una manera más exacta la inserción del emisor dentro del lateral, y a la saliente de la "T" se le inserto una manguera transparente, cuyo extremo final servia de referencia en el limnimetro, y a su vez definía la altura de energía cero (caudal nulo) para los emisores ensayados, ver Fotografía 4.8.



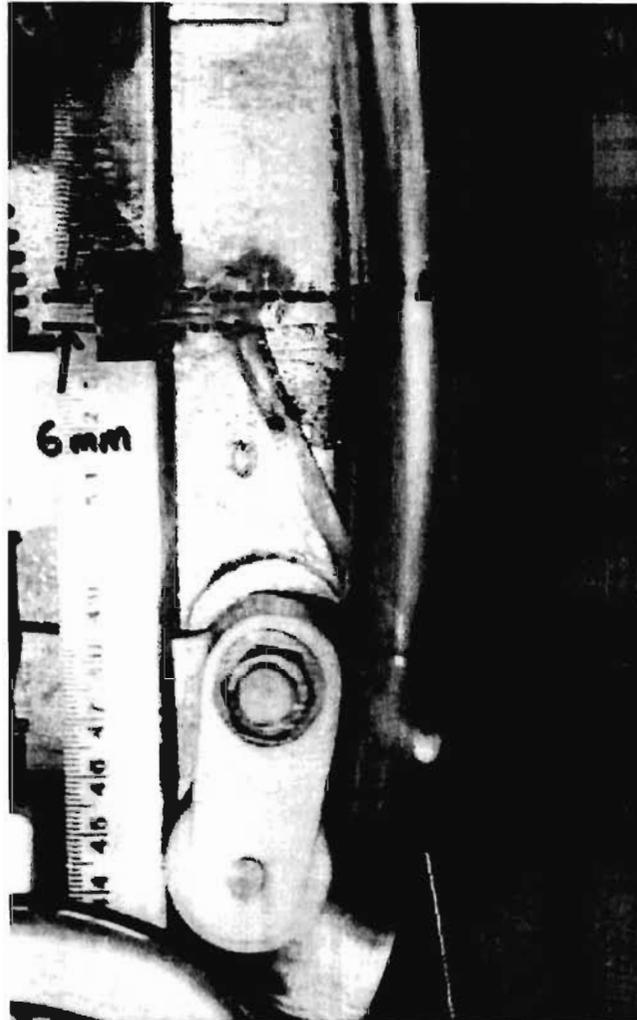
Fotografía 4.6. Arreglo para tener mejor control de la prueba (DEPFI-UNAM).



Fotografía 4.7. Unión lateral - emisor utilizada en el laboratorio (DEPFI-UNAM).

Las mediciones se efectuaron variando de manera aleatoria las distancias ΔH , para así anular la probabilidad de aparición de errores sistemáticos. En las Figuras 4.24

a 4.28 se presentan del lado izquierdo los datos más relevantes al igual que las mediciones efectuadas, y del lado derecho la representación gráfica de estos.



Fotografía 4.8. Caudal cero a una energía disponible en la conexión lateral - emisor de 6 mm.

Como se puede notar los ajustes realizados fueron de tipo lineal, aunque se probaron otros ajustes más elaborados como potenciales, logarítmicos, exponenciales e interpolaciones lineales y no lineales (con la ayuda del Expert Curve 1.2). Adoptándose el modelo lineal, por simplicidad y además, por que siendo sencillo su programación y solución, presento elevados coeficientes de correlación R^2 , en todos los casos por encima de 95%, con lo que se ve que para el rango de caudales de trabajo, para el que fue ideado el RPBC, las ecuaciones aquí ajustadas, modelan adecuadamente el fenómeno hidráulico.

ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA

ϕ MANGUERA = 0.125 pulgadas
 LONGITUD (L) = 3.0 m
 TEMPERATURA = 24.5 °C

ΔH (cm)	Tiempo (min)	Volumen (ml)	Q_{medio} (l/h)
1	4.0	20	0.30
3	4.0	67	1.01
5	4.0	112	1.68
7	4.0	148	2.22
9	4.0	181	2.72
10	4.0	200	3.00
13	4.0	238	3.57
15	4.0	270	4.05
17	4.0	295	4.43
19	4.0	326	4.89
20	4.0	345	5.18
23	4.0	360	5.40

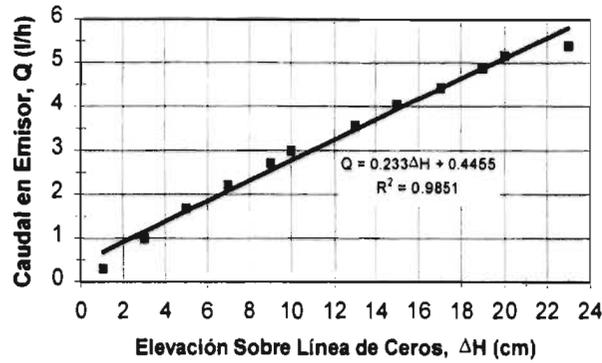


Figura 4.24. Datos experimentales y representación de estos, para un emisor de $\phi = 1/8''$ de una longitud de 3.0 m.

ϕ MANGUERA = 0.125 pulgadas
 LONGITUD (L) = 2.5 m
 TEMPERATURA = 24.5 °C

ΔH (cm)	Tiempo (min)	Volumen (ml)	Q_{medio} (l/h)
1	4.0	24	0.36
3	4.0	78	1.17
5	4.0	126	1.89
7	4.0	168	2.52
9	4.0	200	3.00
10	4.0	230	3.45
13	4.0	280	4.20
15	4.0	320	4.80
17	4.0	355	5.33
19	4.0	385	5.78
20	4.0	403	6.05
23	4.0	490	7.35

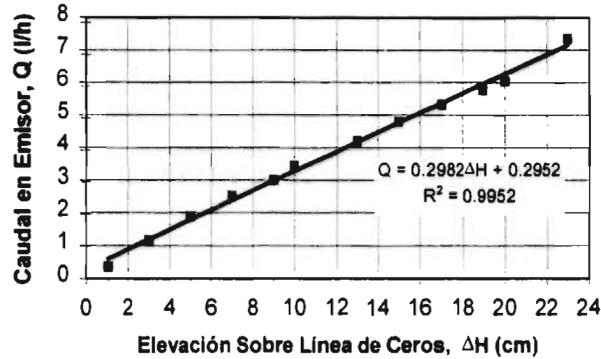


Figura 4.25. Datos experimentales y representación de estos, para un emisor de $\phi = 1/8''$ de una longitud de 2.5 m.

ϕ MANGUERA = 0.125 pulgadas
 LONGITUD (L) = 2.0 m
 TEMPERATURA = 24.5 °C

ΔH (cm)	Tiempo (min)	Volumen (ml)	Q_{medio} (l/h)
1	4.0	31	0.47
3	4.0	96	1.44
5	4.0	165	2.48
7	4.0	225	3.38
9	4.0	272	4.08
10	4.0	283	4.25
13	4.0	345	5.18
15	4.0	390	5.85
17	4.0	423	6.35
19	4.0	465	6.98
20	4.0	490	7.35
23	4.0	540	8.10

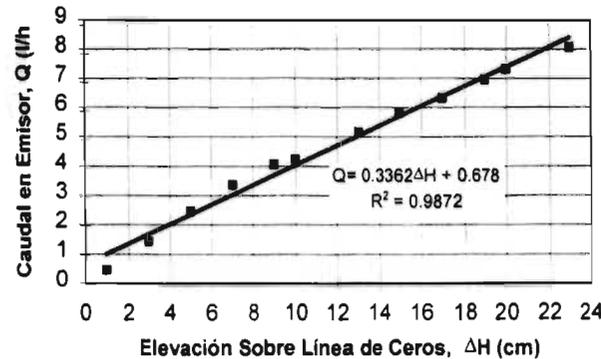


Figura e.26. Datos experimentales y representación de estos, para un emisor de $\phi = 1/8''$ de una longitud de 2.0 m.

MANGUERA = 0.125 pulgadas
 LONGITUD (L) = 1.5 m
 TEMPERATURA = 24.5 °C

ΔH (cm)	Tiempo (min)	Volumen (ml)	Q_{medio} (l/h)
1	4.0	27	0.41
3	4.0	68	1.02
5	4.0	209	3.14
7	4.0	280	4.20
9	4.0	354	5.31
10	4.0	366	5.49
13	4.0	493	7.40
15	4.0	557	8.36
17	4.0	605	9.08
19	4.0	667	10.01
20	4.0	683	10.25
23	4.0	735	11.03

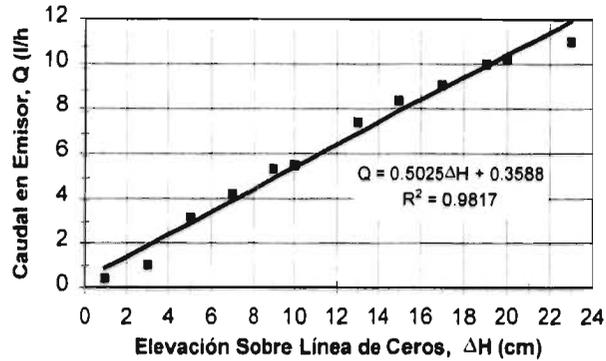


Figura 5.27. Datos experimentales y representación de estos, para un emisor de $\phi = 1/8''$ de una longitud de 1.5 m.

