

DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO POR SUPERFICIE Y PRESURIZADOS



www.cidepro.org

Marlon Víctor Pazos Roldán

Marlon Víctor Pazos Roldán

DISEÑO DE SISTEMAS DE RIEGO
POR SUPERFICIE Y PRESURIZADOS

IRRIGATION SYSTEM DESIGN
SURFACE AND PRESSURIZED

Marlon Víctor Pazos Roldán

Diseño de sistemas de riego
por superficie y presurizados

Irrigation system design
surface and pressurized



Autores:

Marlon Víctor Pazos Roldán
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Universidad Técnica de Babahoyo
mpazos@utb.edu.ec
 <https://orcid.org/0000-0001-6798-8736>

Advertencia: Está prohibido, bajo las sanciones penales vigentes que ninguna parte de este libro puede ser reproducida, grabada en sistemas de almacenamiento o transmitida en forma alguna ni por cualquier procedimiento, ya sea electrónico, mecánico, reprográfico, magnético o cualquier otro sin autorización previa y por escrito del Centro de Investigación y Desarrollo Profesional (CIDEPRO).



Primera Edición, mayo 2021

*Diseño de sistemas de riego
por superficie y presurizados*

ISBN: 978-9942-823-72-4 (eBook)

ISSN: 2600-5719 (electronic)

<https://doi.org/10.29018/978-9942-823-72-4>

Editado por:

Centro de Investigación y Desarrollo Profesional

© **CIDPRO Editorial 2021**

Babahoyo, Ecuador

Móvil - (WhatsApp): (+593) 9 8 52-92-824

www.cidepro.org

E-mail: editorial@cidepro.org

Este texto ha sido sometido a un proceso de evaluación por pares externos con base en la normativa editorial de CIDPRO.

Diseño y diagramación:

CIDPRO Editorial

Diseño, montaje y producción editorial:

CIDPRO Editorial

Hecho en Ecuador

Made in Ecuador

ÍNDICE

| | |
|-------------------|------|
| PRÓLOGO | XII |
| PROLOG..... | XIII |
| INTRODUCCIÓN..... | XIV |

CAPÍTULO 1

| | |
|--|----|
| RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA..... | 17 |
| Características físicas del suelo que afectan a la retención del agua | 17 |
| Textura | 17 |
| Profundidad efectiva radicular..... | 18 |
| La Evapotranspiración | 21 |
| Evapotranspiración de los cultivos, etc..... | 21 |
| Cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia | 22 |
| Método de Blaney-Criddle..... | 22 |
| Coefficiente de cultivo Kc..... | 23 |
| Ejemplo | 25 |
| Datos climatológicos..... | 25 |
| Cálculo del factor f de Blaney Criddle | 25 |
| Cálculo de la ETo..... | 26 |
| Capacidad de retención de humedad del suelo | 28 |
| Curva de retención de la humedad en el suelo..... | 28 |
| Conceptos básicos | 29 |
| Lámina de riego | 29 |
| Frecuencia de riego..... | 29 |

| | |
|--|----|
| Requerimiento hídrico de los cultivos | 29 |
| Estrés hídrico para inducir la floración | 30 |
| Estrés hídrico en los cítricos | 31 |

CAPÍTULO 2

| | |
|--|----|
| MÉTODOS DE RIEGO..... | 35 |
| Métodos de riego superficiales..... | 35 |
| Sistemas de riego por gravedad | 37 |
| Sistema de riego por surcos | 39 |
| Riego por superficie en terrenos sin pendiente | 41 |
| Pileta rectangular o melga a cero. (En ella se practica el riego por “inundación”)..... | 42 |
| Longitudes y áreas de orientación para anteproyectos de riego a cero | 50 |
| Riego con pendiente..... | 57 |
| Riego por melgas | 58 |
| Riego por melgas en pendiente..... | 58 |
| Pendientes uniformes o crecientes en melgas..... | 59 |
| Largo de las unidades de Riego y Caudal de escurrimiento | 62 |
| Cálculo del caudal de infiltración para una melga | 66 |
| Diseño de melgas con base en ecuaciones empíricas | 70 |
| Datos de diseño | 70 |
| Ejemplo | 71 |
| Diseño de riego por melgas primer método..... | 72 |
| Diseño de riego por melgas segundo método | 77 |

| | |
|--|----|
| Riego por surcos | 82 |
| Riego por surco a nivel cero | 82 |
| Topografía..... | 87 |
| Longitudes de surcos angostos en pendiente | 89 |
| Diseño de riego por surcos..... | 90 |
| Adaptación y diseño..... | 91 |
| Diseño riego por surco primer método | 92 |
| Diseño riego por surco segundo método..... | 94 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--|-----|
| RIEGO POR ASPERSIÓN..... | 101 |
| Ventajas | 101 |
| Desventajas | 102 |
| Equipos de bombeo..... | 102 |
| Componentes del sistema de riego por aspersión | 104 |
| Tipos de sistemas de riego por aspersión..... | 105 |
| Tipos de aspersores | 105 |
| Distribución del agua sobre el suelo | 107 |
| Disposición de los aspersores | 108 |
| Espaciamiento según la disposición..... | 109 |
| Determinación del diámetro de la tubería principal..... | 110 |
| Metodología para la determinación de diámetro económico óptimo para un sistema de riego por aspersión | 110 |
| Diámetro óptimo económico | 111 |
| Ejemplo | 112 |

