

$H_t = \frac{10.29C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{Kq}{2gA^2} \left| \bar{q}^2 N^3 \text{ CSM} \right.$
**DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO
CON PROGRAMA DE CÓMPUTO**

$H_t =$

M. C. Abel Román López³
Ing. Segundo F. Mendoza Moreno
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
M. C. Leopoldo Moreno Díaz

$N = \frac{H_t}{\frac{10.29C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{Kq}{2gA^2} \left| \bar{q}^2 \text{ CSM} \right.}$

ISBN: 978-970-43-0152-1

Folleto Científico 22

DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO PRESURIZADO CON PROGRAMA DE CÓMPUTO

**M. C. Abel Román López
Ing. Segundo F. Mendoza Moreno
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
M. C. Leopoldo Moreno Díaz**

**CENID-RASPA
2007**

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.

Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: inifap.gomez@internetual.com.mx

El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los autores, al CENID-RASPA y al INIFAP.

ISBN: 978-970-43-0152-1

Contenido

INTRODUCCION	1
Aspectos generales	2
Aspectos básicos de hidráulica en sistemas de riego a presión	6
Emisores	6
Líneas regantes y distribuidores (unidad de riego)	8
Diseño hidráulico de sistemas de riego a presión	9
Información previa	9
Procedimiento de diseño	13
Diseño de la tubería de conducción	19
Ejemplo de diseño de un sistema de riego por goteo en una huerta de nogal pecanero	22
Procedimiento de cálculo	23
Cálculo hidráulico	25
Unidad de riego	26
Selección del cabezal de control	30
Unidad óptima de riego presurizado	36
Programa de cómputo aplicado al cálculo hidráulico	39
Ejemplo numérico manual utilizando los datos del programa computacional	42
Uso del programa de cómputo para goteros individuales utilizando el subprograma "Área óptima de riego"	45
LITERATURA CITADA	49

Presentación

Los sistemas modernos de riego con tecnología de punta deben involucrar el manejo eficiente del agua de riego en coordinación con el usuario y otros insumos esenciales como energía, maquinaria, fertilizantes y prácticas de manejo que conlleven al incremento de la productividad de los cultivos. La selección del método adecuado de riego que se ajuste a cualquier combinación de condiciones físicas y socioeconómicas involucra consideraciones complejas. Así, donde existe carencia de capital, el objetivo será adecuar un método de riego que no involucre gran inversión; por otro lado, donde la limitante es agua, el objetivo obvio es incrementar la eficiencia de transformación de este insumo. También, la disponibilidad de energía y mano de obra juegan un papel preponderante en la selección del método de riego.

En este contexto, en las regiones áridas y semiáridas de México, la disponibilidad de agua es el factor que mayormente limita el desarrollo de la agricultura moderna. Es aquí en donde los sistemas de riego presurizado adquieren su mayor ventaja; sin embargo, el diseño apropiado de estos es la esencia del buen funcionamiento y operatividad del equipamiento. En la segunda versión de este folleto se ponen a disposición de técnicos, investigadores, productores y usuarios del riego en general, los fundamentos de diseño de sistemas de riego presurizado. Se presentan las ecuaciones básicas de hidráulica de tuberías, así como algunas relaciones funcionales, adecuaciones e información generada en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) y su antecesor, el Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego (CENAMAR). En esta nueva versión, además de la corrección realizada se le agregó un programa de cómputo que facilita el cálculo de los procedimientos del funcionamiento hidráulico. El propósito del presente programa es minimizar los errores de cálculo y lograr una mayor utilización de la tecnología al simplificar el diseño.

Para una mejor comprensión del folleto y del programa de cómputo, se presentan diferentes ejemplos de diseño que involucra lo anteriormente expuesto.

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director del CENID RASPA

INTRODUCCIÓN

La restricción del agua para riego cada vez se torna más crítica sobre todo en las zonas desérticas y semidesérticas del país, donde se cultiva la mayor producción de alimentos. Por lo anterior, en estas regiones se han desarrollado alternativas de riego que permitan aplicar el agua a los cultivos en forma más eficiente. Una de estas alternativas es el uso de sistemas de riego a presión, también conocidos como sistemas de riego presurizados o sistemas de riego por conductos cerrados.

A diferencia de los métodos tradicionales de riego en los que la aplicación está gobernada por la acción de la gravedad, en los sistemas de riego presurizados el agua se aplica por medio de tuberías donde el fluido circula a una presión mayor que la presión atmosférica. Esto permite que el riego se realice con mayor eficiencia en varios sentidos. Primero porque se controla con precisión la cantidad de agua por aplicar a lo largo del terreno y, en consecuencia, se reducen las pérdidas de volúmenes que no son utilizados por los cultivos. Segundo, es posible aplicar de manera eficiente y continua los fertilizantes necesarios en cada una de las etapas del ciclo del cultivo. Tercero, se reduce el uso de mano de obra especialmente en sistemas automatizados y semiautomatizados.

No obstante, debe señalarse que los altos costos iniciales de inversión y de mantenimiento de estos sistemas de riego, pueden representar un obstáculo para la adquisición de los mismos, por ello su uso está limitado a aquellas condiciones donde la rentabilidad de los cultivos garantiza la amortización de los costos.

En este aspecto es de crucial importancia el diseño adecuado de los sistemas. Aunque cada sistema de riego sigue procedimientos específicos para el diseño de algunos de sus componentes, existen criterios generales y fundamentales que alcanzan un amplio rango de generalización, mismos que se presentan en este folleto y que en la nueva versión se hace uso de un programa de cómputo para agilizar y

reducir errores de cálculo. Para ello se ha enfocado la atención al diseño de un sistema de riego por goteo sobre una huerta de nogal pecanero y otro en chile jalapeño tipo cintilla, ya que ambos casos son representativos de los sistemas de producción intensiva de las áreas de riego del país.

Aspectos generales

El paradigma de los sistemas de riego presurizado es, además de incrementar la eficiencia de transformación del agua-producto, minimizar la posibilidad de daño al cultivo por escasez de agua y nutrientes. En los sistemas de riego presurizado el agua y los nutrientes se suministran al cultivo en pequeñas cantidades pero en forma periódica con el fin de incrementar la relación beneficio costo.

En el Cuadro 1 se muestran las cantidades de agua necesarias para la obtención de diversos productos. Se observa que la eficiencia de aplicación del agua de riego juega un papel preponderante, de ahí la importancia de la tecnificación del riego y el adecuado diseño de éste.

Al seleccionar un sistema de riego se debe conocer la eficiencia factible de alcanzar para la proyección adecuada de la operación y costeo del sistema (tiempos de riego y volúmenes por aplicar). La Figura 1 muestra eficiencias de aplicación del agua para algunos sistemas de riego comunes.

En la Figura 1, la línea de demanda señala la cantidad de agua que requiere un cultivo (evapotranspiración), y la proporción del área de los recuadros por arriba de dicha línea la cantidad de agua adicional que se debe aplicar por concepto de la eficiencia del sistema de riego. Su valor promedio se encuentra entre paréntesis

Cuadro 1. Eficiencias de transformación agua–producto de algunos bienes de consumo.

Producto	Agua necesaria para su producción (L)
1 Naranja	350-416
1 Huevo	454-568
1 Pieza de pan	1,135
1 Litro de leche	500-3,500
1 Kilo de carne	26,500
1 Hamburguesa con papas	5,667
1 Pantalón de algodón	6,813
1 Camisa de algodón	1,514
El acero de un carro	121,120
El acero de una bicicleta de 13 kg de peso	1,816

Fuente: World Water Resources Institute, 1993.

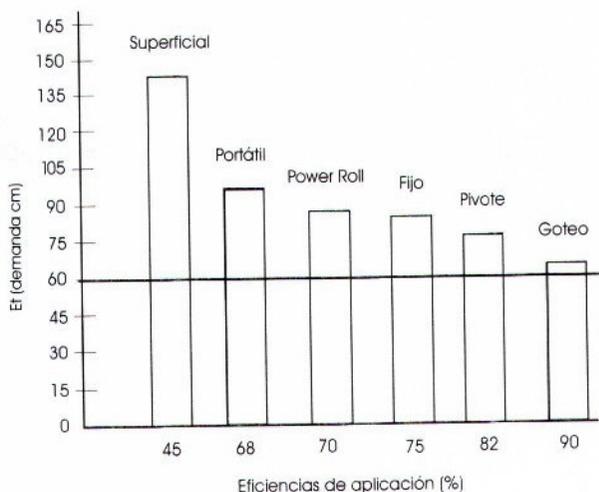


Figura 1. Cantidades adicionales de agua que habría que aplicar por concepto de la eficiencia de aplicación (Sánchez, 2004).

La investigación en el ámbito de la ingeniería del aprovechamiento del agua ha mostrado también que las eficiencias de transformación (comúnmente como productividad del agua de riego) pueden mejorarse sustancialmente al considerar el incremento en las eficiencias de aplicación del agua de riego sin olvidar las buenas prácticas de manejo del cultivo (Sánchez, 2004). En este sentido, si en sistemas de riego tradicionales se observa el trazo y receta de riego (cuánto, cómo y cuándo regar), se pueden alcanzar eficiencias mayores del 45 por ciento que señala la Figura 1.

El Cuadro 2 presenta las eficiencias de transformación alcanzables en distritos de riego al pasar de sistemas tradicionales (rodado) a riego tecnificado.

La investigación dentro de la ingeniería de riego tiene aún mucho que desarrollar; por ejemplo los estudios de ingeniería económica del agua con el objetivo de optimizar la productividad de las cantidades restringidas de este elemento en términos de patrones de cultivo que maximicen el ingreso neto. Por otra parte, la competitividad internacional en la globalización de los mercados sugiere la producción de cosechas inocuas y de alta calidad nutritiva, en donde los esquemas de fertirrigación con sistemas avanzados de suministro de agua adquieren relevancia.

Cuadro 2. Eficiencias de transformación potenciales al sustituir los sistemas de riego tradicionales por sistemas tecnificados (Sánchez, 2004).