MANGUERA = 0.125 pulgadas
 LONGITUD (L) = 1.0 m
 TEMPERATURA = 24.5 °C

ΔH (cm)	Tiempo (min)	Volumen (ml)	Q_{medio} (l/h)
1	4.0	34	0.51
3	4.0	70	1.05
5	4.0	210	3.15
7	4.0	283	4.40
9	4.0	421	6.32
10	4.0	465	6.98
13	4.0	590	8.85
15	4.0	660	9.90
17	4.0	725	10.88
19	4.0	795	11.93
20	4.0	820	12.30
23	4.0	990	14.85

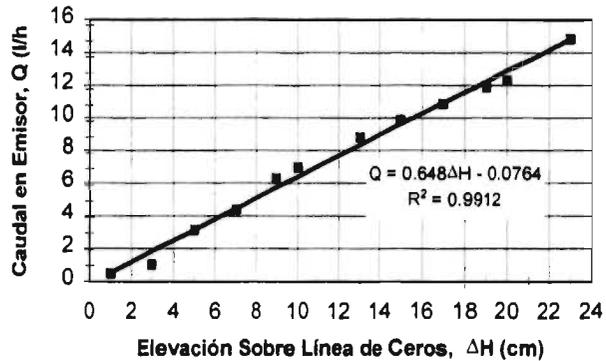


Figura 4.28. Datos experimentales y representación de estos, para un emisor de $\phi = 1/8''$ de una longitud de 1.0 m.

4.6. PLANTEAMIENTO DEL MODELO DE CÁLCULO

Teniendo como base todas las pruebas, tanto experimentales, como numéricas se determina que en el RPBC, tubos de $1/2$ y $3/4$ " son apropiados para la conformación de los laterales. Y para los emisores, mangueras plásticas de $1/8''$ de diámetro adheridas, ya sea entrando hasta la mitad del diámetro del lateral o a ras, muestran un funcionamiento satisfactorio desde el punto de vista de los requisitos básicos nombrados anteriormente: Caudal uniforme y constante, poca sensibilidad a las variaciones de presión y buen comportamiento en el riesgo de obturaciones, elevada uniformidad de fabricación, resistencia a la agresividad química y ambiental, así como a las operaciones agrícolas, minimización de costos, poca sensibilidad a los cambios de temperatura.

En la implantación del sistema de RPBC se realiza un procedimiento lógico y secuencial, basado fundamentalmente en la experimentación en cual se describe de manera general en el diagrama de flujo de la Figura 4.29.

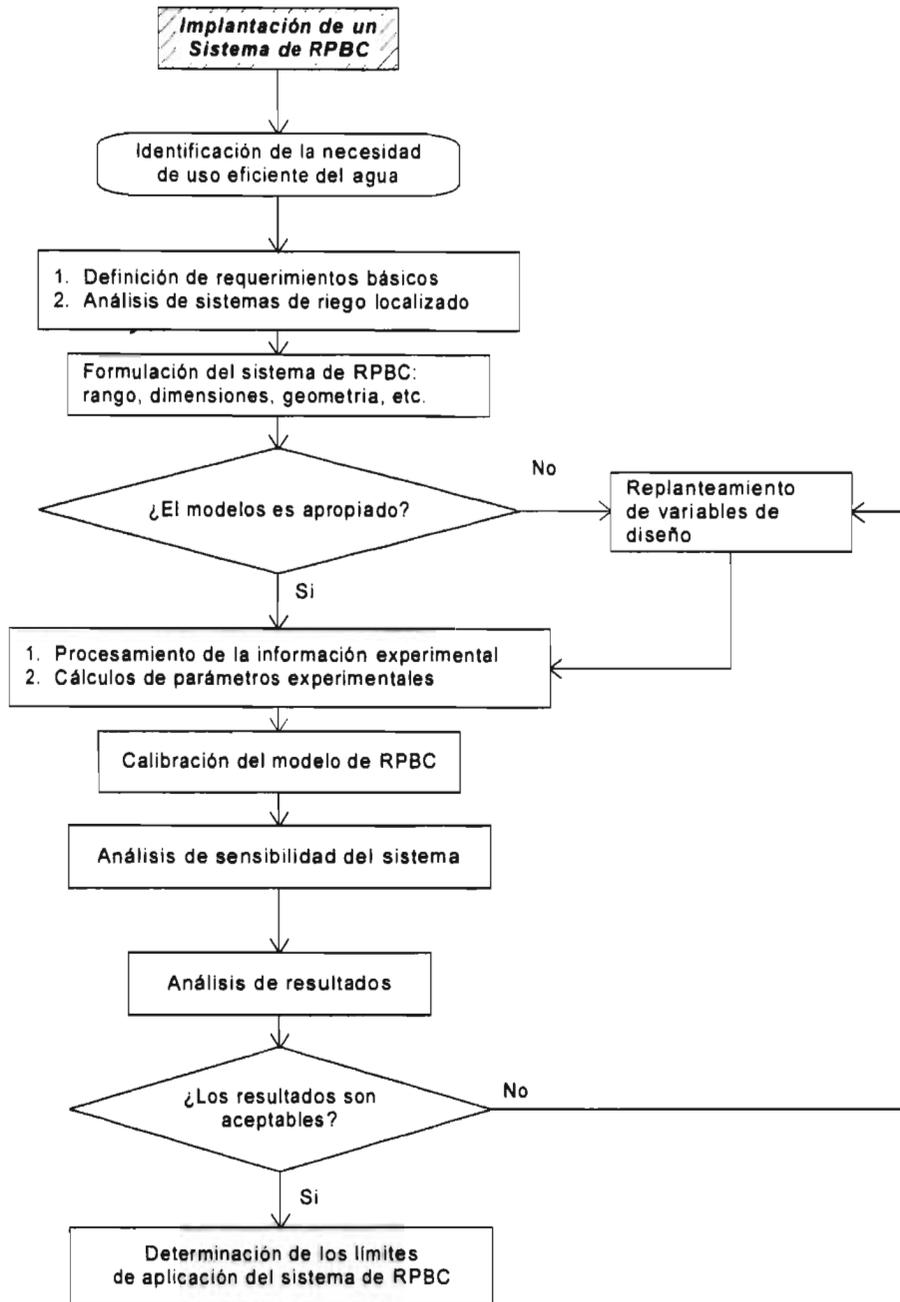


Figura 4.29. Secuencia lógica seguida en la determinación del sistema de RPBC

4.6.1. AJUSTE DEL MODELO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE EMISORES

La determinación de tablas y curvas de diseño, se realizan teniendo en cuenta las mediciones realizadas, determinando relaciones de tipo lineal de la forma mostrada en la ecuación 4.5, para los distintos medidores probados en el laboratorio de la DEPI-UNAM.

$$Q(L) = m(L) \Delta H + C(L), \quad (4.5)$$

donde

Q(L) ajuste encontrados en las Figuras 4.24 a 4.28.

m(L) función halla del ajuste sobre el espacio numérico m vs L (Figura 4.29).

C(L) función halla del ajuste sobre el espacio numérico C vs L (Figura 4.30).

L longitud de emisores de 1/8" de diámetro ensayados.

Las funciones $m = m(L)$ y $C=C(L)$ obtenidas, se muestran en las ecuaciones 4.6 y 4.7 respectivamente. Realizando un análisis dimensional m tiene unidades de l/h/cm y C de l/h.

$$m(L) = 0.6758L^{-0.9076} \quad (4.6)$$

$$C(L) = 0.0827L - 0.3269 \quad (4.7)$$

La representación gráfica estas funciones se muestran en las Figuras 4.29 y 4.30.

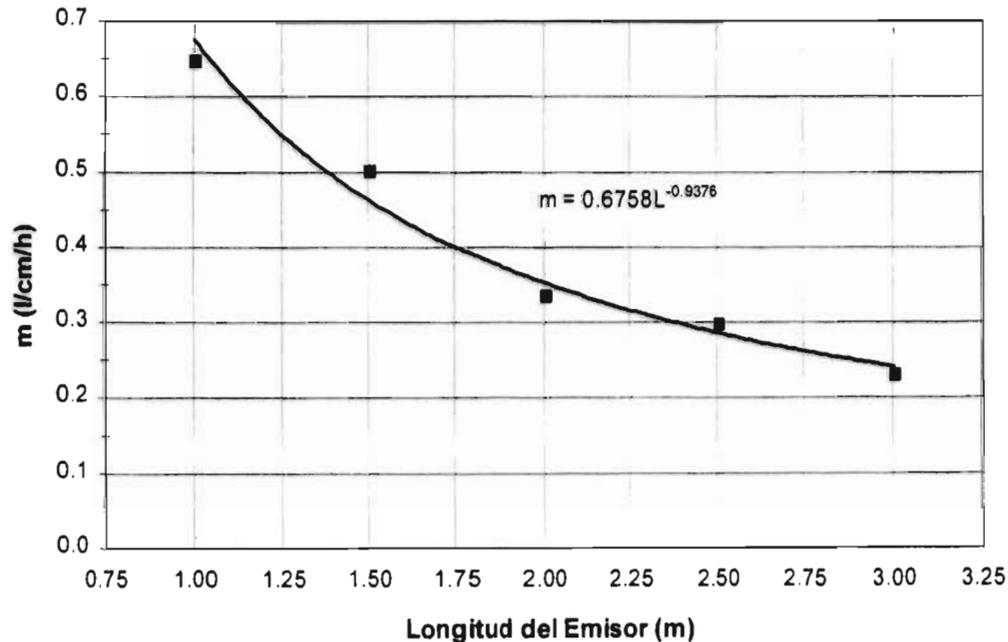


Figura 4.29. Datos experimentales y ajuste de la función m vs L.