| | |
|---|-----|
| Solución | 113 |
| Cálculo del costo de la energía | 114 |
| Cálculo del diámetro económico | 114 |
| Análisis de la inversión | 114 |
| Cálculo de la tubería alimentadora de la subunidad de riego | 115 |
| Laterales alimentadas por un punto intermedio | 115 |
| Clasificación de los sistemas de aspersión..... | 119 |
| Tipos de sistemas de riego por aspersión..... | 119 |
| Sistemas estacionarios | 120 |
| Sistemas de desplazamiento continuo..... | 122 |
| Tuberías..... | 123 |
| Características | 123 |
| Características del PVC | 124 |
| Presión nominal (PN)..... | 124 |
| Coefficiente de uniformidad..... | 124 |
| Diseño Sistema de Riego subfoliar | 126 |
| Diseño de las unidades de riego..... | 131 |
| Determinación del punto de alimentación de las líneas regantes de una subunidad de riego con pendiente | 135 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|-----|
| BALANCE HÍDRICO Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO | 141 |
| Cálculo de la unidad de riego..... | 142 |
| Programación del riego..... | 144 |
| Programación del riego..... | 145 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--|-----|
| INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO..... | 148 |
| Selección de bombas..... | 148 |
| NPSH (Net Positive Suction Head) | 149 |
| NPSH disponible..... | 150 |
| Cavitación | 151 |
| Bombas e instalaciones del equipo | 152 |
| Partes constitutivas de la Bomba sumergible..... | 154 |
| Tablero de control | 155 |
| Izado del equipo..... | 155 |
| Elementos constitutivos de las bombas centrífugas..... | 155 |
| Curva característica de una bomba | 157 |
| Curva NPSH - Caudal..... | 158 |
| Generar la curva característica..... | 158 |
| Selección de una bomba..... | 159 |
| Instrucciones de alineación bomba-unidad motriz | 161 |
| Realice la alineación angular para una corrección horizontal | 162 |
| Realice la alineación en paralelo para la corrección vertical..... | 164 |
| Modelo de caseta de la estación de bombeo | 166 |
| Solución a posibles problemas..... | 167 |
| ANEXOS | 169 |
| ACERCA DE LOS AUTORES | 171 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 172 |

PRÓLOGO

Si bien existen muchos libros de riego, el presente libro, se enfoca sobre el diseño de sistema de riego por gravedad y por aspersión, específicamente en algunos puntos que otros libros no lo presentan de forma adecuada.

El primer capítulo trata sobre la relación suelo-agua-planta, en el segundo capítulo sobre los diferentes métodos y sistemas de riego, y tratando específicamente al diseño de riego por melgas, por surcos y por aspersión.

En el capítulo concerniente a riego por aspersión se analiza sobre el diseño técnico de las unidades de riego y la distribución de la red de tuberías y su coste e inversión en el proyecto de instalación y manejo del sistema de riego.

Este libro trata de abordar el diseño de estos sistemas de la forma más práctica y sencilla posible.

En el último capítulo se analiza la instalación y mantenimiento del equipo motobomba.

PROLOG

Although there are many irrigation books, this book focuses on the design of gravity and sprinkler irrigation systems, specifically on some points that other books do not present adequately.

The first chapter deals with the soil-water-plant relationship, in the second chapter with the different irrigation methods and systems, and dealing specifically with the design of irrigation by furrow, furrow and sprinkler irrigation.

The chapter on sprinkler irrigation discusses the technical design of the irrigation units and the distribution of the pipe network and its cost and investment in the project of installation and management of the irrigation system.

This book tries to approach the design of these systems in the most practical and simple way possible.

The last chapter discusses the installation and maintenance of the motor pump equipment.

INTRODUCCIÓN

El agua que requieren los cultivos es aportada en forma natural por las precipitaciones, pero como su distribución, frecuencia y cantidad no coincide con los periodos de máxima demanda de las plantas, es necesario aportarla artificialmente, a través del riego.

El agua es imprescindible para el desarrollo de las actividades agropecuarias, así como de la industria y manufactura, por consiguiente, el uso eficiente y eficaz de este recurso permitirá alcanzar los más altos rendimientos y producción requeridos en las industrias; preservando este recurso muy escaso ypreciado como es el agua.

El riego, se considera como una ciencia milenaria, en algunos países el riego se estableció como una actividad de vital importancia, entre los casos de pueblos con vocación en la irrigación se tienen a los antiguos egipcios, chinos, babilonios, incas e hindúes.