Cultivo	Productividad del agua de riego en sistemas tradicionales y riego tecnificado														
	Lámina de riego (m)			Rendimiento (t h ⁻¹)			Goteo de riego			Productividad (kg m ⁻³)					
	Dto. de riego	Superficial	Aspersión	Dto. de riego	Superficial	Aspersión	Goteo de riego	Dto. de riego	Superficial	Aspersión	Goteo				
Alfalfa	2.41	1.9	1.7	16*15	22.8	27.2	1.3	16*15	22.8	27.2	32.5	0.67	1.2	1.6	2.5
Maíz forrajero	1.25	1.0	0.6	15.63	25.0	21.7	0.72	15.63	25.0	21.7	30.02	1.25	2.5	3.5	4.17
Maíz grano	1.25	1.0	-	2.0	10.0	-	0.63	2.0	10.0	-	9.01	0.16	1	-	1.43
Chile	1.4	-	-	11.16	-	-	0.89	11.16	-	-	54.29	0.79	-	-	6.1
Melón	0.97	0.6	-	22.5	40.02	-	0.64	22.5	40.02	-	53.95	2.32	6.67	-	8.43
Sandía	0.97	0.8	-	28.13	30.4	-	0.51	28.13	30.4	-	67.83	2.9	3.8	-	13.3
Frijol	0.85	0.52	0.48	0.85	2.08	2.11	-	0.85	2.08	2.11	-	0.1	0.4	0.44	-
Girasol	0.8	0.63	-	1.6	3.97	-	-	1.6	3.97	-	-	0.2	0.63	-	-
Cartamo	0.8	0.53	-	1.12	2.39	-	-	1.12	2.39	-	-	0.14	0.45	-	-
Trigo	0.9	0.72	0.7	3.6	5.98	6.3	-	3.6	5.98	6.3	-	0.4	0.83	0.9	-
Trebol	-	1.2	-	-	14.04	-	-	-	14.04	-	-	-	1.17	-	-
alejandro	1.2	1.2	-	18.0	-	-	0.72	18.0	-	-	99.94	1.5	-	-	13.88
Tomate	1.4	0.58	1.12	1.12	0.75	2.58	-	1.12	0.75	2.58	-	0.08	0.13	0.23	-
Nogal	1.2	0.54	-	13.8	25.38	-	-	13.8	25.38	-	-	1.15	4.7	-	-
Sorgo forrajero	-	-	-	3.96	-	-	0.63	3.96	-	-	5.99	0.33	0.87	-	0.95
Algodón	1.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Notas

- Las láminas de riego en el riego tecnificado se refieren a las láminas usadas al pasar del sistema de riego tradicional al sistema de riego indicado.
- Los rendimientos y láminas de riego en el riego tecnificado son datos de investigación validados en el CENID RASPA y en diferentes distritos de riego del país.
- Es el valor al que puede aspirar el productor.
- Las láminas de riego en los distritos de riego son las que comúnmente aplica el productor tradicional. Los rendimientos pueden variar en función del genotipo utilizado.
- El sistema de riego por goteo que se utiliza es tipo cinta.
- El sistema de riego reportado en aspersión es como sigue: para alfalfa, maíz forrajero, frijol y trigo es tipo lateral con ruedas (power roll), para nogal es microaspersión;
- sin embargo, se estima que al cambiar de tipo de aspersión no afectaría sustancialmente la productividad.

Aspectos básicos de hidráulica en sistemas de riego a presión.

Un sistema de riego a presión se comporta como un conducto cerrado en donde el agua se mueve por el efecto de un gradiente de presión (Gómez, 1974, 1975; Christiansen, 1942). Dicho sistema está integrado por unidades de riego con emisores (goteros, aspersores, microaspersores, etc.), líneas regantes y distribuidores; tubería de conducción y el cabezal de control. En el diseño del sistema es necesario conocer las características de funcionamiento hidráulico de tales componentes para que así se alcance una aplicación y distribución del agua de riego eficiente con menores costos de operación. Una mayor uniformidad mejora la producción, tanto en rendimiento por unidad de superficie como en los parámetros de calidad.

Emisores

Debido a que el diseño hidráulico, operación y mantenimiento de los sistemas de riego a presión dependen de las características de funcionamiento hidráulico de los emisores, estos son la parte fundamental en dichos sistemas de riego. Hidráulicamente se rigen por la función potencial utilizada por décadas (Karmeli y Keller, 1975; Peña *et al.*, 1978; Burt y Stuart, 1994):

$$q = K H^x \quad 1$$

Donde: q representa el gasto del emisor ($L h^{-1}$), K es un coeficiente que depende de la geometría del emisor, H significa la carga hidráulica. La variable H se expresa en metros de columna de agua (m) y x es el exponente que depende del régimen de flujo (adimensional).

Geometría del emisor. Debido a las pequeñas áreas de paso que poseen los emisores, cualquier obstrucción por inserción y/o cambios de temperatura en la misma, hace que el gasto de salida se vea afectado. Este aspecto es importante sobre todo en goteros, microtubo o cintilla, en donde se encuentran áreas de paso de 0.5 a 2

mm². El coeficiente K de la Ecuación (1) depende del área de paso del emisor, a mayor área mayor será su valor; en el Cuadro 3 se muestran valores de K para diferente tipo de emisores.

Régimen de Flujo. Por el tipo de flujo, los emisores se clasifican en laminar, transicional y turbulento, donde el exponente x depende del tipo de flujo. Para los del primer tipo, su valor varía de 0.59 a 0.80, mientras que para los de régimen turbulento, fluctúa entre 0.49 a 0.52. Por el valor de x, los emisores que se muestran en el Cuadro 3 son de flujo turbulento. Cuando el régimen es laminar como en microtubo, la Ecuación 1 se transforma en la expresión 2 (Peña *et al.*, 1978).

$$q = K H^x T^y \quad 2$$

Actualmente los fabricantes de emisores prefieren diseñar aquellos de régimen turbulento, por ser menos afectados en su gasto por cambios de temperatura. Los de flujo transicional no son recomendables porque en ocasiones se pueden comportar como de flujo turbulento y en otras como de flujo laminar. Esta inestabilidad resulta en diseños inapropiados debido a la incertidumbre en el uso de los parámetros de la ecuación de flujo.

Cuadro 3. Parámetros K, x para diferente tipo de emisores.

Emisor	Gasto (L h ⁻¹)	K	x
Gotero	2	0.5962	0.5189
Cintilla	1	0.2669	0.5461
Microaspersión	120-150	21.1661	0.5935
Aspersor	1200-1500	259.6217	0.5016

Líneas regantes y distribuidores (unidad de riego)

En todo sistema de riego la uniformidad en la aplicación del agua depende de la variación existente en la carga de operación, la cual es debida a pérdidas por fricción y localizadas. La sumatoria de las pérdidas por fricción en cada tramo más las localizadas en cada conexión de los emisores corresponde a la pérdida de carga en una línea regante, mientras que en un distribuidor está constituida por las de fricción más las localizadas por conexión de las líneas regantes. Las ecuaciones que gobiernan tales pérdidas han sido citadas en numerosas obras de hidráulica, como las publicadas por DeAzevedo y Acosta (1978) y Russell (1979) en libros clásicos de riego como Hagan *et al.* (1967); Hidalgo (1971); Zimmermann (1970), Israelsen y Hansen (1979); entre otros. Dichas ecuaciones son:

Pérdidas por fricción (Manning):

$$H_f = \frac{10.29 C^2 S \bar{q}^{-2}}{D^{16/3}} \quad 3$$

Donde: H_f es la pérdida de carga por fricción en (m), C el factor de fricción, S es el espaciamiento entre emisores y/o derivaciones de gasto en (m), \bar{q} el gasto medio del emisor ($m^3 s^{-1}$), y D es el diámetro interior del tubo en (m).

Pérdidas Localizadas (DeAzevedo y Acosta, 1978; Sotelo, 1982):

$$H_L = \frac{K_g \bar{q}^{-2}}{2 g A^2} \quad 4$$

Donde: H_L son las pérdidas de presión localizada (m), K_g es el coeficiente de pérdida de carga localizada por conexión del emisor u otro accesorio (valores para accesorios especiales de goteo (Ramírez y Escobar, 1978). \bar{q} representa el gasto medio del emisor ($m^3 s^{-1}$), g significa la aceleración de la gravedad ($m s^{-2}$) y A simboliza el área interior del tubo (m^2).

Considerando que tanto una línea lateral como una distribuidora es un tramo de salidas múltiples, y al combinar las Ecuaciones 3 y 4 con la correspondiente de salidas múltiples se logra la Ecuación 5 (Ramírez *et al.*, 1978), la cual expresa el comportamiento hidráulico de tuberías para calcular la pérdida total de carga (H_t).

$$H_t = \left[\frac{10.29C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{k_g}{2gA^2} \right] \bar{q}^2 \left(\frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \right) \quad 5$$

Donde N es el número de salidas.

Diseño hidráulico de sistemas de riego a presión

Es uno de los factores más importantes a considerar para asegurar el éxito de los mismos. En el pasado se realizaron una gran cantidad de investigaciones con el fin de lograr una mejor selección de las unidades de riego y una mejor uniformidad en la superficie regada.

La uniformidad a considerar en el diseño es aquella que refleja un 90 ó 95 por ciento (Ramírez *et al.*, 1978) en el emisor más y menos beneficiado en términos de volumen en una unidad de riego y/o línea regante, respectivamente. Este diferencial obedece a dos aspectos del diseño, el primero se refiere a la uniformidad la cual se asume que se debe a una variación en gasto en cada emisor y que depende solamente de la carga hidráulica y de la carga por posición. Es aceptable una variación máxima entre los gastos de 10 por ciento; el otro aspecto del diseño se refiere a la variación de la calidad del emisor. En este caso solamente hay que referirse al primero. Lo anterior deberá tener como base el comportamiento hidráulico de tuberías y accesorios, considerado en la Ecuación 5.

Información previa

Antes de iniciar el diseño de un sistema de riego es necesario contar con la siguiente información que será la base para asegurar el

éxito del mismo: plano topográfico, características del suelo y del agua de riego, clima, cultivo e infraestructura disponible (CENAMAR, 1982).

Plano topográfico. Con el fin de iniciar un reconocimiento del terreno en donde se planea ubicar el sistema de riego, es necesario obtener un plano topográfico del mismo en el cual las curvas de nivel se realicen a equidistancias de 50 cm, y además para la obtención de la escala más adecuada del plano topográfico es recomendable lo indicado en el Cuadro 4. También es necesaria la localización de la fuente de abastecimiento del agua de riego.

Cuadro 4. Escala recomendada del plano topográfico según la superficie a irrigar (CENAMAR, 1982).

Superficie (ha)	Escala
hasta 25	1:500
26-50	1:1000
51-250	1:5000
251-500	1:8000

Características del suelo. Son determinantes en las decisiones de manejo que se le dará al cultivo tomando como punto de partida su comportamiento respecto a la aportación y disponibilidad tanto de agua como de nutrimentos y presencia de sales solubles. Dichas características se dividen en físicas y químicas. Las características físicas incluyen la textura, curva de capilaridad y velocidad de infiltración (para calcular el área de influencia del gotero), la capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente, con los cuales se calculará la capacidad de retención de humedad, así como la cantidad de agua por aplicar en cada evento de riego.

Por su parte, las características químicas incluyen al pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, relación de aniones y

caciones, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de sodio intercambiable. Esta información es útil porque a partir de la misma, en conjunto con la del agua de riego y las demandas de nutrimentos del cultivo, se generan las recomendaciones del programa de fertirrigación.