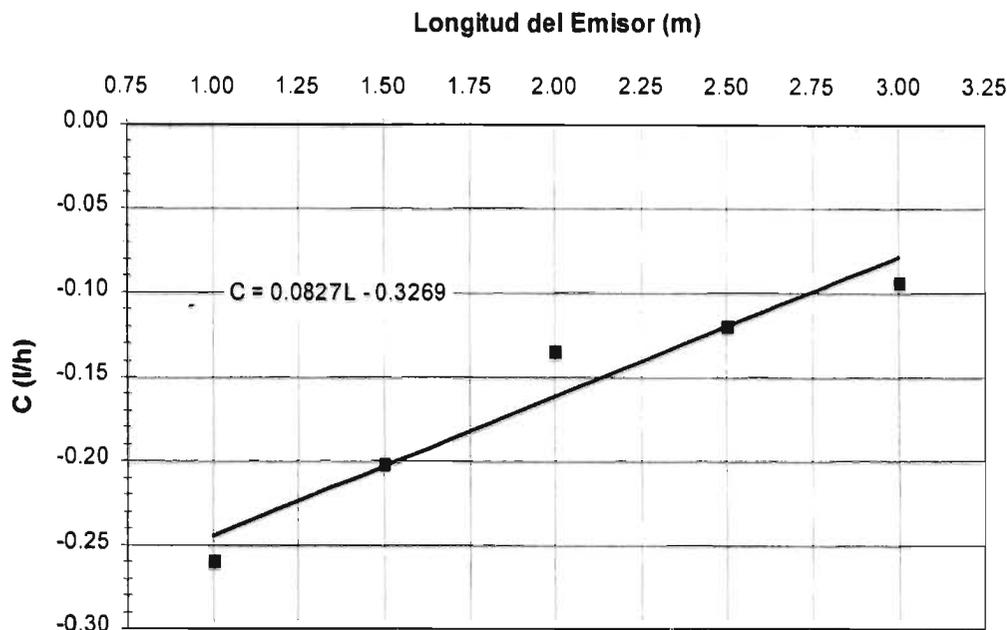


Figura 4.30. Datos experimentales y ajuste de la función C vs L.

Ahora con las ecuaciones halladas se procede a suponer valores de longitudes de emisores " L_i " y a evaluar las funciones $m = m(L_i)$ y $C = C(L_i)$ y con estas a evaluar la ecuación 4.5. Con lo cual se obtiene la Tabla 5.11, que sirve para dimensionar emisores en el sistema de RPBC, la representación numérica de dicha tabla se ve en la Figura 4.30.

4.7. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO EN EL RPBC

Con base en los resultados obtenidos a lo largo del presente trabajo se propone el siguiente procedimiento de diseño: Teniendo en cuenta la topografía del terreno y sus dimensiones, se traza la red de riego con los componentes necesarios, válvulas, tuberías principales, primarias, secundarias, terciarias y laterales (ver Figura 2.1). Se ubica el dispositivo de control de carga constante (DCCC) y se le asigna una carga H_0 , y para el caudal de diseño Q_d , se resuelve la red abierta, eso sí, teniendo en cuenta las consideraciones hechas para el cálculo del coeficiente de fricción " f " y la corrección por temperatura en el cálculo de la viscosidad cinemática (ν).

Teniendo la energía disponible en la unión lateral - emisor se determina la longitud de emisor, ya sea mediante el cálculo de un tramo a presión, en el cual se utilizan los coeficientes de pérdidas locales. O bien utilizando las ecuaciones 4.5 a 4.7. Obviamente, no solo es aplicable, sino que se recomienda un proceso de optimización a lo largo de todo el diseño, con el objeto de minimizar costos, pero garantizando de todas formas un funcionamiento confiable. El proceso descrito aquí se muestra en forma de diagrama de flujo en la Figura 4.32.

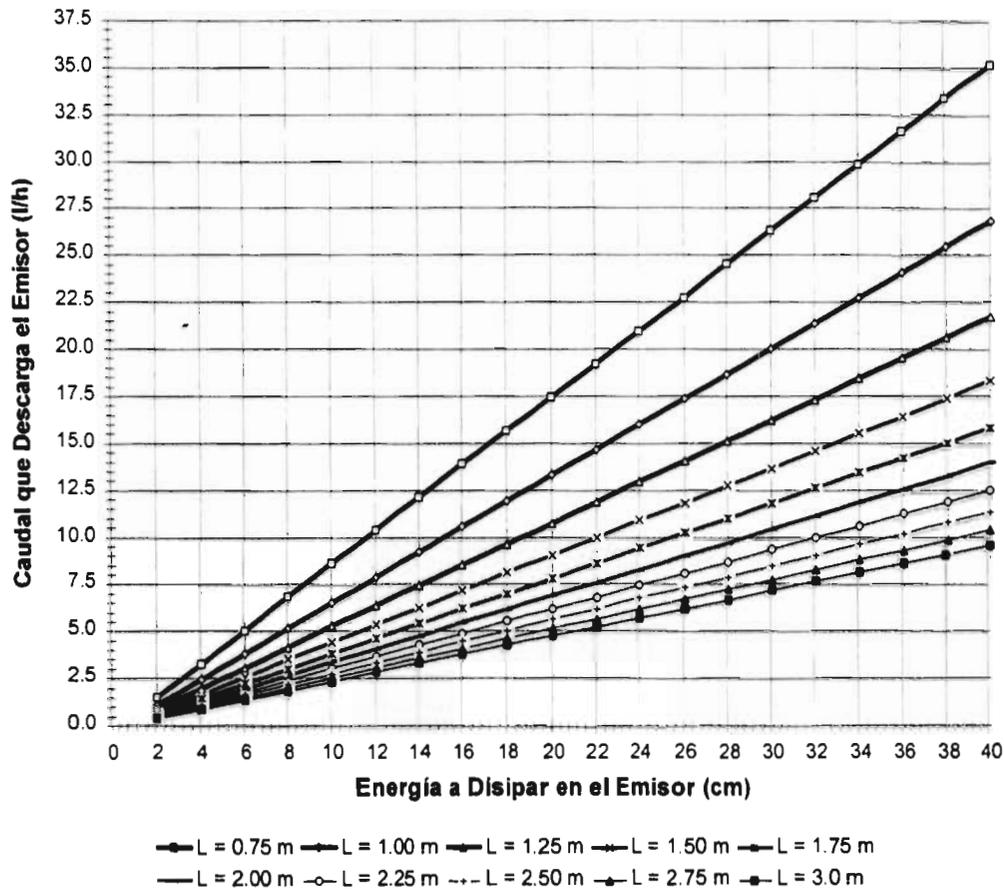


Figura 4.31. Representación gráfica del comportamiento de emisores de 1/8".

4.8. FACTIBILIDAD TÉCNICA DEL USO DEL RPBC

Con base en los resultados obtenidos, no se ve ningún obstáculo serio para el funcionamiento confiable del sistema. El dispositivo de control de carga constante es sencillo de construir y de operar, y mantiene dicha carga, para las variaciones de gasto que se podrían esperar en condiciones reales. Los emisores de 1/8" tienen la característica adecuada para controlar el gasto, con coeficientes de uniformidad aceptables, dando la longitud correcta en cada manguera.

Para los emisores de mayor diámetro, 3/16", los cambios de temperatura ya no afectan el escurrimiento, pero los gastos deben controlarse con cargas bajas, tal vez por medio de soportes, que permitan elevar la salida de los tubos emisores, pues sino dan gastos demasiados altos.

Por todo lo anterior, se ve que el sistema de RPBC es factible técnicamente.