Para regar eficientemente se tiene que saber cuánto, cuándo y cómo regar.

Para saber cuánto, cuándo y cómo regar, se requiere conocer las relaciones fundamentales entre el agua, el suelo, la planta y la atmósfera; junto con la mecánica de fluidos, la climatología, la fisiología vegetal y el apoyo de la computación.

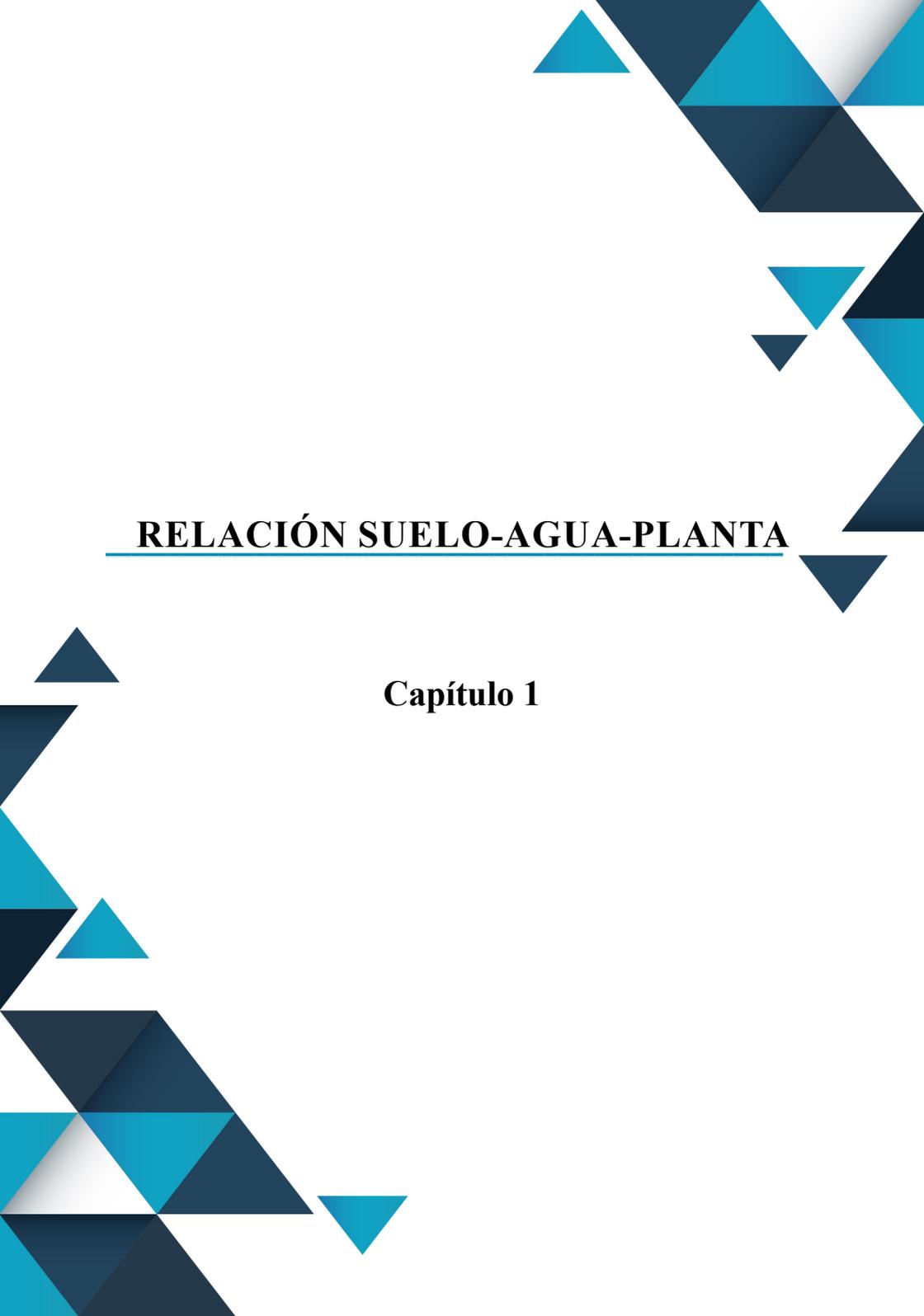
El cuánto regar está relacionado con la cantidad de agua a aplicar en cada riego, para lo cual se requiere conocer la capacidad de almacenaje de agua del suelo (agua aprovechable), y la facilidad que dicho suelo tiene para absorber agua (infiltración) durante el tiempo de riego.

El cuándo regar se relaciona con la frecuencia con que se riega un mismo lugar; es decir, está relacionado con el tiempo que transcurre entre un riego y el próximo (intervalo de riego). Esta pregunta se puede responder en base al conocimiento de la disponibilidad neta de agua en el perfil del suelo, y de la velocidad de consumo de dicha humedad por parte del cultivo y malezas (evapotranspiración).