Características del agua de riego. Dentro de las características del agua de riego a considerar están las físicas, las químicas y su disponibilidad. Entre las características físicas sobresale la cantidad de sólidos en suspensión debido a que de ello depende la selección del tipo de emisor y sistema de filtrado para evitar problemas de obstrucciones en la tubería y emisores. Las características químicas abarcan el pH, conductividad eléctrica, relación de aniones y cationes y relación de absorción de sodio. De igual manera que en el suelo, esta información es la base para modificar la solución del suelo, sustento de operación de la fertirrigación. Finalmente, la disponibilidad de agua de riego es la variable más importante debido a que toda la inversión y su amortización dependerán de su disponibilidad en el tiempo.

Clima. Las variables que caracterizan al clima respecto al diseño y operación de los sistemas de riego son: precipitación, temperaturas máxima y mínima del aire, evaporación, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar. Los valores críticos dependen del sistema de riego que se esté proyectando; es fundamental la habilidad del proyectista para estimar unas a partir de otras. Dichas variables en forma diaria deberán de representar el promedio de un período prolongado de tiempo, se sugieren 20 años (Hargreaves y Samani, 1985). Es importante conocer la velocidad y dirección del viento, sobre todo cuando se trata de diseñar riego por aspersión y microaspersión, de la misma manera, la humedad relativa es un factor asociado con la presencia de enfermedades de tipo fungoso que se puedan presentar durante el desarrollo del cultivo.

Aunque en la actualidad predominan los emisores de flujo turbulento, que no son afectados por la temperatura, es importante que al diseñar el sistema se considere esta variable climática ya que puede tener una influencia marcada en otros procesos como el metabolismo vegetal, solubilidad de iones y desarrollo de plagas, entre otros. Los datos de evaporación libre o demanda evaporativa y lluvia efectiva se utilizan normalmente para calcular los requerimientos de riego según la Ecuación 6.

$$V_r = \left[\left(\frac{(CC - Cha) Da Pr}{D_w} \right) - Pe \right] Ae \quad 6$$

Donde: V_r es el volumen de riego (m^3), CC representa la capacidad de campo con base en peso seco, Cha significa el contenido de humedad actual con base en peso seco, Da es la densidad aparente ($g\ cm^{-3}$), D_w simboliza la densidad del agua ($g\ cm^{-3}$), Pr es la profundidad radicular esperada del cultivo (m), Pe representa la precipitación efectiva (m) y Ae el área equivalente (m^2) que corresponde al área de interés por regar. En el caso de hortalizas (goteo) es la que resulta al multiplicar la distancia entre líneas regante y distancia de emisores, mientras que para frutales (microaspersión) se considera según la siguiente clasificación para máxima superficie equivalente; a) árboles de área chica, como dátil, papayo y plátano, de 9 a 12 m^2 ; b) árboles de área mediana, como manzano, durazno, peral, chabacano y cítricos; de 20 a 30 m^2 ; c) árboles de superficie grande, en este grupo están considerados el nogal, olivo, aguacate, higo, mango, tamarindo y similares, con rangos de 40 y 60 m^2 . La edad del árbol es un indicador del área equivalente como se muestra en el Cuadro 5 (Valenzuela, 1971).

Cuadro 5. Porcentaje de área de equivalente según la edad y tipo de árbol (Valenzuela, 1971).

Año	Tipo de Área		
	Chica	Mediana	Grande
1°	33	33	25
2°	66	66	50
3°	100	66	50
4°	-	100	75
5°	-	-	75
6°	-	-	100

Cultivo. Respecto al cultivo por considerar en el diseño, son dos las clases de información necesaria: datos generales y datos de diseño. Dentro de los primeros están la variedad, ciclo vegetativo, edad, tipo de cultivo (anual o perenne) y requerimientos nutricionales. Mientras que dentro de la segunda, están la separación entre plantas, separación entre hileras, si es el caso, profundidad radicular y las constantes de cultivo para el cálculo de la evapotranspiración.

Infraestructura disponible. Se consideran las obras hidráulicas existentes las vías de acceso a la zona de riego, la energía utilizable para seleccionar la motobomba y la disponibilidad en la zona de riego de motor o bombas que pudieran usarse en el sistema. Es necesario conocer las características del equipo existente para adaptar las necesidades de potencia que se requieren para la unidad de riego.

Procedimiento de diseño

Para ejemplificar la aplicación de los principios básicos del diseño de sistemas de riego a presión se procederá de acuerdo a la metodología empleada en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-

RASPA) en un sistema de riego por goteo. El sistema se divide en tres partes: Unidades de riego, integradas por los emisores, líneas regantes y distribuidores; líneas de conducción y cabezal de control.

Diseño de la unidad de riego. El primer paso es seleccionar el emisor o gotero de acuerdo a los criterios siguientes:

- a. Que sea hidráulicamente controlable.
- b. El gasto medio aplicado, que depende de la carga hidráulica.

Los goteros hidráulicamente controlables son los únicos que se deben someter a diseño puesto que con ellos se predice con gran exactitud lo que sucederá una vez instalado y operado el sistema. Como criterio de diseño en los sistemas de riego a presión se acepta una diferencia máxima en gasto entre emisores de 10 por ciento debido a una variación de carga hidráulica de 20 por ciento; esta diferencia se representa de la siguiente forma:

$$\frac{q_f}{q_o} = 0.9 \quad 7$$

Donde: q_f/q_o es el cociente del gasto entre el último y el primer emisor.

De acuerdo a la ecuación del gotero (Ecuación 1) y a la relación de gasto, se llega a lo siguiente:

$$\frac{q_f}{q_o} = \frac{KH_f^x}{KH_o^x} = 0.9 \quad 8$$

Sustituyendo y eliminando términos queda la siguiente ecuación:

$$H_f = (0.9)^{1/x} H_o \quad 9$$

Donde de manera análoga a los gastos, H_f representa la carga en el último gotero y H_o en el primero y la variación de carga referida entre el

primero y último emisor se define por la relación:

$$\Delta H = H_0 - H_f \quad 10$$

Donde: ΔH es la pérdida de carga permitida para obtener la diferencia de carga que se desea dentro de la unidad en m, al sustituir en la Ecuación 9 se obtiene:

$$\Delta H = (1 - 0.9^{1/x}) H_0 \quad 11$$

Donde H_0 es la presión de operación, es decir, la que se debe aplicar al inicio de la unidad para asegurar el gasto medio del emisor que se aplica dentro de ella y se calcula H_0 con la siguiente ecuación (Ramírez *et al.*, 1978):

$$H_0 = \left[\frac{\bar{q}}{k(0.9)^{1/2}} \right]^{1/x} \quad 12$$

k y x se definieron en la Ecuación 1.

Específicamente para el caso de riego por goteo, un porcentaje de la pérdida de carga permisible ΔH se utiliza para la selección del diámetro de la línea regante y el restante se asigna para la selección del diámetro del distribuidor. Las partes fundamentales de una unidad de riego por goteo son las líneas regantes o laterales y la tubería de distribución. Por lo tanto, una buena selección de estos componentes representa el diseño apropiado que es de gran importancia para el óptimo funcionamiento del sistema de riego.

a. Diseño de la línea regante. Se deben considerar tanto las pérdidas de carga por fricción en la tubería como las pérdidas de carga localizadas por salidas o conexiones de los emisores.

Para calcular las pérdidas de carga por fricción (H_f) en la tubería se utiliza la fórmula de Manning que se mostró en la Ecuación 3, pero también se pueden utilizar otras fórmulas como: Darcy-Weisbach o

Hazen-Williams (De Saint, 1975; Pillsburg, 1968; Fry y Gray, 1971). Para las pérdidas de carga localizadas (H_L) se utiliza la fórmula general en función del caudal que se muestra en la Ecuación 4; por lo tanto, la pérdida de carga total (H_t) en la línea regante se obtiene con la Ecuación 5, la cual puede reducirse con fines más prácticos a la expresión 10 (Ramírez *et al.*, 1978):

$$H_t = \left[\frac{10.29C^2S}{D^{16/3}} + \frac{k_g}{2gA^2} \right] \bar{q}^2 \sum_{i=1}^N i^2 \quad 13$$

Donde: N es el número total de emisores en la línea regante; la resolución de la sumatoria puede resolverse con la siguiente igualdad:

$$\sum_{i=1}^N i^2 = \frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \quad 14$$

El resultado de la sumatoria se sustituye en la Ecuación 13, por lo tanto, la H_t se igualaría con el porcentaje de la pérdida de carga correspondiente a la línea regante, que permitiría una variación establecida en el gasto dentro de la unidad, de tal manera que N quedaría como incógnita. Para solucionar la igualdad anterior se puede utilizar el método de Newton-Ramphson (Jaquez *et al.*, 1978) que se aplica generalmente para encontrar las raíces de ecuaciones algebraicas. Otra forma de solución es por "tanteos" al usar el coeficiente de salidas múltiples (CSM) dado por la siguiente ecuación:

$$CSM = \frac{\sum_{i=1}^N i^2}{N^3} \quad 15$$

Que al sustituirlo en la Ecuación 13 y despejando para N se convierte en la Ecuación 16 (Ramírez *et al.*, 1978):

$$N = \left[\frac{H_t}{\left(\frac{10.29 C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2g A^2} \right) \bar{q}^2 * CSM} \right]^{1/3} \quad 16$$

Como el CSM depende de N para encontrar la solución, es necesario hacer iteraciones con ayuda del Cuadro 6.

Cuadro 6. Coeficientes de salidas múltiples en tuberías para afectar el producto de pérdidas de carga total.

Darcy-Weisbach-Manning			
N	CSM	N	CSM
1	0.0000	18	0.3616
2	0.6250	19	0.3601
3	0.5185	20	0.3587
4	0.4687	25	0.3536
5	0.4400	30	0.3501
6	0.4213	35	0.3477
7	0.4081	40	0.3459
8	0.3984	45	0.3445
9	0.3909	50	0.3434
10	0.3850	55	0.3424
11	0.3801	60	0.3417
12	0.3761	65	0.3410
13	0.3727	70	0.3405
14	0.3699	75	0.3400
15	0.3674	80	0.3396
16	0.3652	90	0.3389
17	0.3633	100	0.3383

Fuente: CENAMAR, 1982.

Diseño del Distribuidor. Es análogo al de las líneas regantes haciendo los ajustes apropiados. Así pues, el número de líneas regantes que debe tener la tubería de distribución se calcula de manera similar que el número de emisores. Algunas definiciones de variables son:

K_g = coeficiente de pérdida de carga localizada ocasionada por conexión de la tubería.

$\bar{q}_r = N\bar{q}$ = si el distribuidor tiene líneas regante en un sólo lado.

$\bar{q}_r = 2N\bar{q}$ = si el distribuidor tiene regantes a ambos lados.

Debe recordarse que para el propósito de salidas múltiples en unidades que riegan a dos lados, la N será solamente la mitad de las salidas físicas.