ENFOQUE EXPERIMENTAL PARA LA IMPLANTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO PRESURIZADO DE BAJA CARGA

ΔH (cm)	Caudales de Diseño en los Emisores (l/h)									
	L (m) 0.75	L (m) 1.00	L (m) 1.25	L (m) 1.50	L (m) 1.75	L (m) 2.00	L (m) 2.25	L (m) 2.50	L (m) 2.75	L (m) 3.00
2	1.51	1.11	0.87	0.72	0.62	0.54	0.49	0.45	0.42	0.40
4	3.28	2.46	1.97	1.65	1.42	1.25	1.12	1.02	0.95	0.89
6	5.05	3.81	3.07	2.57	2.22	1.96	1.75	1.60	1.47	1.37
8	6.82	5.16	4.16	3.49	3.02	2.66	2.39	2.17	1.99	1.85
10	8.59	6.51	5.26	4.42	3.82	3.37	3.02	2.74	2.52	2.33
12	10.36	7.87	6.36	5.34	4.62	4.07	3.65	3.31	3.04	2.82
14	12.13	9.22	7.45	6.27	5.42	4.78	4.28	3.89	3.57	3.30
16	13.90	10.57	8.55	7.19	6.22	5.48	4.91	4.46	4.09	3.78
18	15.67	11.92	9.64	8.11	7.02	6.19	5.55	5.03	4.61	4.26
20	17.44	13.27	10.74	9.04	7.82	6.90	6.18	5.60	5.14	4.75
22	19.21	14.62	11.84	9.96	8.62	7.60	6.81	6.18	5.66	5.23
24	20.98	15.98	12.93	10.89	9.42	8.31	7.44	6.75	6.18	5.71
26	22.75	17.33	14.03	11.81	10.22	9.01	8.07	7.32	6.71	6.19
28	24.52	18.68	15.13	12.74	11.01	9.72	8.71	7.89	7.23	6.68
30	26.29	20.03	16.22	13.66	11.81	10.42	9.34	8.47	7.75	7.16
32	28.06	21.38	17.32	14.58	12.61	11.13	9.97	9.04	8.28	7.64
34	29.83	22.73	18.42	15.51	13.41	11.83	10.60	9.61	8.80	8.12
36	31.60	24.08	19.51	16.43	14.21	12.54	11.23	10.18	9.32	8.61
38	33.37	25.44	20.61	17.36	15.01	13.25	11.87	10.76	9.85	9.09
40	35.14	26.79	21.71	18.28	15.81	13.95	12.50	11.33	10.37	9.57
42	36.91	28.14	22.80	19.20	16.61	14.66	13.13	11.90	10.89	10.05
44	38.68	29.49	23.90	20.13	17.41	15.36	13.76	12.47	11.42	10.54
46	40.45	30.84	24.99	21.05	18.21	16.07	14.39	13.05	11.94	11.02
48	42.22	32.19	26.09	21.98	19.01	16.77	15.02	13.62	12.46	11.50
50	43.99	33.55	27.19	22.90	19.81	17.48	15.66	14.19	12.99	11.98
52	45.76	34.90	28.28	23.83	20.61	18.19	16.29	14.76	13.51	12.47
54	47.53	36.25	29.38	24.75	21.41	18.89	16.92	15.34	14.04	12.95
56	49.30	37.60	30.48	25.67	22.21	19.60	17.55	15.91	14.56	13.43
58	51.07	38.95	31.57	26.60	23.01	20.30	18.18	16.48	15.08	13.91
60	52.84	40.30	32.67	27.52	23.81	21.01	18.82	17.05	15.61	14.40
62	54.61	41.66	33.77	28.45	24.61	21.71	19.45	17.63	16.13	14.88
64	56.38	43.01	34.86	29.37	25.41	22.42	20.08	18.20	16.65	15.36
66	58.15	44.36	35.96	30.29	26.21	23.13	20.71	18.77	17.18	15.84
68	59.92	45.71	37.06	31.22	27.01	23.83	21.34	19.34	17.70	16.33
70	61.69	47.06	38.15	32.14	27.81	24.54	21.98	19.92	18.22	16.81
72	63.46	48.41	39.25	33.07	28.61	25.24	22.61	20.49	18.75	17.29
74	65.23	49.77	40.34	33.99	29.41	25.95	23.24	21.06	19.27	17.77
76	67.00	51.12	41.44	34.92	30.21	26.65	23.87	21.63	19.79	18.26
78	68.77	52.47	42.54	35.84	31.01	27.36	24.50	22.21	20.32	18.74
80	70.54	53.82	43.63	36.76	31.81	28.07	25.13	22.78	20.84	19.22
82	72.31	55.17	44.73	37.69	32.61	28.77	25.77	23.35	21.36	19.70
84	74.08	56.52	45.83	38.61	33.41	29.48	26.40	23.92	21.89	20.19
86	75.85	57.87	46.92	39.54	34.21	30.18	27.03	24.50	22.41	20.67
88	77.62	59.23	48.02	40.46	35.01	30.89	27.66	25.07	22.94	21.15
90	79.39	60.58	49.12	41.38	35.81	31.59	28.29	25.64	23.46	21.63
92	81.16	61.93	50.21	42.31	36.61	32.30	28.93	26.21	23.98	22.12
94	82.93	63.28	51.31	43.23	37.41	33.01	29.56	26.79	24.51	22.60
96	84.70	64.63	52.41	44.16	38.21	33.71	30.19	27.36	25.03	23.08
98	86.47	65.98	53.50	45.08	39.01	34.42	30.82	27.93	25.55	23.56
100	88.24	67.34	54.60	46.00	39.81	35.12	31.45	28.50	26.08	24.05

Tabla 5.11. Extrapolación de Valores Medidos Experimentalmente Para la Selección y Diseño de Emisores.

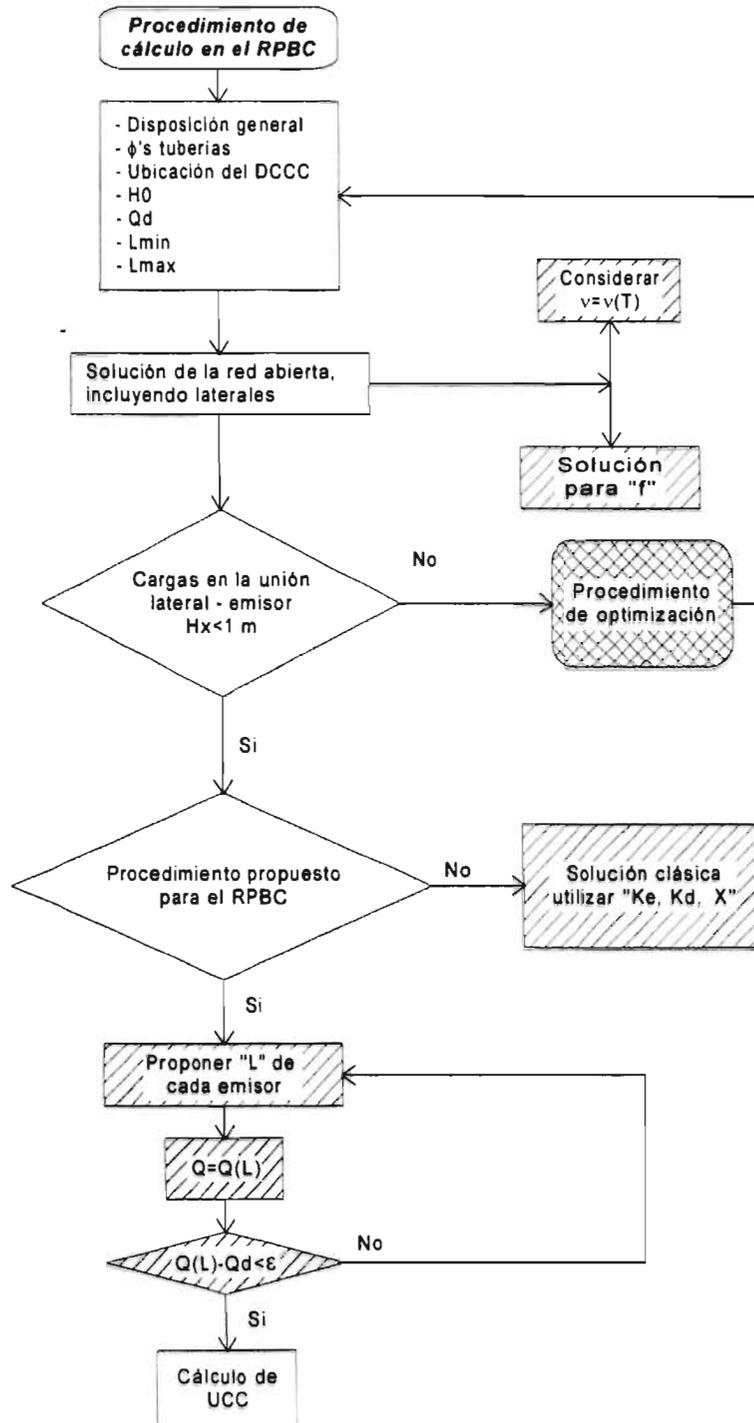


Figura 4.32. Diagrama de flujo del procedimiento de diseño del sistema de RPBC.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Es necesario desarrollar y dar a conocer sistemas de riego de alta eficiencia que permitan ahorros significativos de agua y que sean útiles para el sector agrícola; además, que tengan como características principales ser de tecnología apropiada, confiables en su operación y económicos.
- Por medio del sistema de Riego Presurizado de Baja Carga, se puede utilizar la técnica de ferti-irrigación y se vislumbra como una alternativa para la habilitación de zonas potencialmente cultivables, donde la escasez de agua es una limitación.
- De manera cualitativa se ve favorable económicamente el sistema de RPBC, dado el desarrollo de nuevos materiales, más económicos y duraderos, y por lo tanto, con la posibilidad de amortizar la inversión en varios años o de utilizar instalaciones modulares que se puedan llevar a donde se vayan requiriendo.
- Los resultados a lo largo del presente trabajo, permiten ver el comportamiento hidráulico de los emisores y las líneas laterales
- Los resultados obtenidos en las instalaciones experimentales, permiten aceptar la viabilidad técnica del sistema de RPBC, para ser utilizado en cultivos que requieran caudales en el rango de 2 a 8 l/h por punto de emisión.
- Es necesario integrar otras disciplinas de la ingeniería, para poder implementar dispositivos de control fluidicos, electrónicos, mecánicos o de otro tipo, que permitan la automatización del sistema RPBC.
- Los emisores basados en mangueras de 1/8" de diámetro, son satisfactoriamente tolerables a las obstrucciones, mientras que en los sistemas convencionales de riego por goteo, el riesgo de taponamiento es bastante común. Este hecho abre la posibilidad de la eventual utilización del sistema de RPBC con aguas provenientes de efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales (aguas de reuso).
- Adoptar para el cálculo del factor "f" de fricción, en el rango de transición entre laminar y turbulento, la tendencia de tubos lisos, resulta ser adecuado, ya que como en esta zona comportamiento del flujo es errático, conviene estar del lado conservativo ante esta incertidumbre.
- Bajo el punto de vista de la uniformidad de riego, el sistema de RPBC esta clasificado como de comportamiento excelente, ya que en todas las mediciones realizadas el coeficiente de uniformidad de Christiansen (UCC), resulto mayor a 0.95.