El cómo regar se refiere a la forma de aplicar el agua al suelo, es decir se relaciona con el método de riego a utilizarse. Para responder esta pregunta se requiere conocer las diferentes técnicas de riego, tanto del riego gravitacional como presurizado: surcos, melgas, piscinas, aspersión, microaspersión, goteo, etc.



Figura 1. Escasez del agua en el mundo
Tomada de Emaze.com (Emaze.com s.f.)



RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

Capítulo 1

RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

Características físicas del suelo que afectan a la retención del agua

El suelo es un sistema complejo compuesto por partículas sólidas (minerales y orgánicas), agua con sustancias en disolución (solución del suelo) y aire. El aire y la solución del suelo ocupan los espacios o poros comprendidos en la matriz sólida.

Las principales características físicas del suelo que afectan a la retención del agua son: textura, estructura y porosidad.

Textura

La porción mineral del suelo está formada por partículas que, según su tamaño, se clasifican en: arena (de 2 a 0.05 mm), limo (de 0.05 a 0.002 mm) y arcilla (inferior a 0.002 mm).

La textura de un suelo se refiere a la proporción relativa de arena, limo y arcilla que contiene. Dependiendo de su textura, los suelos se clasifican en arenosos, limosos o arcillosos, según predomine cada uno de los distintos componentes. Un suelo es de textura franca cuando contiene una mezcla de arena, limo y arcilla en proporción equilibrada. El análisis granulométrico, que da los porcentajes en peso de arena, limo y arcilla, determina las distintas clases de textura, que vienen definidas en el triángulo de texturas de la figura 1-2.

El agua ocupa total o parcialmente los poros comprendidos entre las partículas sólidas. Esta agua es absorbida por las raíces de las plantas, por lo que debe ser periódicamente repuesta por la lluvia o mediante

el riego. Por tanto, el suelo sirve de almacén o depósito de agua. La capacidad del suelo para almacenar agua es uno de los principales factores que influyen en la cantidad de agua de riego y la frecuencia de su aplicación.

El programa Texture AutoLookup (TAL) permite determinar la clase textural de un suelo. Se puede descargar este software desde: https://download.cnet.com/Texture-AutoLookup-TAL/3000-2054_4-10144157.html

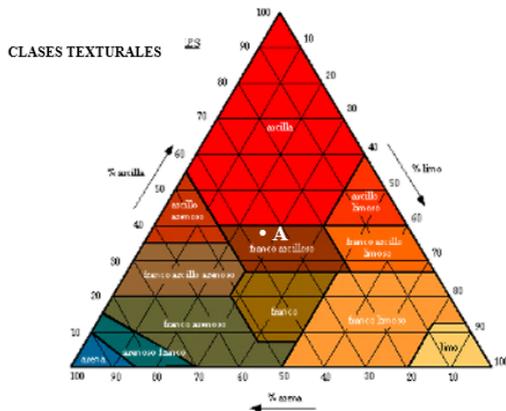


Figura 2. Triángulo de texturas para determinar la clasificación de los suelos según su textura. El triángulo está dividido en 12 áreas, correspondientes a las distintas clases de textura según el USDA en función de los porcentajes en peso de arena, limo y arcilla.

Profundidad efectiva radicular

La profundidad de las raíces está determinada por una serie de factores, tales como: características genéticas del cultivo, características del suelo (textura, estructura, presencia de capas impermeables, etc.), nivel de agua en el suelo, nutrientes, oxígeno, etc. Cuando la planta crece en un suelo adecuado y existan buenas condiciones de cultivo, el rendimiento del mismo será el máximo posible.

La profundidad total del sistema radical es característica de cada especie, cuando el suelo es profundo y homogéneo, pero varía según diversos factores, tales como el nivel de humedad en el suelo en la primera fase del desarrollo, la proximidad a la capa freática, la existencia de horizontes calizos u otras capas duras o impermeables, fitonematodos, etc.

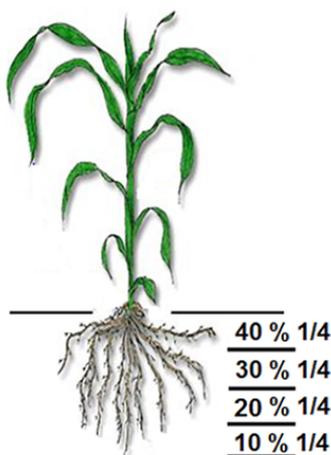


Figura 3. Distribución del Sistema radicular de una planta de maíz

Tabla 1. Profundidad efectiva de las raíces de diversos cultivos

| Cultivo | Profundidad efectiva (cm) | fag | Cultivo | Profundidad efectiva (cm) | fag |
|-------------|---------------------------|------|----------|---------------------------|------|
| Ají (Chile) | 40 – 80 | 0,30 | Melón | 50 – 70 | 0,45 |
| Banano | 50 – 80 | 0,35 | Palma | 70 – 110 | 0,55 |
| Cebolla | 20 – 35 | 0,30 | Papa | 40 – 60 | 0,35 |
| Cereales | 70 – 130 | 0,45 | Pepino | 40 – 90 | 0,50 |
| Cítricos | 80 – 110 | 0,50 | Pimiento | 50 – 90 | 0,35 |
| Fréjol | 35 – 65 | 0,45 | Piña | 50 – 60 | 0,50 |