Tamaño y forma de la unidad de riego. Un sistema de riego por goteo diseñado para un terreno con mínima pendiente, la pérdida de carga total (H_l) que permite una cierta variación en gasto es la base para determinar el tamaño de la unidad. El tamaño dependerá también del tipo de distribuidor a utilizar, el gasto del gotero, espaciamiento entre plantas e hileras y de los diámetros del distribuidor y líneas regantes.

La forma de la unidad depende del porcentaje de la carga permisible a perder en la línea regante. Ahora bien, para cada valor de pérdida de carga existirá un valor del costo por punto de emisión, y que una vez que se definen gasto, densidades de población del cultivo y calidad del equipo, de ello dependen los diámetros seleccionados de distribuidor y regantes, así como del porcentaje de pérdida de carga en la línea regante.

Existen dos criterios para seleccionar tamaño y forma de la unidad de riego óptima y son: el tamaño del área de riego y el número máximo de puntos de emisión. En la práctica se ha comprobado que cuando el número de puntos de emisión es muy alto, los costos fijos de la unidad (dispositivos de control de gasto y presión) se abaratan y se traducen en un costo global mínimo.

En los puntos por donde se alimentan las unidades de riego exigen dispositivos para control de presión y gasto, los cuales se

incluyen en el diseño de la conducción debido a que la selección de estos afecta el costo del equipo así como la operación del sistema. La técnica de diseño debe considerar el método para el control de la presión y del gasto en las unidades de riego; con este fin se utilizan principalmente válvulas de compuerta. Otras alternativas son el uso de reguladores de presión basados en resortes (planet) o membrana (doll), (CENAMAR, 1982)

Diseño de la tubería de conducción

Trazo de la línea de conducción. Estas tuberías son las de mayor diámetro en todo el sistema, por tanto se requiere que sus longitudes sean lo más cortas posible y que inmediatamente a la salida de la fuente de abastecimiento se derive el gasto total en un mayor número de ramificaciones de tal manera que se disminuyan al mínimo permisible los diámetros de tuberías. En los sistemas colectivos de riego por goteo se cumple con lo anteriormente expuesto y su metodología de diseño es la que se presenta en este capítulo (Escobar *et al.*, 1978). Para diseñar la línea de conducción se siguen dos criterios: El diseño más corto o bien, el más económico.

El diseño más corto. Se supone que todas las tuberías tienen el mismo diámetro y se aplica la regla general de que el ángulo que forman dos tramos rectos sucesivos debe ser igual o mayor que 120 grados. Cuando los puntos de una red son varios, la distribución de la tubería se complica, como se ilustra en la Figura 2. En esta figura se ejemplifica un procedimiento para el caso de la unión de todos los puntos de una red de tuberías.

Se tiene cualquier punto A como origen, luego el punto más próximo a él es el B; se traza la recta A-B, se agrega el punto C, que es el siguiente más próximo uniendo B-C. Como el ángulo ABC es mayor que 120°, el trazado puede ser provisionalmente válido. El punto más próximo a los ya unidos es el D, se une con B y resulta que el ángulo ABD es menor que 120° y, por lo tanto, el trazo no es útil, siendo

necesario aplicar un trazo en horquilla a los puntos A, B y D. Se genera un punto M asegurándose que el nuevo ángulo MBC sea mayor que 120° . El trazo de la tubería resultante es A M D M B C.

El diseño más económico. También se puede hacer un planteamiento analítico para buscar el trazo más económico. Esto se puede ilustrar con un ejemplo suponiendo únicamente los puntos A, B y D de la Figura 2. En este caso se conocen las coordenadas de los nudos, origen (1 o A) y destinos (2 o D y 3 o B), no así el nudo de bifurcación (M) (Cuadro 7). Asimismo, se conocen los costos unitarios de cada sección de la red (Cuadro 8).

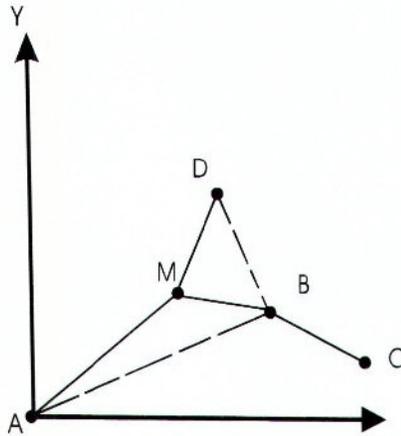


Figura 2. Diagrama de un sistema de conducción con un recorrido corto de la tubería.

Cuadro 7. Distancias en metros a los puntos de la red ABD.

Vértice	X (m)	Y (m)
1 o A	$X_1 = 0$	$Y_1 = 0$
Bifurcación (M)	$X = ?$	$Y = ?$
2 o D	$X_2 = 200$	$Y_2 = 200$
3 o B	$X_3 = 400$	$Y_3 = 80$

Cuadro 8. Costo unitario de la tubería para la red ABD.

Sección	Costo \$/m
1 - M	120
M - 2	100
M - 3	80

En este caso, la función objetivo (costo) se supone que es un número y estará en función de las longitudes de cada sección y su costo (P). A su vez, cada longitud de sección estará en función de las coordenadas, es decir:

$$d_{1-M} = \left[(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2 \right]^{0.5} \quad 17a$$

$$d_{M-2} = \left[(X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 \right]^{0.5} \quad 17b$$

$$d_{M-3} = \left[(X - X_3)^2 + (Y - Y_3)^2 \right]^{0.5} \quad 17c$$

De esta manera la función objetivo será:

$$\{C\}_{\min} = d_{1-M} * P_{1-m} + d_{m-2} * P_{m-2} + d_{m-3} * P_{m-3} \quad 18$$

Al procesar la función con una precisión del 0.01 se obtiene el siguiente resultado:

$$x = X_M = 190.1 \text{ m}, y = Y_M = 147.8 \text{ m}$$

Cuadro 9. Resultados de la red de tuberías ABD.

Sección	Longitud (m)
1 – M	240.8
M – 2	53.15
M – 3	220.56

Ejemplo de diseño de un sistema de riego por goteo en una huerta de nogal pecanero

Cuadro 10. Datos de la huerta de nogal pecanero.

1. Superficie	37,440 m ²
2. Gasto disponible	12 L s ⁻¹
3. Cultivo	Nogal
4. Profundidad a humedecer (Pr)	1.0 m
5. Plantación	Marco real
6. Separación entre plantas	12 m
7. Separación entre hileras	12 m
8. tipo de suelo	Migajon arcilloso
• Densidad aparente (Da)	1.32 g cm ⁻³
• Capacidad de campo (Cc)	0.3148* (Decimal)
• Punto de marchitez permanente (Pmp)	0.1318* (Decimal)
• Capilaridad (Ac) en el tiempo T	Ac = 0.9093T ^{-0.4599}
9. Calidad del agua	C ₂ S ₁
10. Evaporación media máxima diaria (Ev Máx. día ⁻¹)	11 mm
11. Coef. Experimental de Evapotranspiracion (Kc)	0.8
12. Tiempo disponible de operación (T _o)	24 h
13. Ecuación del gotero	Q = 0.5962H ^{0.5189}
14. Tipo de gotero	Rex-122t
15. Gasto del gotero	2 L h ⁻¹
16. Eficiencia de riego	90 %
17. Velocidad de infiltración básica del suelo (IB)	1.0 cm h ⁻¹

* Los porcentajes están con base en el peso de suelo seco

Procedimiento de cálculo

Cálculos agronómicos

Volumen de suelo (V_s).

Área de influencia por árbol (A_i) (12×12) = 144 m^2

Área propuesta a humedecer para el bulbo de humedecimiento (A_p) = 50 m^2 (criterio del área equivalente).

Donde: $V_s = (A_p) (Pr) = (50 \text{ m}^2) (1.00 \text{ m}) = 50 \text{ m}^3$

Volumen de agua (V_a) necesario para humedecer el volumen de suelo (V_s) a capacidad de campo (CC). (No se considera la precipitación efectiva como en la Ecuación 6).

El contenido de humedad del suelo al inicio correspondió al punto de marchitez permanente. En la práctica al formar el bulbo de humedad, este valor corresponde al contenido de humedad presente antes del riego.

$$V_a = \frac{(CC - PMP)Da V_s}{W_a} = \frac{(0.3144 - 0.1318)1.32 * 50}{1} = 12.0516 \text{ m}^3$$

Donde: V_a está en m^3 , CC y PMP en base peso volumétrico, Da en g cm^{-3} , V_s en m^3 y W_a es la densidad del agua considerada como 1 g cm^{-3} .

Demanda máxima de agua diaria por árbol ($D_{\text{maxdía}}^{-1}$).

$$D_{\text{maxdía}}^{-1} = (K_c)(E_v)(A_i) = (0.8) * 11 \text{ mm} * \frac{\text{m}}{1000\text{mm}} * (144^2) = 1.2672 \text{ m}^3$$

° La cantidad de agua para satisfacer la demanda máxima diaria en máxima producción y desarrollo vegetativo del cultivo de nogal debe estimarse conforme al área de influencia por árbol.

Caudal por árbol (Q_e = gasto por emisor). Se denomina emisor al conjunto de goteros.

$$Q_e = \frac{D_{\max} \text{ día}^{-1}}{T_o} = \frac{1267.2 \text{ L}}{24 \text{ h}} = 52.8 \text{ L h}^{-1}$$

Tiempo (T) en que se humedece a capacidad de campo (CC) el volumen del suelo (V_s).

$$T = \frac{V_a}{Q_e} = \frac{(12.0156 \text{ m}^3) \left(\frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3} \right)}{(52.8 \text{ L h}^{-1})} = 227.57 \text{ h}$$

$$T = (227.57 \text{ h}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \right) = 13,654 \text{ min}$$

Ascenso capilar (A_c en cm) en función del tiempo (T en min).

$$A_c = 0.9093 T^{0.4599} = 0.9093 (13,654)^{0.4599} = 72.53 \text{ cm}$$

Considerando este avance como el radio del área de humedecimiento del gotero (A_g), se tendrá:

$$A_g = \pi r^2 = 3.1416 \left[(72.53 \text{ cm}) \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right) \right]^2 = 1.65 \text{ m}^2$$

Un traslape de 10 por ciento entre el área de humedecimiento entre goteros (A_g), el área efectiva por gotero (A_{eg}) será:

$$A_{eg} = (A_g) (0.90) = (1.65 \text{ m}^2) (0.90) = 1.49 \text{ m}^2$$

Número de goteros (N_g) necesarios para humedecer el área propuesta (A_p) es:

$$N_g = \frac{A_p}{A_{eg}} = \frac{50 \text{ m}^2}{1.49 \text{ m}^2} = 33.56 \approx 34$$

Gasto necesario por gotero (q_g).

$$q_g = \frac{Q_e}{N_g} = \frac{52.8 \text{ L h}^{-1}}{34} = 1.55 \text{ L h}^{-1}$$

Verificación del gasto del emisor (conjunto de goteros), para evitar encharcamiento del área equivalente a regar. Regularmente se aceptan los emisores con un porcentaje de encharcamiento menor o igual a 10 por ciento (Peña, 1981).