- Ante la ausencia de información, acerca del comportamiento de los coeficientes de pérdidas locales para diámetros pequeños, puede resultar de gran ayuda utilizar los valores de " K_e " hallados en el presente trabajo.
- El procedimiento de cálculo desarrollado es bastante sencillo y de fácil programación, además puede ser integrado a desarrollos matemáticos más elaborados, que utilizan técnicas tales como diferencias y elementos finitos (Kang, 1996).
- Los dispositivos experimentales de laboratorio pueden servir para el estudio del comportamiento de flujos, a través de mangueras de diámetros pequeños, fluyendo a bajas velocidades (en régimen laminar).

Apéndice TUBERÍAS, PRINCIPAL COMPONENTE DEL SISTEMA DE RPBC

GENERALIDADES

Se denominan tuberías a presión o conducciones forzadas, a aquellos conductos que funcionan a plena sección y en los que el movimiento del líquido no depende exclusivamente de una pendiente continua, como en los canales, sino que, por el contrario, pueden presentarse contrapendientes, lo cual hace necesario que el líquido llene completamente toda la conducción, y que en el interior de esta se de una cierta presión, distinta generalmente de la atmosférica.

Conviene definir algunos términos utilizados a lo largo del presente trabajo:

- Tubo: Es un elemento recto normal de sección circular.
- Tubería: Es la sucesión de tubos, piezas especiales y dispositivos convenientemente unidos, mediante juntas, de modo que formen un conducto largo.
- Piezas especiales: Son unidades que permiten hacer cambios de dirección, empalmes, derivaciones, cambios de sección, etc.
- Juntas: Son elementos que sirven para unir tubos y piezas especiales.

MATERIALES

Por lo que respecta a los materiales generalmente utilizados en la fabricación de tubos, se pueden clasificar de la manera siguiente:

- Fundición: En la actualidad los tubos de fundición de hierro se fabrican por centrifugación vertiendo el hierro fundido en moldes giratorios. Para evitar incrustaciones y corrosiones los tubos suelen revestirse interiormente con cemento, betún asfáltico, pinturas plásticas u otras sustancias protectoras. Si la fundición se encuentra exenta de fósforo y azufre estos tubos pueden soportar presiones de unas 20 atmósferas.
- Aleación de acero: Las láminas rectangulares de acero laminado se doblan o remachan longitudinalmente, o bien se sueldan longitudinalmente (tubos soldados). Los tubos de pequeño diámetro pueden fabricarse sin soldaduras (tubos estirados).
- Aleación de hierro: Las placas rectangulares son de hierro laminado y se pegan longitudinalmente.
- Hierro galvanizado o acero galvanizado: Son tubos como los anteriormente mencionados, cubiertos con una capa de zinc.
- Hormigón en masa: Estos tubos se utilizan únicamente para tuberías que funcionan por gravedad, sin presión interior o muy reducida ni carga exterior, en las que una filtración hacia el interior o exterior del tubo no tiene consecuencias. Se emplea para riego, saneamientos agrícolas y alcantarillado.

- **Hormigón armado:** Estos tubos suelen fabricarse por el sistema de centrifugado y tienen armadura metálica longitudinal, compuesta por anillos de acero y refuerzo transversal. Resisten grandes presiones y evitan la flexión de los anillos de acero, trabajando bien a compresión. Son muy utilizados en pasos de ferrocarril, carreteras, pistas de aterrizaje y para abastecimientos de agua con grandes caudales.
- **Hormigón pretensado:** El hormigón está reforzado con armadura tensada en todo o en parte. Se utiliza para aquellas aplicaciones donde se presenten altas presiones.
- **Aluminio:** Este material suele emplearse en las instalaciones móviles de riego por aspersión, debido a su peso ligero.
- **Polietileno de alta densidad:** Denominado internacionalmente como HDPE, es un tipo de tubería producto de los últimos avances en ingeniería de materiales, que posee características similares a las del polietileno; pero adicionalmente se logra que las tuberías construidas con este material sean especialmente resistentes a la abrasión, impactos, ataques químicos etc.
- **Plástico:** Los tubos de PVC (policloruro de vinilo no plastificado) y PE (polietileno), son de escasa rugosidad interna, pueden ser rígidos o flexibles, siendo ambos fácilmente manejables por su poco peso.

De todas las clases de tubos descritos los más específicos y utilizados en el riego localizado, y por ende en el RPBC, son los de plástico, tanto los de policloruro de vinilo no plastificado (PVC) como todos los de polietileno (PE) en todas sus presentaciones de baja densidad (LDPE), mediana densidad (MDPE) y de alta densidad (HDPE).

PRESIONES

- **Presión nominal (P_n):** Se determina mediante el diseño de la instalación y es un número convencional que coincide con la presión máxima de trabajo a 20 °C.
- **Presión de trabajo (P_t):** Es el valor de la presión interna máxima para la que se ha diseñado un tubo con un determinado coeficiente de seguridad que tiene en cuenta las fluctuaciones de los parámetros que se pueden producir normalmente durante su uso continuado de 50 años.
- **Esfuerzo tangencial de trabajo (σ_t):** Es el esfuerzo máximo admisible que se puede aplicar en cada momento a una tubería sometida a presión, para que al cabo de 50 años mantenga el coeficiente de seguridad que ha servido para el cálculo de la presión nominal.
- **Serie es la relación entre σ_t y P_n .**
- **Espesor nominal del tubo (e):** Es el que se obtiene usando la ecuación del tubo siguiente:

$$e = \frac{P_n - D_n}{2\sigma_t + P_n} \quad (\text{A.1})$$

donde:

- P_n presión nominal, en MPa.
- σ_t esfuerzo tangencial de trabajo. a 20 °C, expresado en MPa.
- e espesor de la pared del tubo en mm.
- D_n diámetro nominal del tubo en mm.

TUBOS PVC (POLICLORURO DE VINILO NO PLASTIFICADO)

TUBOS DE PVC

Son tubos de plástico rígido fabricados a partir de una materia prima compuesta esencialmente de resina sintética de PVC, mezclada con la proporción mínima indispensable de aditivos colorantes, estabilizantes y lubricantes y, en todo caso, exenta de plastificantes y de materiales de relleno. En la terminología industrial se denominan tubos de PVC no plastificados o simplemente PVC.

CARACTERÍSTICAS GENERALES, GEOMÉTRICAS, TÉRMICAS Y QUÍMICAS DEL PVC

El policloruro de vinilo no plastificado, después de su conversión en tubos o accesorios acabados, cumple las características técnicas que se establecen a continuación:

Características generales

- Peso específico: 1350 a 1460 kg/m³.
- Opacidad: < 0.2%.
- Inflamabilidad: No debe ser combustible.
- Los tubos deben ser sensiblemente rectos y cilíndricos, exterior e interiormente. Su acabado es pulido y brillante, con coloración uniforme y tonalidad opaca que evite la penetración de la luz exterior.
- No deben presentar ondulaciones, estrías, grietas, burbujas, ni otros defectos que puedan perjudicar su normal utilización, tanto en la superficie exterior como en la interior o en una sección transversal.
- Los extremos están cortados ortogonalmente a las generatrices.
- Los tubos podrán ser trabajados mecánicamente (cortados, taladrados, fresados, etcétera).

Características geométricas

- Longitud: La longitud del tubo es la distancia entre los extremos del mismo medida a 23 ± 2 °C.
- Diámetro nominal. Es el diámetro exterior definido por el fabricante, a partir del cual se establecen las tolerancias y sirve de referencia para designar y clasificar, por medidas, los diversos elementos de una conducción acoplables entre sí.
- Factor de corrección aplicable a la presión nominal para obtener la presión de trabajo e igual a 0.8 para temperaturas entre 25 a 35 °C y 0.63 para temperaturas entre 35 a 45 °C.

Características mecánicas

- Esfuerzo tangencial de trabajo: 10 MPa.
- Resistencia a la tracción mínima: $\sigma_{\min} = 49$ MPa.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 80%.