| | | | | | |
|------------------|----------|------|-------------|----------|------|
| Fresa | 15 – 25 | 0,20 | Repollo | 35 – 45 | 0,45 |
| Maíz | 75 – 110 | 0,40 | Soya (soja) | 80 – 120 | 0,50 |
| Otras hortalizas | 30 – 60 | 0,40 | Tomate | 80 – 140 | 0,40 |

Adaptado del manual FAO Crop Evapotranspiration (FAO 2000)

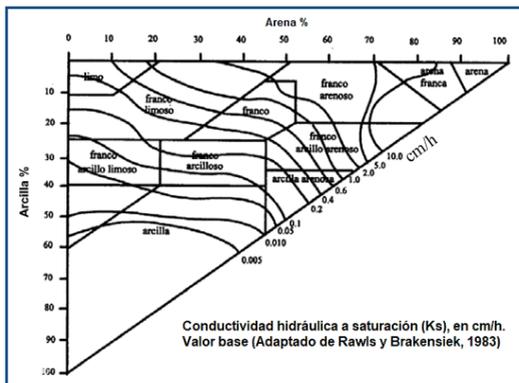


Figura 4. Conductividad hidráulica a saturación (Ks) según la textura del suelo.

Tomado de: Riego por gravedad. (SAGARPA 2010)

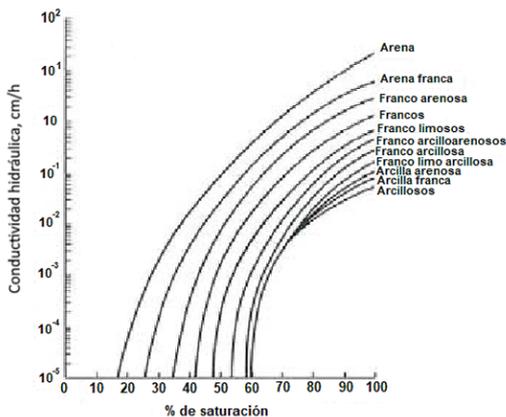


Figura 5. Conductividad hidráulica según la textura del suelo y el porcentaje de saturación

Tomado de: Simulación 1D del flujo no saturado en suelo loésico. (Veizaga, E. 2015)

La Evapotranspiración

Para determinar la cantidad de agua que hay que reponer al suelo mediante riego, se requiere conocer la evapotranspiración (Et) o más específicamente el consumo de agua de los cultivos. Es necesario señalar que hoy gracias a la ayuda de la informática se puede obtener rápidamente esta información como es el caso del programa Cropwat de la FAO o base de datos que se encuentran disponibles en las páginas Web de las Instituciones relacionadas con el desarrollo de recursos naturales.

Evapotranspiración de los cultivos, etc.

La evapotranspiración determina la cantidad de agua consumida por el cultivo entre dos riegos consecutivos, y se define como la suma de la transpiración realizada por la planta y la evaporación de agua producida desde el suelo. Según el Estudio FAO, Riego y Drenaje N° 24, la evapotranspiración del cultivo se expresarse como:

$$E_{tc} = E_{to} \times K_c$$

E_{tc} = evapotranspiración del cultivo, mm/día

E_{to} = evapotranspiración de referencia, mm/día

K_c = coeficiente de cultivo, adimensional

La evapotranspiración es el fenómeno conjunto de evaporación y transpiración desde el suelo y la vegetación, respectivamente. La causa de utilizar un único concepto para un proceso dual se debe a la complejidad de separar ambos cuando el cultivo está desarrollado.

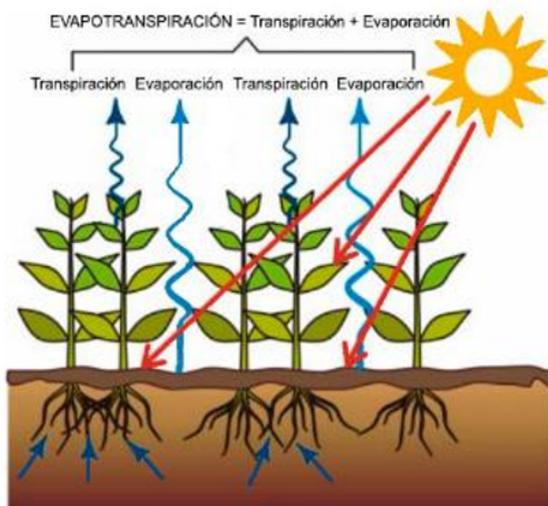


Figura 6. Fenómeno de evapotranspiración. Tomado de Singular Green (2016)

Cálculo de la evapotranspiración del cultivo de referencia

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) se calcula por diferentes métodos:

Blaney Criddle,

Penman modificado por la FAO

Tanque evaporimétrico.