Área irrigada por el emisor (AP): 50 m² (500 mil cm²)

Caudal del emisor (Qe): 52.8 L h⁻¹ (52,800 cm³ h⁻¹)

* Área de infiltración por el emisor (Aei):

$$A_{ei} = \frac{Q_e}{IB} = \frac{52,800 \text{ cm}^3 \text{ h}^{-1}}{1.0 \text{ cm h}^{-1}} = 52,800 \text{ cm}^2$$

* Porcentaje de área encharcada (% Aech):

$$\% \text{ Aech} = \frac{A_{ei}}{A_p} \times 100 \% = \frac{52,800 \text{ cm}^2}{500,000 \text{ cm}^2} \times 100 \% = 10.6 \%$$

Considerando los resultados anteriores se acepta el emisor propuesto como componente de diseño.

Cálculo hidráulico

Presión de operación (H_0) de la unidad de riego.

$$H_0 = \left(\frac{\bar{q}_g}{K (0.9)^{1/2}} \right)^{1/X} = \left(\frac{1.56}{0.5962 (0.9)^{1/2}} \right)^{1/0.5189} = 6.98 \text{ m}$$

Donde: H_0 en metros de columna de agua (m), \bar{q}_g es el gasto medio del emisor en $L\ h^{-1}$, K es el coeficiente de la ecuación del gotero (adimensional), x es el exponente de la ecuación del gotero (adimensional) y 0.9 es la uniformidad de riego preestablecida (adimensional).

Pérdida de carga permisible ΔH en la unidad de riego.

$$\Delta H = [1 - 0.9^{1/x}] H_0 = [1 - (0.9)^{1/0.5189}] * 7 = 1.29\text{ m}$$

Según experiencia del CENID-RASPA, se recomienda multiplicar el ΔH por un 25 por ciento para formar líneas regantes y un 75 por ciento para el distribuidor.

Donde: ΔH_{Lr} es la pérdida de carga permisible para línea regante, H_{Lr} con el 25 por ciento; $\Delta H_{Lr} = (0.25) 1.29 = 0.32\text{ m}$; ΔH_D es la pérdida de carga permisible para el distribuidor, y con H_D de 75 por ciento; por lo tanto, $H_D = (0.75) 1.29 = 0.97\text{ m}$.

Unidad de riego

Número de emisores (Ne) por línea regante (Lr). Se determina por aproximaciones sucesivas (tanteos) con el uso del coeficiente de salidas múltiples (CSM) señalado en el Cuadro 6 y aplicando la expresión 16.

$$Ne = \left[\frac{\Delta H_{Lr}}{\left(\frac{10.29 C^2 S_e}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) (Q_e)^2 CSM} \right]^{1/3}$$

$$Ne = \left[\frac{0.32}{\left(\frac{(10.29)(0.008)^2(12)}{(0.0158)^{16/3}} + \frac{0.5}{(19.62)((0.785)(0.0158)^2)^2} \right) * \left(\frac{52.8}{3.6 * 10^6} \right)^2 * 0.3909} \right]^{1/3}$$

$$Ne = 4.88 = 5$$

Donde: ΔH_{Lr} es la pérdida de carga permisible en línea regante en (m), C es el coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional), S es el espaciamiento entre goteros en m, D el diámetro interior del tubo en m, K_g es el coeficiente por conexión del emisor para la pérdida localizada (adimensional), g es la aceleración gravedad (9.81 m s^{-2}), A es el área de flujo transversal en m^2 , Q_e es el caudal medio del gotero, que para este caso se determina por el número de goteros que constituyen al emisor que es $(N_g) \cdot (q_g)$ en L h^{-1} y que debe procesarse en metros cúbicos sobre segundo ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) para su conversión se divide entre $3.6 \cdot 10^6$ (factor de conversión de L h^{-1} a $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) y CSM es el coeficiente de salidas múltiples (adimensional).

Número de líneas regantes (N Lr) en el distribuidor. Esta ecuación se puede resolver por tanteos. Suponiendo que se conoce Ne y sustituyendo el CSM correspondiente, hasta que el resultado sea igual al Ne supuesto o puede usarse un método numérico más eficiente. Para el caso de distribuidores es básicamente la misma Ecuación 16, haciendo los cambios apropiados para distribuidor.

$$NLr = \left[\frac{\Delta H_D}{\left(\frac{10.29 C^2 S_{Lr}}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right) \cdot \left(\frac{q_{Lr}}{3.6 \cdot 10^6} \right) \cdot CSM} \right]^{1/3}$$

$$NLr = \left[\frac{0.97}{\left(\frac{(10.29)(0.008)^2(12)}{(0.0525)^{5.3333}} + \frac{0.5}{(19.62)((0.785)(0.0525)^2)^2} \right) \left(\frac{52.8}{3.6 \cdot 10^6} \right)^2 \cdot 0.3668} \right]^{1/3}$$

$$N Lr = 12.82 = 13$$

Donde ΔH_D es la pérdida de carga permisible en el distribuidor en (m), C es el coeficiente de rugosidad de la tubería (adimensional), SLr espaciamiento entre líneas de riego en m, D el diámetro interior del tubo en m, K_g es el coeficiente por conexión de la tubería (tee o silleta) para la pérdida localizada (adimensional), g es la aceleración de la gravedad (9.81 m s^{-2}). A es el área de flujo transversal en m^2 , $\bar{q}Lr$ es el gasto por línea regante para la alimentación de los emisores, en cada punto de conexión se alimentan dos líneas, por lo que $\bar{q}Lr = (Q_e) (N_e) (2) = 528 \text{ L h}^{-1}$; el valor de $3.6 \cdot 10^6$ es un factor de conversión de L h^{-1} a $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, por último CSM es el coeficiente de salidas múltiples (adimensional).

Superficie irrigada por unidad de riego (Sur). La longitud de la tubería regante (Ltr) se muestra a continuación:

$$Ltr = (N_e) (S_e) = (5) (12 \text{ m}) = 60 \text{ m}$$

y la longitud de la tubería de distribución (LD) se estima como:

$$LD = (N Lr) (S Lr) = (13) (12 \text{ m}) = 156 \text{ m}$$

$$Sur = (2 LD) (2 Ltr) = (2 \cdot 156 \text{ m}) (2 \cdot 60 \text{ m}) = 37,440 \text{ m}^2 = 3.744 \text{ ha}$$

Nota: Ya que el distribuidor tiene regantes en ambos lados y la línea de conducción alimenta dos distribuidores de iguales características, las longitudes de regante y distribuidor deben considerarse dobles para calcular la superficie de la unidad de riego.

Número de árboles por unidad de riego. Considerando la superficie de la unidad y el área de plantación del árbol.

$$\text{Num. de árboles} = \frac{\text{Superficie de la unidad}}{\text{Área de plantación}} = \frac{37440 \text{ m}^2}{144 \text{ m}^2} = 260$$

Gasto por unidad de riego:

$$\text{Gasto por unidad} = \frac{(\text{Volumen por árbol})(\text{Num. de árboles})}{T_o} =$$

$$\frac{(1267.2 \text{ L})(260 \text{ árboles})}{24 \text{ h}} \quad 13728 \text{ L h}^{-1} = 3.81 \text{ L s}^{-1}$$

Número de unidades de riego que se pueden regar simultáneamente con el gasto de la fuente de abastecimiento y en el tiempo de operación establecido.

$$\text{Número de unidades} = \frac{Q_{\text{fuente}}}{Q_{\text{unidad}}} = \frac{12 \text{ L s}^{-1}}{3.81 \text{ L s}^{-1}} = 3.15 \cong 3 \text{ unidades}$$

Cálculo de la tubería de conducción. En la Figura 3 se presenta un croquis del sistema de riego donde se muestra cada uno de los tramos de la tubería de conducción.

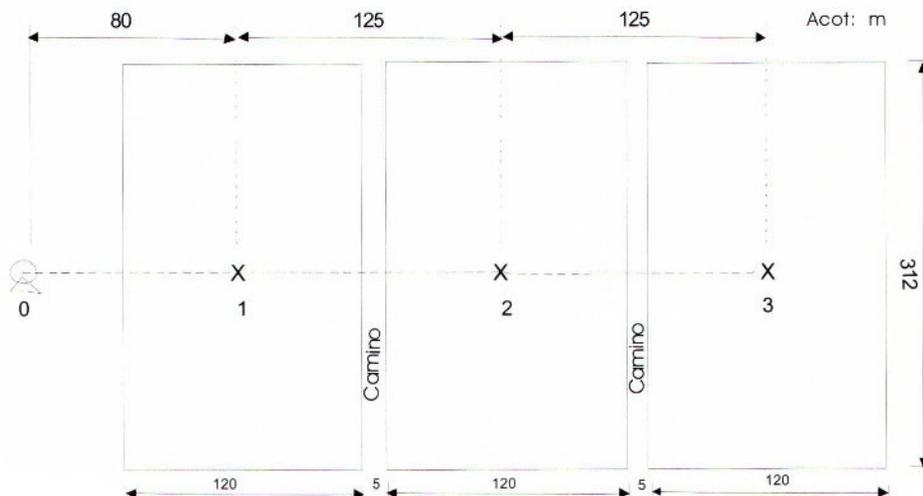


Figura 3. Croquis de instalación de la tubería de conducción de la superficie de riego proyectada.

Para el cálculo de las pérdidas por fricción en cada uno de ellos se utiliza la ecuación de Manning:

$$H_f = \frac{10.29 C^2 L Q^2}{D^{16/3}}$$

Donde: C es el coeficiente de rugosidad de la tubería de PVC (0.008 para todos los casos) y es adimensional, L longitud de la tubería (m), Q caudal que circula por la tubería en (m³ s⁻¹) y D el diámetro de la tubería (m).

Cuadro 11. Pérdidas de carga hidráulica en tuberías de conducción del ejemplo de diseño en nogal.

Tramo	L (m)	D (m)	Q L s ⁻¹	Q m ³ s ⁻¹	Hf (m)
0-1	80	0.1023	11.43	0.01143	1.31
1-2	125	0.1023	7.62	0.00762	0.91
2-3	125	0.0779	3.81	0.00381	0.98

Pérdida de carga total en la tubería de conducción:

$$H_{tc} = H_f 0-1 + H_f 1-2 + H_f 2-3$$

$$H_{tc} = 3.20 \text{ m}$$

Selección del cabezal de control

Hidrociclón. Es un filtro diseñado para utilizarse en cabezales y sirve para separar la arena y otras partículas compactas más pesadas que el agua. Su selección se hace por medio de catálogos tomando como base el gasto del sistema de riego. Por ejemplo al consultar el catálogo de Netafim (www.netafim.com.ar/) para un gasto de 35–52 m³ h⁻¹ se requiere las siguientes conexiones: 0.1016 m (4") de entrada, 0.0762 m (3") de salida con operación manual.