Características químicas

- Debe presentar resistencia a la acetona y al ácido sulfúrico.

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL PVC

El pulimento y la uniformidad de la superficie cilíndrica interior de los tubos y juntas serán tales que podrán aplicarse para el cálculo de los distintos parámetros hidráulicos, ecuaciones para tubos lisos, como la fórmula de Darcy Weisbach, teniendo en cuenta el correspondiente número de Reynolds (R_e) y con una rugosidad absoluta de 0.02 mm para la tubería (tubos más juntas).

TUBOS DE POLIETILENO (PE)

POLIETILENO (PE) Y POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (HDPE)

Es un plástico derivado del etileno (hidrocarburo gaseoso acíclico no saturado), al que se somete a un proceso de calentamiento y presión que provoca la polimerización. Sus propiedades dependen de su peso molecular, de su densidad y de la distribución estadística de los diferentes pesos moleculares de las macromoléculas.

Los tubos de polietileno son producidos a base de resinas de polietileno y un aditivo de negro de humo que los protege contra la acción de los rayos ultravioleta y, por tanto, aumenta su estabilidad química. Los producidos por extrusión simple contienen un 2.5 a 0.5% en peso de negro de humo, mientras que los obtenidos por extrusión simultánea y múltiple contienen esa proporción de negro de humo sólo en su capa exterior.

CARACTERÍSTICAS GENERALES GEOMÉTRICAS, TÉRMICAS Y QUÍMICAS DE LOS TUBOS DE PE

Los tubos de PE acabados tienen las siguientes características, todas ellas dadas para unas condiciones de ambiente de 20 ± 2 °C de temperatura y $50 \pm 5\%$ de humedad relativa.

Polietileno de baja densidad (LDPE): Densidad de la resina base (polietileno incoloro) menor o igual que 930 kg/m^3 . Son tubos relativamente blandos y flexibles (no rígidos). El esfuerzo tangencial de trabajo a 20 °C será de 3.2 MPa. Su resistencia química es buena, pero al calor es relativamente baja.

- Resistencia mínima a la tracción: 10 MPa.
- Índice de fluidez menor de 1 g/10 min.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 350%.

Polietileno de mediana densidad (MDPE): Densidad de la resina entre 931 a 940 kg/m^3 . Son tubos relativamente menos flexibles, más duros y más resistentes a la temperatura que los de LDPE. El esfuerzo tangencial de trabajo a 20 °C será de 5.0 MPa.

- Su resistencia química es parecida al de LDPE.
- Resistencia mínima a la tracción: 15 MPa.
- Índice de fluidez menor de 0.4 g/10 min.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 350%.

Polietileno de alta densidad (HDPE): Densidad de la resina base superior a 940 kg/m³. Son tubos relativamente rígidos y duros. Tienen la máxima resistencia a la temperatura y a los agentes químicos. El esfuerzo tangencial de trabajo a 20 °C es de 7.0 MPa aproximadamente.

- Resistencia mínima a la tracción: 19 MPa.
- Índice de fluidez menor de 0.3 g/10 min.
- Alargamiento mínimo en la rotura: 350%.

Diámetro nominal: El diámetro nominal es un número convencional de designación, que sirve para clasificar por dimensiones los tubos, piezas y demás elementos de las conducciones y corresponde al diámetro exterior teórico, sin tener en cuenta las tolerancias.

CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS

El pulimento y la uniformidad de la superficie cilíndrica interior de los tubos y juntas serán tales que podrán aplicarse para el cálculo de los distintos parámetros hidráulicos, ecuaciones para tubos lisos, como la de Darcy Weisbach, con una rugosidad absoluta para la tubería de 0.02 mm (tubos más juntas).

JUNTAS

Son los sistemas o conjuntos de piezas utilizados para la unión de tubos entre sí y de estos con las demás piezas de la conducción. Tendrán, como mínimo, las mismas características de resistencia a las presiones hidráulicas interiores que los tubos que unen.

JUNTAS PARA TUBOS DE PVC

Se consideran dos sistemas para asegurar la estanqueidad (en tendiendo por estanqueidad en una red, a la condición en la cual no se presentan fugas o filtraciones de agua a través de sus uniones), y la resistencia mecánica en los acoplamientos de los tubos entre sí y con las piezas especiales; la unión con un pegado y la unión mediante anillos de elastómeros.

La elección de uno u otro sistema se realizará en función de la instalación proyectada y dentro de las limitaciones y condiciones de utilización de cada una.

Cualquiera que sea el tipo de junta que se adopte, deberá verificarse que en las pruebas de rotura a presión, los tubos se deberán romper antes que la junta.

En ocasiones pueden roscarse para poderlas unir a las piezas especiales.

JUNTAS POR AJUSTE A PRESIÓN.

Este tipo de junta exige que uno de los extremos del tubo termine en una copa preformada en fábrica, cuya longitud y diámetro interior deben cumplir valores máximos.

El ajuste se realiza entre la superficie exterior del extremo macho y la interior de la copa, utilizando un adhesivo disolvente del PVC no plastificado, de modo que se consiga

una auténtica soldadura en frío. Este tipo de junta se utiliza preferentemente para la unión de los tubos con las piezas especiales, pero, en general, no es admisible para la unión de tubos de diámetro nominal superior a 150 mm

JUNTAS ELÁSTICAS

Este sistema de junta garantiza, en general, una estanqueidad mejor que la anterior, y permite un ligero juego en las uniones de la conducción, que permite absorber variaciones de trazado de una cierta amplitud. Por otra parte, las uniones son más sencillas y rápidas de realizar que por el sistema anterior.

Este tipo de junta exige que uno de los extremos del tubo sea expandido y moldeado en fábrica, con un cavidad circular en su interior, en el cual se aloja un anillo elastomérico de tal manera que éste forme parte intrínseca del tubo. El extremo macho del tubo debe ir biselado con un ángulo de 15°, pero que solamente afecte a la mitad del espesor de la pared del tubo.

Las uniones por junta elástica deben preferirse en las instalaciones subterráneas de conducciones a presión.

JUNTAS PARA TUBOS DE PE, MDPE Y HDPE.

Deben soportar la corrosión y las influencias climáticas. Se debe tener en cuenta que, en general, en las tuberías de PE el roscado o pegado no es admisible. Las más utilizadas en instalaciones de riego por goteo son las juntas mecánicas.

ACCESORIOS HIDRÁULICOS MÁS COMUNES (PIEZAS ESPECIALES)

Se denominan piezas especiales a aquellos elementos que se intercalan en la conducción para permitir realizar cambios de dirección, derivaciones, reducciones, cierres de la vena líquida, etc. Entre ellas, las de uso más generalizado son:

- **Válvulas:** Son dispositivos que permiten estrangular e interrumpir la corriente líquida. También se denominan llaves de paso o válvulas de regulación. Cuando se desea estrangular la corriente líquida o reducir presión se utilizan válvulas de compuerta o de mariposa. Cuando sólo se desea abrir o cerrar el paso de agua, además de las anteriores, se usan también las de esfera, en estas últimas, son muy eficaces en cuanto a la estanqueidad. Otros tipos de válvulas son las de Y y las de diafragma que son de cierre progresivo y de difícil taponamiento, incluso en presencia de contaminantes.
- **Válvulas de admisión y expulsión de aire (VAES) o Ventosas:** Son dispositivos que permiten la salida o entrada del aire en las tuberías según sea el desequilibrio existente entre la presión interior y la atmosférica. Existen de salida de aire cuando la instalación está en funcionamiento, las de salida y entrada de aire en el llenado y vaciado de las tuberías y las que son una combinación de ambas.
- **Válvula de retención:** Es un dispositivo, que en su forma más simple, consiste en una compuerta giratoria, que se abre con el movimiento del líquido y cierra por gravedad o por efecto del mismo líquido, impidiendo el retroceso del mismo. Es imprescindible su instalación, antes del punto de inyección de fertilizantes, cuando el agua utilizada para riego proviene de una red que se use, además, para consumo doméstico o pecuario.

- **Válvula de seguridad:** Es un dispositivo que permite automáticamente el escape de un caudal de líquido, para evitar el aumento de la presión interna en la tubería, sobre un valor prefijado.
- **Hidrante:** Es un dispositivo constituido por una válvula de regulación que permite derivar el agua de la tubería sobre la que se inserta

Todas las piezas especiales a usar en tuberías de PVC y la variedades de PE han de tener una resistencia mínima a la presión interna, igual a la del tubo al que se conecten y han de estar dotadas de adaptadores y juntas adecuadas para su conexión.

ELEMENTOS SINGULARES

Las instalaciones de Riego por Goteo pueden incluir elementos, instrumentos o piezas no usuales en otros sistemas de riego. Entre ellos se pueden mencionar: Filtros, aplicadores de abonos, aparatos de control y de automatización, etc.

COLLAR DE TOMA DE ENLACE PARA LOS LATERALES

Esta es la pieza que conecta la línea lateral o portaemisores a la tubería abastecedora o terciaria. Si esta tubería terciaria es de PE flexible, el collar se instala perforándola e introduciendo en el hueco el extremo del enlace que va en ese lugar y el otro en la línea lateral, tal como se muestra en la Figura A.1.