Método de Blaney-Criddle

Este método se aplica para periodos de un mes. Se parte de la fórmula:

$$ET_o = K \times f$$

$K = f$ (HR, velocidad del viento, duración de horas luz)

$$f = p (0.46 t + 8.13)$$

f = Factor de Blaney-Criddle, expresado en mm de agua diarios. Tiene el mismo valor para todos los días del mes considerado.

Donde:

T= Temperatura media mensual, en °C

P = Tanto por uno de horas diurnas del mes respecto de las totales (Ver Tabla 2)

Tabla 2. Porcentaje de horas luz en el día por mes en relación a los meses del año.

| Latitud Sur | Ene. Jul. | Feb. Ago. | Mar. Sep. | Abr. Oct. | May. Nov. | Jun. Dic. | Jul. Ene. | Ago. Feb. | Sep. Mar. | Oct. Abr. | Nov. May. | Dic. Jun. |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0° | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 |
| 1°42' | 0.274 | 0.274 | 0.274 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.274 | 0.274 | 0.274 |
| 5° | 0.28 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.28 |
| 10° | 0.29 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.27 | 0.28 | 0.28 | 0.29 |
| 15° | 0.29 | 0.28 | 0.28 | 0.27 | 0.26 | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.29 |
| 20° | 0.30 | 0.29 | 0.28 | 0.26 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.30 |
| 25° | 0.31 | 0.29 | 0.28 | 0.26 | 0.25 | 0.24 | 0.24 | 0.26 | 0.27 | 0.29 | 0.30 | 0.31 |
| 30° | 0.31 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.24 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.27 | 0.29 | 0.31 | 0.32 |
| 35° | 0.32 | 0.30 | 0.28 | 0.25 | 0.23 | 0.22 | 0.23 | 0.25 | 0.27 | 0.29 | 0.31 | 0.32 |
| 40° | 0.33 | 0.31 | 0.28 | 0.25 | 0.22 | 0.21 | 0.22 | 0.24 | 0.27 | 0.30 | 0.32 | 0.34 |
| 42° | 0.33 | 0.31 | 0.28 | 0.25 | 0.22 | 0.21 | 0.21 | 0.24 | 0.27 | 0.30 | 0.33 | 0.34 |
| 44° | 0.34 | 0.31 | 0.28 | 0.25 | 0.22 | 0.20 | 0.21 | 0.24 | 0.27 | 0.30 | 0.33 | 0.35 |
| 46° | 0.34 | 0.32 | 0.28 | 0.24 | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.23 | 0.27 | 0.30 | 0.34 | 0.35 |
| 48° | 0.35 | 0.32 | 0.28 | 0.24 | 0.21 | 0.19 | 0.20 | 0.23 | 0.27 | 0.31 | 0.34 | 0.36 |
| 50° | 0.35 | 0.32 | 0.28 | 0.24 | 0.20 | 0.18 | 0.19 | 0.23 | 0.27 | 0.31 | 0.34 | 0.36 |

Adaptado de: Técnicas de riego (Fuentes, J. y García, G. 2000).

Coficiente de cultivo Kc

El Kc del cultivo varía con la especie, edad del cultivo, época de siembra. El Kc aumenta cuando la velocidad del viento aumenta, las temperaturas son altas y la humedad relativa es baja. Muestra la condición fenológica del cultivo y consta de 4 etapas:

Inicial, desarrollo, mediados de temporada y final o maduración.

Tabla 3. Valores de Coeficiente de cultivo (Kc)

| CULTIVO | FASE DEL CULTIVO | | | |
|-----------|------------------|------------|----------|-------|
| | Inicio | Desarrollo | Mediados | Final |
| | 15 - 17% | 25% | 33 - 35% | 25% |
| Arveja | 0.45 | 0.75 | 1.15 | 1.00 |
| Avena | 0.35 | 0.75 | 1.10 | 0.40 |
| Cebada | 0.35 | 0.75 | 1.10 | 0.65 |
| Cebolla | 0.45 | 0.70 | 1.05 | 0.75 |
| Lechuga | 0.45 | 0.60 | 1.00 | 0.90 |
| Maíz | 0.40 | 0.80 | 1.15 | 0.70 |
| Melón | 0.45 | 0.75 | 1.15 | 0.85 |
| Papa | 0.45 | 0.75 | 1.15 | 0.85 |
| Pimiento | 0.35 | 0.70 | 1.05 | 0.90 |
| Remolacha | 0.40 | 0.80 | 1.15 | 0.80 |
| Sandía | 0.45 | 0.75 | 1.00 | 0.70 |
| Soya | 0.35 | 0.75 | 1.10 | 0.60 |
| Sorgo | 0.35 | 0.75 | 1.10 | 0.65 |
| Tabaco | 0.35 | 0.75 | 1.10 | 0.90 |
| Tomate | 0.45 | 0.75 | 1.15 | 0.80 |
| Trigo | 0.35 | 0.75 | 1.15 | 0.45 |
| Zanahoria | 0.45 | 0.75 | 1.05 | 0.90 |