Filtro de malla. Este se utiliza para eliminar las partículas que el hidrociclón deja pasar. Se selecciona de acuerdo al gasto del sistema y con catálogos existentes de los diversos fabricantes. En este caso se usó el catálogo de Netafim (www.netafim.com.ar/) y se seleccionó el del gasto de 13 a 55 m³h⁻¹, debido a que el gasto del sistema es de 41.15 m³h⁻¹; con esta información se obtuvo lo siguiente:

Capacidad: 50 m³h⁻¹

Conexión: 0.0762 m (3") de entrada y salida

Operación: manual

Grado de filtración disponible: 40–140 mallas.

El número de malla se selecciona previo resultado de análisis de sólidos en suspensión del agua de riego.

Selección del equipo de bombeo. La bomba centrífuga para el sistema de goteo se selecciona utilizando las curvas características proporcionadas por los fabricantes. Con estas curvas se obtiene la eficiencia de bombeo, potencia requerida, tamaño, velocidad de giro, marca, modelo, así como gasto y carga de bombeo óptimos.

Otro criterio de selección de bomba es calcular la potencia que se requiere en la flecha de la bomba (POT_B), y la potencia del motor (POT_m) mediante las siguientes ecuaciones:

$$POT_B = \frac{Q_B * HT_B}{\eta_b * 76} = \frac{11.43 * 16.2}{0.5974 * 76} = 4.08 \text{ HP} \quad 19$$

Donde: Q_B es el gasto de bombeo o gasto disponible en L s⁻¹, HT_B es la carga total dinámica o carga de bombeo y se calcula:

$$HT_B = Ho + Htc + HCC + T_d \text{ en (m)} \quad 20$$

Donde Ho es la carga de operación (7 m), Htc es la pérdida de carga total de conducción (3.20 m), HCC es la pérdida de carga en el cabezal de control (se recomiendan 6.0 m), T_d es el desnivel topográfico (0.0 m),

η_b es la eficiencia de la bomba (adimensional), 76 es un factor de conversión a HP.

El valor de la eficiencia de bombeo (η_b) se aproxima a la eficiencia mecánica (η_m), y está en función del gasto bombeado [$\eta_m=f(Q)$]. De Parres (1977) presenta en su libro un análisis gráfico de donde obtuvo los valores medios, límites superior e inferior de las eficiencias mecánicas esperadas en función del caudal suministrado. Dicho gráfico comprende el muestreo de bombas de distintos fabricantes que se encuentran en el mercado, de donde se generó la Ecuación 21 y en la cual se estima el valor de eficiencia de cualquier bomba en función del gasto de bombeo.

$$\eta_m = \frac{1}{0.013274667 + \frac{0.039597151}{Q}} \quad 21$$

$$\text{Con } R^2 = 0.989$$

Donde $\eta_m \equiv \eta_b$ (%), en la expresión de cálculo de la potencia de la bomba se procesa como un cociente (tanto por uno), Q es el caudal ($L s^{-1}$), dicho ajuste con tales coeficientes se obtuvo para un rango de 5–700 $L s^{-1}$, en bombas centrífugas horizontales.

El cálculo de la potencia del motor eléctrico se hace por medio de la siguiente relación:

$$POT_m = \frac{POT_B}{\eta_{mot}} = \frac{4.08}{0.81} = 5.03 \text{ HP}$$

Donde: η_{mot} es la eficiencia del motor (adimensional, se menciona en por ciento y se procesa en tanto por uno, Cuadro 12), el motor próximo a 4.08 HP es 5 HP; en el mismo cuadro la eficiencia correspondiente a un motor trifásico de 3,450 rpm es de 81 por ciento. El cálculo de la potencia de motor indica que se requieren 5.03 HP optando por el de

5 HP. Este tipo de corriente eléctrica trifásica es la más común en el campo.

Nota: Para motores de combustión interna nuevos, los fabricantes recomiendan considerar un 85 por ciento de eficiencia del motor, para los eléctricos la recomendación se proporciona en la placa del motor o se pueden utilizar los datos del Cuadro 12.

Cuadro 12. Eficiencia de motores eléctricos en función de la potencia y tipo de motor (CENAMAR, 1982).

Potencia del motor (HP)	Motor			
	Monofásico (rpm)		Trifásico (rpm)	
	1750	3450	1750	3450
1/4		63		
1/3		68		
1/2		69		
3/4		71		
1	71	71	77	76
1 ½	71	71	80	77
2	71	73	80	79
3	75	75	80	80
5	75	78	82	81
7 ½			83	83
10			84	84
15			85	85
20			86	86
25			87	86
30			88	87
40			88	88
50-60			88	
75-100			89	
125-200			90	

Selección del dosificador de fertilizantes. En frutales, la capacidad del tanque con la solución de nutrimentos se determina por el elemento de mayor consumo por el cultivo, en este caso es el nitrógeno. De acuerdo al desarrollo del cultivo es necesario suministrar la cantidad del fertilizante con base en el diámetro del tronco. Se recomiendan 64 g de N por cm de diámetro del tronco. Para este ejemplo se considera un árbol de ocho años, con un tronco aproximado de 30 cm de diámetro. La necesidad de nitrógeno por árbol es:

$$(64 \text{ g de N cm}^{-1}) * (30 \text{ cm}) = 1,920 \text{ g de N}$$

Al utilizar como fuente de nitrógeno la urea (46 % de N), la cantidad de urea por árbol es:

$$\frac{1920 \text{ g (N)} * 1000 \text{ g urea}}{460 \text{ g (N)}} = 4174 \text{ g urea}$$

Se recomienda que por cada 130 g de agua se agreguen 100 g de urea para obtener una solución homogénea; por lo tanto, el volumen (L) de agua por árbol es de:

$$\frac{4174 \text{ g urea} * 130 \text{ g agua}}{100 \text{ g urea}} = 5426.2 \text{ g agua}$$

$$\frac{5426.2 \text{ g agua} * 1 \text{ L agua}}{1000 \text{ g agua}} = 5.4262 \text{ L agua}$$

Por cuestiones de diseño, el lote de terreno se divide en tres unidades de riego y se recomienda fertilizar por unidad de riego. En este caso, cada unidad de riego consta de 260 árboles; por lo tanto, la cantidad de agua con fertilizante que debe aplicarse en el ciclo vegetativo del nogal se calcula de la siguiente manera:

$$(5.426 \text{ L agua por árbol}) * (260 \text{ árboles}) = 1,410.76 \text{ L de solución}$$

Para la inyección de fertilizantes a través del sistema de riego se optó por la selección de un venturi, se seleccionó de acuerdo al gasto operativo del sistema y con catálogos existentes de los diversos fabricantes. En este caso se usó el catálogo de Mazzei (<http://www.mazzei.net/>) y se seleccionó el modelo 3090 de tres pulgadas de diámetro que trabaja con un gasto de 9.65 L s^{-1} , una carga hidráulica de entrada 14.0 m, y en la salida de 10.5 m de presión y en paro de succión de 12.0 m. Con tales condiciones hidráulicas el dispositivo succiona un gasto de $1,638 \text{ L h}^{-1}$. Para su instalación se sugiere el Boletín Técnico N° 5 (http://www.mazzei.net/Espanol/Tech_Bulletins/ES-TB-05.PDF) en el que se indica que se instale en la línea de conducción con desviación a «by-pass».

Para la Región Lagunera, el INIFAP recomienda fertilizar el nogal en dos etapas: marzo y junio, por lo cual la cantidad total por ciclo se fracciona en varias aplicaciones repartidas en dicho rango de meses. Un programa tentativo de fertilización sería el siguiente:

Tres unidades requieren 4,232 litros de solución por ciclo, si se fracciona en seis aplicaciones se necesita un volumen de 705 litros en las tres unidades, con un tinaco de 1,000 litros de donde el venturi succione la solución nutritiva en cada aplicación para distribuirla en las unidades a un gasto de $2,178 \text{ L h}^{-1}$.

La aplicación de fertilizantes por medio de los sistemas de riego presurizados ha cobrado tal importancia que los equipos y dispositivos son muy variados, requiriendo especificaciones de diseño adicionales a las aquí mostradas. Se recomienda ampliamente abordar un capítulo específicamente sobre aspectos químicos, agronómicos e hidráulicos del fertirriego.

Asimismo, se recomienda que el usuario interesado en instalar equipos de riego presurizados se asesore por personal calificado, tanto en el diseño como en la operación y mantenimiento, de tal forma que los objetivos de esta tecnología se alcancen asegurando niveles de rentabilidad atractivos para el productor, y de sustentabilidad en el uso del recurso para la sociedad en general.

Unidad óptima de riego presurizado

Un sistema de riego por goteo o cualquier otro método de riego presurizado que sea fijo, se le diseñan unidades o secciones de riego. En términos generales las unidades tienen un distribuidor que se coloca al centro con laterales a ambos lados (Karmeli y Keller, 1975). El diseño hidráulico considera una variación en gasto de 10 por ciento entre los goteros más y menos favorecidos, y que conlleven a una pérdida permisible en el lateral y en el distribuidor. La suma de estas pérdidas debe ser menor o igual a la pérdida total permisible en toda la unidad.

En condiciones fijas de diámetro de lateral y distribuidor, gasto y separación de las salidas, factor de fricción y localizadas constantes y en plano, se pueden lograr varios arreglos de diferentes tamaños y conformación de las unidades. Esto siempre y cuando la pérdida de carga permisible en el lateral más la permisible en el distribuidor no superen a la pérdida de carga total en la unidad. Tomando en cuenta el rango de laterales muy cortos y distribuidores largos y laterales muy largos y distribuidores cortos; se puede pensar que existe una combinación tal que el costo sea mínimo.

El costo para una unidad de riego, es proporcional al número de mangueras, conexiones, tapones y emisores al área que cubra. Sin embargo, los costos unitarios debidos a los puntos de control por cada unidad de riego (costos fijos) son menores ($\$/m^2$) a medida que el área de la unidad sea más grande, por lo que una unidad de costo mínimo ($\$/m^2$) será equivalente a una unidad de área máxima.

El programa que se presenta en este documento para la optimización de unidades de riego determina diferentes tamaños de unidades de riego dentro de los rangos aceptables de pérdida permisible en lateral y distribuidor.

A continuación se ajustan los datos del área de la unidad de riego en cada caso con la pérdida permisible en el lateral (no los del distribuidor porque son lateralmente dependientes) se ajustan a un

modelo de parábola cuadrática, y se utiliza la técnica de mínimos cuadrados para obtener los parámetros ajustados. Al disponer de la ecuación se deriva e iguala a cero para cumplir con la condición necesaria para obtener un punto extremo que facilite demostrar que es un máximo. Al resolver la ecuación de primer grado resultante permite encontrar la pérdida de carga permisible en el lateral que garantice un área de unidad máxima.