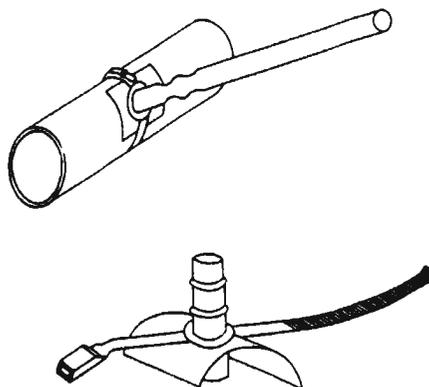


Figura A.1. Collar de toma para interconexión entre líneas terciarias y laterales.

Si la tubería terciaria es de PVC, PE o HDPE, la instalación es menos sencilla, pues la unión directa con el collar no es hermética y se hace necesario utilizar un anillo de goma. Por el contrario, en PE flexible, la manguera cede bastante y como el diámetro del sacabocados, que se utiliza para realizar el orificio, es menor que el de collar, una vez introducido, éste, queda cerrada perfectamente la unión. Los modelos más sólidos vienen provistos de una placa curvada y una abrazadera que refuerza la unión con la tubería terciaria y evita el movimiento independiente de ambas piezas, lo que podría provocar posteriores holguras y fugas de agua (Figura A.1).

La pérdida de carga que producen estos collares se puede descomponer en dos. La primera pérdida originada en la tubería terciaria y que dependerá de la relación entre el tamaño de la conexión del collar que queda introducida dentro de la tubería y el diámetro de la misma. Estas pérdidas de carga, son similares a las que se producen en las tuberías laterales por la conexión de los emisores sobre línea. Y la segunda corresponde a la pérdida en la propia línea lateral, al pasar el agua desde la tubería terciaria por dicho enlace.

Tapón Final o Cierre de las Líneas Laterales

Se han desarrollado infinidad de tipos de cierre del final de las tuberías laterales o líneas portaemisores. Se trata, en general, de tapones, que se introducen a presión. Normalmente no utilizan piezas especiales para ese fin, sino que se hace un simple doblez en la tubería de PE, que se mantiene plegado mediante un anillo de PE cortado de un tubo de mayor diámetro, o varios dobleces, si se trata de tubería muy fina, como en el caso de algunas tuberías emisoras.

VÁLVULA DE DESCARGA O DE DRENAJE

Es un dispositivo que se usa frecuentemente en instalaciones de riego por goteo, que permite, una vez finalizado el riego, desaguar las tuberías del sistema, fundamentalmente las líneas laterales o portaemisores. Con esto, se evita el desarrollo en el interior de las mismas de mucilagos de bacterias, algas o precipitados químicos. Estas válvulas permanecen cerradas cuando la red está en funcionamiento y al terminarse el riego y, por tanto, al perder la red presión, se abren. El proceso contrario ocurre al iniciarse de nuevo el riego.

Hay tipos en los que el mecanismo de apertura y cierre es un simple resorte y en otros son dos diafragmas con orificio, contruidos de material flexible y con un anillo entre ellos. Dichos diafragmas se colocan de forma que los orificios no coincidan. En ambos casos, la presión de la red mantiene cerrada la salida.

En un tipo (de mecanismos de apertura y cierre), mediante el resorte, y en el otro, manteniendo a los dos diafragmas unidos. En cuanto se disipa la presión al finalizar el riego, actúa el resorte o se separan los diafragmas, abriéndose la válvula. La presión a que actúa el mecanismo dependerá del tipo de resorte o del espesor o característica elástica de los diafragmas. En su colocación deberá tenerse muy en cuenta en que el caudal que son capaces de desaguar a baja presión, sea inferior al del lateral al que van conectados, ya que, en caso contrario, no podría alcanzarse la presión de trabajo y no se llegarían a cerrar.

Pruebas y Tolerancias

Como control de calidad de los materiales descritos, se les somete a una serie de pruebas y ensayos que afectan no sólo al producto acabado, sino a las materias primas.

Los ensayos o pruebas para las materias primas dependen fundamentalmente de la composición de las mismas, se realizan en fábrica y tienden a comprobar la uniformidad de las características de los compuestos y mezclas y si cumplen las especificaciones requeridas; por ejemplo, para las variedades de PE's se comprueba la

densidad, índice de fluidez, contenido de volátiles y cenizas, y para la resina de PVC, el contenido de agua, peso específico, densidad aparente, granulometría, etc.

PRUEBAS EN CAMPO

Una vez colocadas las tuberías, las piezas especiales y los accesorios, y antes del cierre de zanjas, si las hubiera, se procede a probar la instalación.

PRUEBA A PRESIÓN INTERIOR

Esta prueba puede realizarse para toda la red o por tramos. La presión de prueba será $0.75 P_n$. Si hay diferentes presiones normalizadas, se probará por tramos con tubos de igual sollicitación hidráulica. Se verifica que exista continuidad hidráulica en el tramo de prueba. La presión se controlará de forma tal que en ningún punto de la tubería existan valores inferiores a $0.68P_n$. El control se hace mediante uno o varios manómetros calibrados.

La instalación se empezará a llenar de agua lentamente con una velocidad que no exceda los 0.3 m/s. Se tendrá especial cuidado en que no quede aire atrapado en la instalación.

Seguidamente se procede subir la presión en el tubo a una tasa de cambio de presión inferior a 0.1 MPa por minuto. Alcanzada la presión de prueba, se cortará la entrada de agua. Se mantendrá la tubería en esa situación durante 15 minutos. La prueba se considerará satisfactoria cuando el manómetro no muestra un descenso superior a:

$$\sqrt{0.075P_n} \quad (\text{A.2})$$

Si el descenso es superior, se deben corregir las pérdidas de agua hasta conseguir que la prueba sea satisfactoria.

PRUEBA DE ESTANQUEIDAD

Esta prueba debe realizarse para la red completa someténdola a la máxima presión estática previsible. Si por alguna causa justificada no fuese posible hacer esta prueba completa se probará por tramos, a la mayor de las presiones siguientes:

- Máxima presión estática prevista en el tramo.
- $P_n/2$.

La prueba se realizará para la tubería o tramos de tubería en orden de servicio con todos sus elementos.

Llena y purgada la tubería, como en la prueba anterior, se elevará la presión lentamente inyectando agua hasta alcanzar la presión de prueba. Se anotará el tiempo, y se comenzará a medir el agua que es necesario continuar inyectando para conseguir que la presión se mantenga durante la prueba. La duración de la prueba de estanqueidad será de treinta minutos y la pérdida de agua en este tiempo no debe superar:

$$V = 0.12 \sum L_i D_i \quad (\text{A.3})$$

siendo:

- V cantidad de agua inyectada en litros.
- L_i longitud del tramo i en metros.
- D_i diámetro interior de la tubería en el tramo i en metros.

Si existen fugas, aunque no se superen las pérdidas admisibles, deberán ser corregidas para lograr la mayor estanqueidad. Si se superan las pérdidas admisibles, obligatoriamente se investigarán las causas, se corregirán y se repetirá la prueba hasta lograr los valores recomendados.

ENSAYOS ESPECÍFICOS PARA TUBERÍAS DE PE EN RIEGOS POR GOTEO

Como se ha mencionado anteriormente, las conexiones de muchas piezas especiales, de más uso en las instalaciones de riego por goteo, al trabajar a baja presión, consisten en unos dispositivos interiores provistos de varios salientes concéntricos. Este tipo de juntas someten a la tubería a un esfuerzo de rotura, debido a esfuerzos multiaxiales ejercidos continuamente por cada saliente, que de hecho suponen un aumento del diámetro de la tubería (Figura A.2). En consecuencia, aparecen roturas longitudinales que pueden progresar a lo largo de toda la longitud de la pieza insertada, rompiéndose, por tanto, la junta. Estas roturas pueden aparecer rápidamente o meses después de realizada la instalación, dependiendo mucho de las condiciones ambientales.

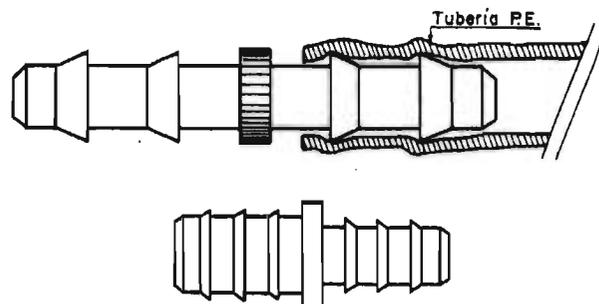


Figura A.2. Juntas para tuberías de PE, enlace interior simple (arriba) y con enlace reductor (abajo).

De forma similar, aunque de menor importancia práctica, suelen aparecer roturas en los extremos de tuberías en los que se ha sustituido la instalación de un tapón final por un simple doblez. Debido a su experiencia, la firma Plasto Gvat de Israel ha propuesto una nueva prueba para estimar la susceptibilidad de las tuberías de PE a este fenómeno.