Fuente: Evapotranspiración del cultivo (FAO 2000)

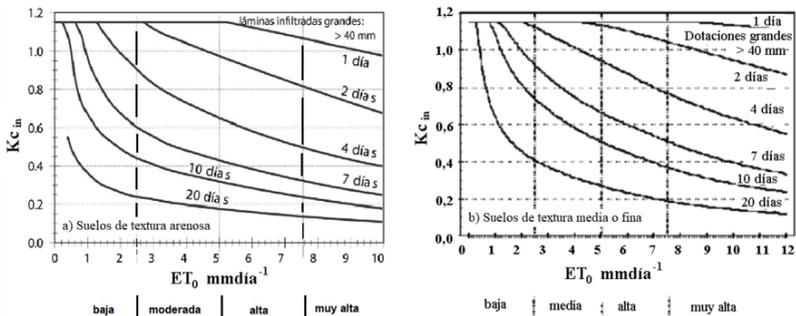


Figura 7. Diagrama para el cálculo de Kc inicial en función del intervalo entre humedecimientos del suelo (días) y de la evapotranspiración de referencia (ET₀, mm/día) para grandes dotaciones o láminas de agua infiltradas mayores a 40 mm.

Fuente: El Riego y sus Tecnologías (Santos, L. et. al. 2010)

Ejemplo

Calcular la evapotranspiración del cultivo de tomate sembrado en suelo franco limoso (CC = 21%, PMP = 7.1% Vi = 38 mm/h y Da= 1.42 g/cm³), se sembrará el 2 de julio.

Datos climatológicos

| Mes | T media °C | EVap | HR |
|-------|------------|--------|------|
| Julio | 25.3 | 84.7 | 78.0 |
| Agos | 25.1 | 83 | 77.0 |
| Sept | 25.8 | 90.9 | 74.0 |
| Oct | 25.5 | 89.4 | 74.0 |
| Nov | 25.7 | 108.17 | 71.7 |

Cálculo del factor f de Blaney Criddle

Julio: $f = p (0.46 t + 8.13) = 0.27(0.46 \cdot 25.3 + 8.13) = 5.34$

Ago: $f = p (0.46 t + 8.13) = 0.27(0.46 \cdot 25.1 + 8.13) = 5.33$

Sep: $f = p (0.46 t + 8.13) = 0.27(0.46 \cdot 25.8 + 8.13) = 5.40$

Oct: $f = p (0.46 t + 8.13) = 0.274(0.46 \cdot 25.5 + 8.13) = 5.44$

Cálculo de la ETo

$$ET_c = K_c * ETo$$

| Mes | Década | Etapa | Kc | ETo | ETc |
|-----|--------|---------|------|--------|--------|
| | | | coef | mm/dec | mm/dec |
| Jul | 1 | Inicial | 0.43 | 30 | 12.9 |
| Jul | 2 | Inicial | 0.43 | 30 | 12.9 |
| Jul | 3 | Desarr | 0.45 | 30 | 13.5 |
| Ago | 1 | Desarr | 0.52 | 30 | 15.6 |
| Ago | 2 | Desarr | 0.70 | 30 | 21 |
| Ago | 3 | Media | 0.90 | 30 | 27 |
| Sep | 1 | Media | 1.02 | 34 | 34.68 |
| Sep | 2 | Media | 1.00 | 34 | 34 |
| Sep | 3 | Media | 0.92 | 34 | 31.28 |
| Oct | 1 | Final | 0.83 | 31 | 25.73 |
| Oct | 2 | Final | 0.73 | 31 | 22.63 |
| Oct | 3 | Final | 0.43 | 31 | 13.33 |
| | | | | | 264.55 |