Enseguida se ilustra cómo se obtienen los parámetros de la ecuación del gasto de goteros (K y X) para emisores individuales y cintillas que son necesarios para elaborar el diseño de un sistema de riego presurizado.

Obtención de los parámetros de la relación carga-gasto de goteros y cintillas. El procedimiento para este fin propuesto por Burt y Stuart (1994), considera solamente dos puntos de la curva carga-gasto y se ejemplifica para el caso de cintilla T-TAPE modelo 506-30-340. Esta cintilla tiene emisores separados a 30 cm, con diámetro de la manguera de 15.9 mm, carga nominal de 0.55 bars y gasto nominal de 341 L h⁻¹ por cada 100 m de longitud. La cintilla con una carga de 5.455 m de columna de agua produce en cada emisor un gasto de 1.01 L h⁻¹ y con 4.833 m de columna de agua un gasto de 0.95 L h⁻¹ y su emisión es del régimen turbulento no afectado por la temperatura del agua (Munguía *et al.*, 2003).

El exponente **x** de la ecuación se estima con la siguiente expresión:

$$X = \frac{\text{Log}\left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)}{\text{Log}\left(\frac{H_1}{H_2}\right)} = \frac{\text{Log}\left(\frac{1.01}{0.95}\right)}{\text{Log}\left(\frac{5.455}{4.833}\right)} = \frac{0.0266}{0.0526} = 0.5058$$

Para el caso del coeficiente K, se despeja de la expresión $Q = KH^x$ quedando:

$$K = \frac{Q_2}{(H_2)^x} = \frac{0.95}{(4.833)^{0.5059}} = 0.4281$$

Entonces la relación entre Q-H de la cintilla quedará como:

$$Q = 0.4281 H^{0.5259}$$

En este caso se utilizó el Log_{10} , si el procedimiento se hace con logaritmo natural se llega exactamente al mismo resultado.

Programa de cómputo aplicado al cálculo hidráulico

El programa computacional que se presenta en el disco compacto (CD), adjunto facilita los cálculos en el diseño hidráulico de los sistemas de riego presurizado. Así también disminuye los errores en esos cálculos. Dicho programa toma en cuenta los requisitos fundamentales de funcionalidad, seguridad y de costo mínimo. Se incluye también el manual de usuario de dicho programa que de manera sencilla conduce paso a paso en cada uno de los procedimientos de cálculo.

Diseño de un sistema de riego por goteo tipo cintilla para chile jalapeño. Se ejecuta el programa con la aplicación CENIDHT1, y aparece una pantalla principal con los diversos subprogramas que realizan diferentes calculos hidraulicos (Figura 4), por ejemplo al seleccionar la opción 5 para el calculo de la unidad optima de riego presurizado, se solicitaran los datos mostrados en las Figuras 5 y 6.

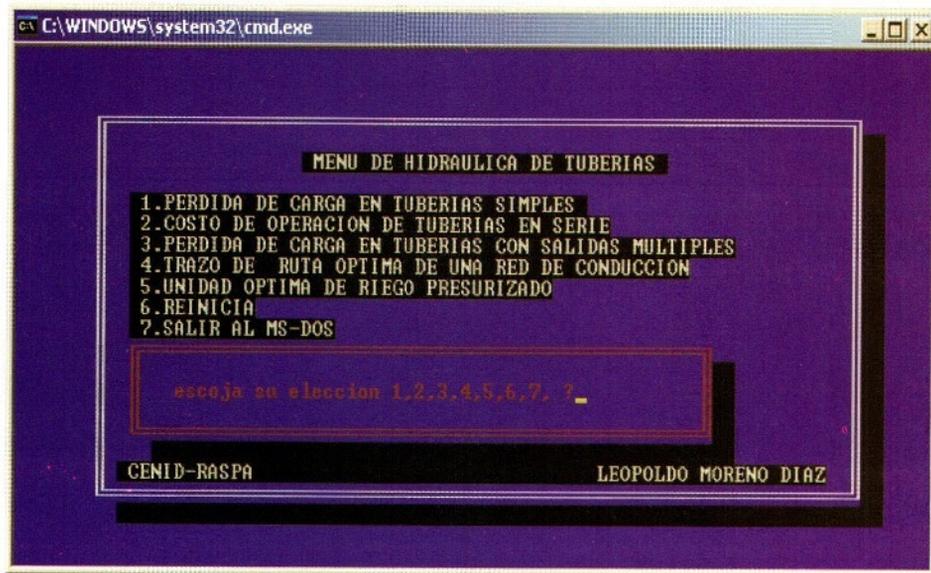


Figura 4. Pantalla principal del programa de cómputo.

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
*****
CALCULO DE AREA OPTIMA DE RIEGO
*****

DAME LOS DATOS GENERALES

IDENTIFICACION DEL PROYECTO Chile Jalapeño

DAME EL GASTO MEDIO EN <lph> 0.44

Para , carga en <n> y gasto en <lph>
CONSTANTE K DEL EMISOR 0.230544
CONSTANTE X DEL EMISOR ? 0.444176
NUMERO DE SALIDAS POR EMISOR 1
COEFICIENTE DE PERDIDAS LOCALES DEL DISPOSITIVO DE RIEGO 0.0
COEFICIENTE DE PERDIDAS LOCALES DE LA LATERAL 0.5
    
```

Figura 5. Alimentación de datos al subprograma «área óptima de riego».

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe

Para , carga en <n> y gasto en <lph>
CONSTANTE K DEL EMISOR 0.230544
CONSTANTE X DEL EMISOR ? 0.444176
NUMERO DE SALIDAS POR EMISOR 1
COEFICIENTE DE PERDIDAS LOCALES DEL DISPOSITIVO DE RIEGO 0.0
COEFICIENTE DE PERDIDAS LOCALES DE LA LATERAL 0.5
DISTANCIA ENTRE DISPOSITIVOS DE RIEGO <M> 0.20
DISTANCIA ENTRE LINEAS REGANTES <M> 1.50
DIAMETRO DE LA LATERAL <mm> 16
DIAMETRO DEL DISTRIBUIDOR <mm> 38
COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE MANNING DEL LATERAL 0.008
COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE MANNING DEL DISTRIBUIDOR 0.008
    
```

Figura 6. Alimentación de datos (continuación) al subprograma «Área óptima de riego».

Los resultados del cálculo del subprograma «unidad óptima de riego» se muestran en las Figuras 7 y 8; en la primera se muestran distintas unidades de riego a distintas pérdidas de carga permisible de laterales y distribuidores; mientras que en la segunda se presentan los datos de las laterales, distribuidor y el área óptima de riego resultante.

PERDIDA LATER	PERDIDA DISTRIB.	LONG LATER.	LONG DISTRI.	AREA
.1018814	.9169322	137.0226	55.43478	7595.814
.2037627	.8150509	172.6496	45.4348	7844.301
.3056441	.7131695	197.6367	39.52874	7812.329
.4075254	.6112882	217.5266	35.06449	7627.458
.5094068	.5094068	234.3214	31.24768	7322.001
.6112882	.4075254	249.001	27.69674	6896.517
.7131696	.305644	262.1271	24.13721	6327.017
.815051	.2037627	274.0549	20.2451	5548.27
.9169323	.1018813	285.0254	15.31767	4365.924

PRESIONE LA TECLA ENTER PARA CONTINUAR

Figura 7. Resultados del subprograma «unidad óptima de riego».

```

C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
EL PROYECTO ES Chile-Jalapeño
LONGITUD DE LA LATERAL <n> 190
NUMERO DE SALIDAS EN EL LATERAL 475
LONGITUD DEL DISTRIBUIDOR <n> 39
NUMERO DE LATERALES EN CADA DISTRIBUIDOR 13
AREA OPTIMA DE RIEGO <ha.> .741
CARGA A LA ENTRADA DE LA UNIDAD <n de col. agua> 4.824613
AREA OPTIMA CUANDO LA PERDIDA DE CARGA EN <n>, EN LA LATERAL ES = .2723105
LOS COEFICIENTES DE LA REGRESION CUADRATICO Y LINEAL SON
-8110.304      4417.042
...Deseas hacer otro calculo <S/N>
    
```

Figura 8. Resultados (continuación) del subprograma «unidad óptima de riego».

Ejemplo numérico manual utilizando los datos del programa computacional.

Al tomar los datos de la relación carga–gasto del folleto del fabricante con las características técnico–operativas de la cintilla 510-20-250 T-Tape:

$$Q_1 \text{ emisor} = 0.5 \text{ L h}^{-1} \text{ a } 55.16 \text{ KPa o } 5.714 \text{ m}$$

$$Q_2 \text{ emisor} = 0.44 \text{ L h}^{-1} \text{ a } 41.4 \text{ KPa o } 4.285 \text{ m}$$

Se obtienen los valores de X y K de acuerdo a lo expuesto en la sección de la página 37:

$$X = 0.444176$$

$$K = 0.230544$$

La ecuación carga-gasto del emisor de la cintilla quedaría:

$$Q = KH^X = 0.2305 H^{0.4442}$$

Cálculo de la carga a la entrada de la unidad (H_0) para $Q = \bar{q}$

$$Q = KH^X = 0.2305 H^{0.4442}$$

$$H_0 = \left(\frac{\bar{q}}{K(0.9)^{1/2}} \right)^{1/X} = \left(\frac{0.44}{0.2305(0.9)^{1/2}} \right)^{1/0.4442}$$

$$H_0 = 4.824 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga permisible entre el primero y último gotero:

$$\Delta H = \left[1 - \left(\frac{q_F}{q_0} \right)^{1/X} \right] H_0 = \left[1 - (0.9)^{1/0.4442} \right] * 4.824 = 1.02 \text{ m}$$

Cálculo de la pérdida de carga en la lateral (línea regante):

$$H_T = \left(\frac{10.29 C^2 S q^2}{D^{16/3}} + \frac{K_g q^2}{2g A^2} \right) \left(\frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \right)$$

$$H_T = \left(\frac{10.29 (0.008)^2 * 0.20 \left(\frac{0.44}{3.6 * 10^6} \right)^2}{0.016^{16/3}} + \frac{0.0 \left(\frac{0.44}{3.6 * 10^6} \right)^2}{19.6 (0.785)^2 0.016^4} \right) *$$

$$* \left(\frac{2(475)^3 + 3(475)^2 + 475}{6} \right)$$

$$H_T = 0.266 \text{ m}$$

Cálculo del tamaño del distribuidor (Pérdida de carga, H_D)

$$H_D = \left(\frac{10.29 C^2 S (2N\bar{q})^2}{D^{16/3}} + \frac{K_g (2N\bar{q})^2}{2gA^2} \right) \left(\frac{2N^3 + 3N^2 + N}{6} \right)$$

$$H_D = \left(\frac{10.29 * (0.008)^2 * 1.5 \left(\frac{2 * 475 * 0.44}{3.6 * 10^6} \right)^2}{0.038^{16/3}} + \frac{0.5 \left(\frac{2 * 475 * 0.44}{3.6 * 10^6} \right)^2}{19.6(0.785)^2 * 0.038^4} \right) *$$

$$* \left(\frac{2(13)^3 + 3(13)^2 + 13}{6} \right)$$

$$H_D = 0.62 \text{ m}$$

La pérdida permisible entre el primero y último gotero (ΔH) es igual a 1.02 m

$$\Delta H = H_T + H_D = 0.26 \text{ m} + 0.62 \text{ m} = 0.88 \text{ m} < 1.02 \text{ m}$$

Si se calcula con 14 laterales, la pérdida de carga es superior a la permisible entre el primero y último gotero. Entonces la solución es 13 laterales, lo cual concuerda con el calculado con el programa de cómputo.