El procedimiento resumido es el siguiente: Las muestras consisten en cinco trozos de tubería, de longitud igual a unas 20 veces el diámetro, doblados por ambos extremos, en forma de U, en dos planos diferentes, perpendiculares entre sí (Figura A.3). Cada doblez debe ser forzado al límite hasta que a ambos lados del mismo los tubos permanezcan en contacto y paralelos entre sí, amarrándoles para que permanezcan sujetos durante la prueba.

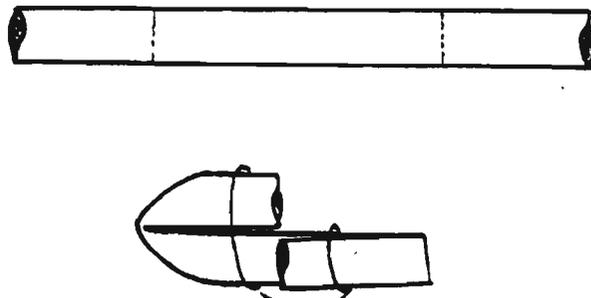


Figura A.3. Ensayo a los pliegues de la tubería, propuesto por Plasto Gvat.

En cada doblez se aplica una sustancia tensoactiva del tipo nonil-fenoxi poli (etilenoxi) etanol. Las piezas así tratadas se colocan en una estufa con circulación forzada de aire a temperatura de 50 ± 3 °C, durante 30 minutos. Como alternativa puede usarse un baño de temperatura constante, en el que las piezas permanezcan sumergidas en el reactivo durante 30 minutos a 50 ± 3 °C.

A continuación se someten las piezas a una cuidadosa inspección visual, para comprobar si se han producido grietas (cada extremo de la pieza constituye una muestra independiente). Si sólo se presenta un fallo en los diez extremos, deberá repetirse la prueba con nuevas muestras. Si el anterior es al menos el 10% la tubería ha pasado satisfactoriamente la prueba.

BIBLIOGRAFÍA

Bagarello, V., Ferro, V., and Pumo, D. (1995), "**Experimental Study on Flow-Resistance Law for Small-Diameter Plastic Pipes**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 121(5), 313-316.

Bagarello, V., Ferro, V., and Pumo, D. (1995), "**Evaluating Pressure Losses in Drip-Irrigation Lines**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 123(1), 1-7.

Benami, A. and Ofen A., (1984), "**Irrigation Engineering**", Technion Israel Institute of Technology, Haifa, Israel.

Bernuth, R. D. and Tonya, Wilson. (1989), "**Friction Factor for Small Diameter Plastic Pipes**", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 115(2), 183-192.

Warrick, A. W. and Yitayew, M. (1988), "**Trickle lateral hydraulics. II: Design and Examples**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 114(2), 289-300.

Scaloppi, Edmar J. and Allen, Richard G. (1993), "**Hydraulics of Irrigation Laterals: Comparative Analysis**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 119(1), 91-115.

Bravo G.A., Veréstegui J. y Rumayor A., (1990), "**Resultados de los Sistemas de Riego Presurizado en Vid y en Manzano, en Zacatecas**", Memorias XI Congreso Nacional de Hidráulica, Tomo I, Zacatecas.

Biswas, Asit K., (1996), "**Agua Para el Mundo en Desarrollo en el Siglo XXI: Temas e Implicaciones**", *Ingeniería Hidráulica en México*, IMTA, Vol. XI, Num.3, 5-11.

B. Teltsch, Y. Azar, M. Juanico y G. Shelef (1992), "**Plankton Community Changes Due to Addition of Treated Effluents to a Freshwater Reservoir Used for Drip Irrigation**", *Water Research*, Elsevier Science, Pergamon, Vol 26, N° 5, 657-668.

Comunicación via Internet con el **Dr. Soichi Nishiyama**, Faculty of Agriculture, Kagawa University, Miki-Cho, Kagawa-Ken 761-07, Japan; e-mail: <kang@ag.kagawa-u.ac.jp>.

Chen, H., Nishiyama, S. and Kang, Y., (1996), "**Design of Microirrigation Laterals on Nonuniform Slopes**", *Irrigation Science*, Springer-Verlogo, 17, 3-14.

Ch. Rar - Acha, M. Kummel, I. Salamun and A. Adin (1995), "**The Effect of Chemical Oxidants on Effluent Constituents for Drip Irrigation**", *Water Research*, Elsevier Science, Pergamon, Vol 29, N° 1, 119-129.

Echávez, A. Gabriel y Ortiz, N. Luis Alfonso et al., (1997), "**Riego Presurizado de Baja Carga (Informe Final)**", FIRCO-UAL, México.

Gilaa, Y. (1978), "**The Use of Flow and Pressure regulators Irrigation System**", Proceedings of International Agric. Plastics Congress, California, U.S.A, 118-123p.

Hathoot, Helmi M., Al-Amoud, Ahmed I. and Mohammand, Fawzi S. (1993), "**Analysis and Design of Trickle-Irrigation Laterals**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 119(5), 756-767.

Kang, Yaohu. and Nishiyama, Soichi. (1996), "**Analysis and Desing of Microirrigation Laterals**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 122(2), 75-82.

Kang, Yaohu. and Nishiyama, Soichi, (1995), "**A Simple Method of Designing Uniform - Water - Application Drip Irrigation System**", *Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, JSIDRE, 176, 153-161.

Kang, Yaohu. and Nishiyama, Soichi. (1996), "**Desing of Microirrigation Submain Units**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 122(2), 83-89.

Kang, Yaohu., Nishiyama, Soichi. and Kawano, Hiroshi, (1996), "**Design of Microirrigation Sabmain Units Using the Lateral Discharge Equation**", *Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, JSIDRE, 182, 241-252.

Kang, Yaohu., Nishiyama, Soichi. and Kawano, Hiroshi, (1994), "**Finete Element Method Analysis of Microirrigation System Pressure Distribution**", *Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*, JSIDRE, 1169, 19-26.

Kang, Yaohu. and Nishiyama, Soichi. (1995), "**Hydraulic Analysis of Microirrigation Submain Units**", *Transactions of ASAE*, Vol. 38 N°5, 1377-1384.

Kang, Yaohu. and Nishiyama, Soichi. (1996), "**Analysis of Microirrigation Systems Using a Lateral Discharge Equation**", *Transactions of ASAE*, Vol. 39 N°3, 921-929.

Kamand, F. Z. (1988), "**Hydraulic Friction Factor for Pipe Flow**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 114(2), 311-323.

Kawano, H., Kang, Y. and Nishiyama, S. (1995), "**Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources, Preserving the Environmnt**", *Proceedings of Fith International Microirrigation Congress*, ASAE, 84-90.

López, J. Rodrigo., Hernández, J. M., Pérez, R. A. y González, J. F. (1992), "**Riego localizado**", Centro Nacional de Tecnología de Regadíos (CENTER), Ed. Mundi-Prensa, Madrid, España.

Merian, J. L. and Keller. (1978), "**Farmirrigation system evolution: A Guide for Management**", Third Edition, Utah State University, Utah U.S.A.

- Miller, Donald S., (1978), "**Internal Flow Systems**", *BHRA Fluid Engineering Series Vol 5*, 13-20, 129-158.
- Mott, Robert L., (1996), "**Applied Fluid Mechanics**", 4th edition Prentice - Hall Inc. 237-257.
- Panton R.L., (1984), "**Incompressible Flow**", John Wiley & Sons, New York.
- Scaloppi, Edmar J. and Allen, Richard G. (1993), "**Hydraulics of Irrigation Laterals: Comparative Analysis**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 119(1), 91-115.
- Solomon, K. H. (1985), "**Global Uniformity of Trickle Irrigation System**", ASAE. Transaction, Vol. 28, N° 4, U.S.A. 1151-1158.
- Streeter, V. L. y Wylie, E. B. (1994), "**Mecánica de los Fluidos**", Octava edición, Mc Graw Hill, México, 219-234.
- Swamee, Prabhata K. and Jain, Akalank K. (1976), "**Explicit Equations for Pipe Flow Problems**", *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, HY5, 657-664.
- Tarjuelo, J. M., P. Carrión, M. Valiente (1996), "**Automatización de los Sistemas de Riego**", *Riego y Drenaje*, U. de Castilla, La Mancha, XXI/77, 9-15.
- Taylor, H. D., Bastos, R. K. X., et al (1995), "**Drip Irrigation With Waste stabilisation Pond Effluents: Solving the Problem of Emitter Fouling**", *Water Research*, Elsevier Science, Pergamon, Vol 31, N° 12, 417-424.
- U.S. Departamento de Agricultura, Servicio de Conservación de Suelos (1972), "**Riego por Aspersión**", Manual de Ingeniería de Suelos, sección 15: Riego; Diana, México, 102 p.
- Warrick, A. W. and Yitayew, M. (1988), "**Trickle lateral hydraulics. I: Analytical Solution**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 114(2), 281-288.
- Wu, I. P. and Gitlin, H. M. (1977), "**Design of Drip Irrigation Submain**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 103(2), 231-243.
- Wu, I.P., and H. M. Gitlin (1975), "**Energy Gradient Line for Drip Irrigation Laterals**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 101(4), 321-326.
- Zur, B and Tal, S. (1981), "**Emitter Discharge Sensitivity to pressure and temperature**", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASAE, 107, 1-9.