Uso del programa de cómputo para goteros individuales utilizando el subprograma «Área óptima de riego»

Datos Generales

$$\bar{q} = 2 \text{ L h}^{-1}$$

$$Q = 0.632 \text{ H}^{0.5}$$

$$S_g = 60 \text{ cm}$$

$$n = 0.008$$

$$K_g = 0.5$$

$$K_L = 0.5$$

$$S_L = 120 \text{ cm}$$

$$D_L = 14 \text{ mm}$$

$$D_D = 63 \text{ mm}$$

Datos de Entrada al Subprograma

NOMBRE DEL PROYECTO: Repollo

DAME EL GASTO MEDIO EN (L h⁻¹) 2

Para carga en (MCA) y gasto en (L h⁻¹)
CONSTANTE K DEL EMISOR 0.632

CONSTANTE X DEL EMISOR ? 0.5

NÚMERO DE SALIDAS POR EMISOR 1

COEFICIENTE DE PÉRDIDAS LOCALES DEL DISPOSITIVO DE RIEGO 0.5

COEFICIENTE DE PÉRDIDAS LOCALES DE LA LATERAL 0.5

DISTANCIA ENTRE DISPOSITIVOS DE RIEGO (m)	0.6
DISTANCIA ENTRE LÍNEAS REGANTES (m)	1.2
DIÁMETRO DE LA LATERAL (mm)	14
DIÁMETRO DEL DISTRIBUIDOR (mm)	63
COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE MANNING DEL LATERAL	0.008
COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE MANNING DEL DISTRIBUIDOR	0.008

Una vez que se introducen los datos, el programa arroja los resultados mostrados en el Cuadro 13, similares a la Figura 7, posteriormente después de presionar la tecla Enter realiza la optimización de la unidad de riego.

Primer resultado de cómputo.

Cuadro 13. Fluctuación de las áreas de riego por goteo con diversas pérdidas de carga permisible en líneas regante o laterales y distribuidor, similar al de la Figura 6.

Pérdida lateral (m)	Pérdida distribuidor (m)	Longitud lateral (m)	Longitud distribuidor (m)	Área (m ²)
0.211416	1.90274	94.13895	129.2261	12165.21
0.422831	1.691325	118.736	106.2457	12615.2
0.6342467	1.479909	135.9872	92.6945	12605.26
0.8456623	1.268493	149.7192	82.46072	12345.96
1.057078	1.057078	161.3144	73.71673	11891.57
1.268493	0.8456624	171.4493	65.58574	11244.63
1.479909	0.6342468	180.5116	57.43827	10368.27
1.691324	0.4228313	188.7466	48.53243	9160.331
1.90274	0.2114158	196.3207	37.26067	7315.041

Segundo resultado de cómputo

EL PROYECTO ES: Repollo

LONGITUD DE LA LATERAL (m): 133.2

NÚMERO DE SALIDAS EN EL LATERAL: 111

LONGITUD DEL DISTRIBUIDOR (m): 93.60001

NÚMERO DE LATERALES EN CADA DISTRIBUIDOR: 39

ÁREA ÓPTIMA DE RIEGO (ha): 1.246752

CARGA A LA ENTRADA DE LA UNIDAD (MCA): 11.12713

ÁREA ÓPTIMA CUANDO LA PÉRDIDA DE CARGA EN (MCA), EN LA LATERAL ES: 0.596033

LOS COEFICIENTES DE LA REGRESIÓN CUADRÁTICO Y LINEAL SON: -3021.429 y 3601.744

DESEA HACER OTRO CÁLCULO (s/n) n

LITERATURA CITADA

- Burt, Ch. M. and W.S. Stuart. 1994. Drip and microirrigation for trees, vines, and row crops. (with special sections on buried drip). Irrigation Training and Research Center (ITRC). California Polytechnic State University. San Luis Obispo, CA, USA. p. 29-34.
- Centro Nacional de Métodos Avanzados de Riego. 1982. Memorias VII curso de riego por goteo. SARH-DGDUR. Gómez Palacio, Dgo.
- Christiansen, J. R. 1942. Irrigation by sprinkling. California Agricultural Experimental Station. Bulletin No. 570. USA.
- De Azevedo N., J. M. y G. Acosta A. 1978. Manual de Hidráulica. Trad. de la 6ª edición en portugués por G. Acosta A. Editorial HARLA, México D. F.
- De Parres J., L. 1977. Máquinas Hidráulicas. Cuarta edición. Tercera reimpresión. Editorial Lituarte S. de R. L. F. C. México D. F.
- Escobar A., M. A., E. Peña P. y C. E. Ramírez C. 1978. Método para el diseño óptimo, económico e hidráulico en sistemas de riego por goteo. II Seminario Nacional sobre riego por goteo. Memorias tomo 1. Región Lagunera, Coah. y Dgo. México p 109-133.
- Fry, A.W. and S. Gray. 1971. Sprinkler Irrigation handbook. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Co. California, USA.
- Gómez P., P. 1974. La Técnica y la Tecnología del Riego por Aspersión. Servicio de publicaciones del Ministerio de Agricultura. Madrid, España.
- . 1975. Riego a Presión. Aspersión y goteo. Editorial Aedes. Barcelona, España.

- De Saint F., J. 1975. El Riego por Aspersión. Editores Técnicos Asociados S.A. Barcelona, España.
- Hargreaves, G. H. and Samani Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1(2):96-99.
- Hagan, R. N., S. E. Haise and T. W. Edminister. 1967. Irrigation of agricultural lands. American Society of Agronomy. Agronomy No. 11. USA.
- Hidalgo, G. A. 1971. Métodos modernos de riego de superficie. Aguilar S.A. ediciones. Madrid, España.
- Israelsen, O. W. and V. E. Hansen. 1979. Principios y aplicaciones del riego. 2a. edición. Editorial Roverté. Madrid, España.
- Jáquez A., D., M. A. Escobar A., E. Peña P. y C. E. Ramírez C. 1978. La computación electrónica en el diseño de unidades de riego por goteo. II Seminario Nacional sobre riego por goteo. Memorias. Tomo 1. Región Lagunera, Coah. y Dgo. México pp 77-107.
- Karmeli, D. and J. Keller. 1975. Trickle Irrigation Design. Edited and published by Rain Bird Sprinkler Corporation. California, USA. pp. 20-25.
- Munguía, L. J., O. Martínez U., R. Quezada M. 2003. Influencia de la temperatura de agua en el régimen hidráulico de ocho cintas de goteo de riego por goteo. XII Congreso Nacional de Irrigación de la ANEI. Zacatecas, México.
- Peña P., E., M. A. Escobar A. y C. E. Ramírez C. 1978. Análisis y evaluación del funcionamiento hidráulico de goteros, II Seminario Nacional Sobre riego por goteo. Memorias. Tomo 1. Región Lagunera, Coah. y Dgo., México. pp 9-41.

- Peña P., E. 1981. Relación entre las características del suelo y el consumo de agua por los cultivos con el diseño hidráulico de los sistemas de riego por goteo. Memorias del IV Seminario Latinoamericano «riego por goteo y riego localizado». Barquisimeto, Venezuela. p. 3.2.120–3.2.144.
- _____. 1997. Tecnificación del riego presurizado. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Comisión Nacional del Agua (CNA). pp. 91-139.
- Pillsburg, A.F. 1968. El Empleo del Riego por Aspersión. FAO. Cuadernos de Fomento Agropecuario No. 68. Roma, Italia.
- Ramírez C., C. E. y M. E. Escobar A. 1978. Funcionamiento hidráulico de accesorios y dispositivos de sistemas de riego por goteo, II Seminario Nacional sobre Riego por Goteo Memorias Tomo 1, Región Lagunera Coah. y Dgo. México. pp. 43-54.
- Ramírez C., C. E., M. A. Escobar A. y L. Moreno D. 1978. Funcionamiento hidráulico de líneas regantes. Memorias del II Seminario Nacional sobre Riego por Goteo. Tomo 1. Región Lagunera, Coah. y Dgo. México. p 55-75.
- Russell, E. G. 1979. Hidráulica. Primera edición. Editorial CECSA. México, D. F.
- Sánchez C., I. 2004. Incremento en la eficiencia global en los distritos de riego del norte del país. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA INIFAP). Proyecto nacional. SAGARPA-CONACYT. Gómez Palacio, Dgo., México.
- Sotelo A., G. 1982. Hidráulica general. Volumen 1. Fundamentos. Editorial Limusa. México, D. F.

Valenzuela R., T. 1971. Principios Básicos del riego por goteo. Memorándum Técnico No. 256. SARH., México, DF.

World Water Institute. 1993. World water resources 1992–1993. Oxford University Press. New York.

Zimmermann, J. D. 1970. El Riego. Editorial. CECSA S. A. México. D. F.

Editora: Ing. Raquel Anguiano Gallegos

Comité Editorial del CENID-RASPA

Presidente: Dr. José A. Cueto Wong
Secretario: Ing. Raquel Anguiano Gallegos
Vocales: Dr. Guillermo González Cervantes
M. C. Miguel Rivera González
Dr. Juan Estrada Ávalos

Editor Técnico:
Dra. Ma. Magdalena Villa Castorena

Esta publicación se terminó de imprimir en el mes de
noviembre del 2007 en los talleres del Grupo Colorama
de Torreón, Coahuila.

Su tiraje consta de 600 ejemplares

$$q = k H^x$$

$$H_o = \left[\bar{q} / k (0.9)^{1/2} \right]^{1/x}$$

$$\Delta H = (1 - 0.9^{1/x}) H_o$$

$$H_t = \left| \frac{10.29 C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2} \right| \bar{q}^2 N^3 \text{ CSM}$$

$$N = \left| \frac{H_t}{\frac{10.29 C^2 S}{D^{16/3}} + \frac{K_g}{2gA^2}} \right| \bar{q}^2 \text{ CSM}^{1/3}$$

CENID-RASPA

Km 6.5 margen derecha canal Sacramento

Gómez Palacio. Durango. MÉXICO.

Apdo. Postal 41, Cd. Lerdo, Dgo.

Tels. y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: roman.abel@inifap.gob.mx