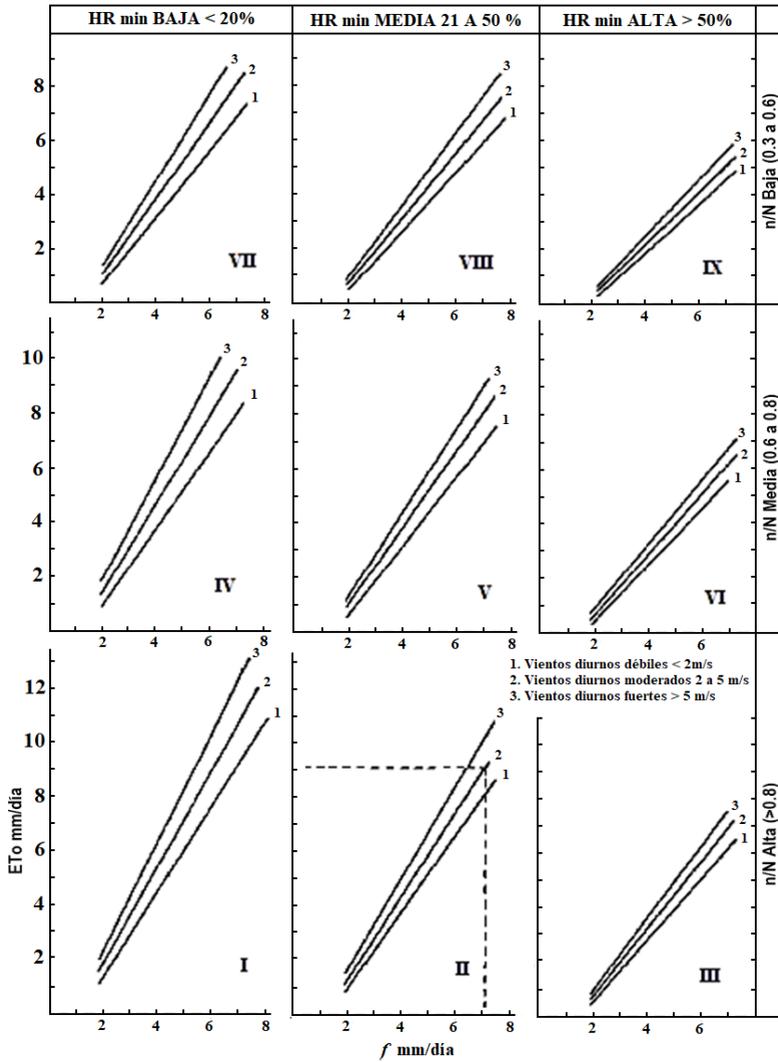


Figura 8. Interacciones entre el factor f de Blaney Criddle, la humedad relativa, las horas de insolación diaria y la velocidad de los vientos diurnos con la ETo

Capacidad de retención de humedad del suelo

Se define como el contenido de humedad que el suelo es capaz de retener entre los límites conocidos como capacidad de campo (CC), y marchitez permanente (PMP). Esta agua retenida en el suelo también se denomina agua disponible o agua aprovechable para la planta (AA).

Curva de retención de la humedad en el suelo

La curva de retención de la humedad representa la evolución del contenido de agua en el suelo en función de la fuerza de retención o fuerza matricial de succión que el suelo ejerce sobre el agua contenida en él. Su forma depende de la textura, estructura y contenido de materia orgánica en el suelo.

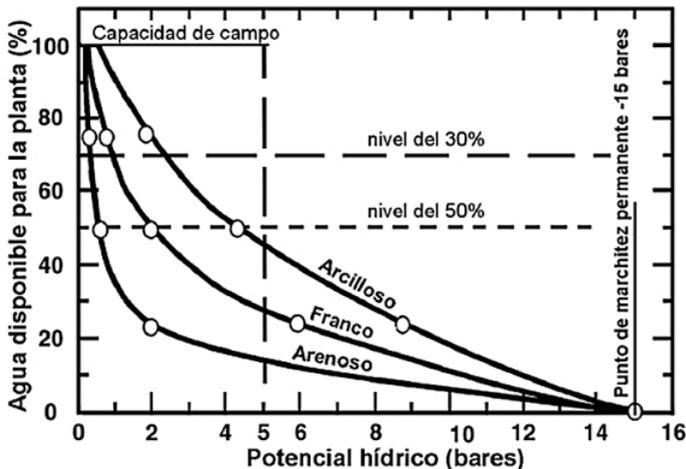


Figura 9. Curvas de retención de la humedad. Tomado de Revista UA (Martin, E. 2017)

Conceptos básicos

Lámina de riego

El suministro de agua al cultivo debe incluir además de las necesidades netas de la planta, toda el agua que se pierde por escorrentía, evaporación, arrastre del viento, entre otros. Esta lámina se conoce con el nombre de lámina bruta.

Frecuencia de riego

La frecuencia indica cada cuanto día se regará un cultivo durante una determinada fase del mismo. La frecuencia se expresa en días.

Requerimiento hídrico de los cultivos

El requerimiento hídrico de los cultivos es el consumo de agua (ETc) que una planta debe extraer del suelo (o de algún sustrato en hidroponía), a fin de desarrollarse de forma adecuada y producir de manera óptima, generando de esta forma la máxima rentabilidad posible.

Tabla 4. Necesidades hídricas de algunos cultivos

| Cultivo | Requerimiento (mm/ciclo) | |
|------------------------------|------------------------------------|----------------------|
| Arroz | 900 a 1200 (máximo 1400 a 2000 mm) | 1,8 l/s/ha |
| Calabaza (Zapallo) | (150 – 200) 1,2 l/planta/día | 170 l/m ² |
| Girasol | 650 | |
| Maíz | 290 - 550 | |
| Maní | 450 - 700 | |
| Pimiento (Chile dulce) | 360 - 700 | 1 a 2 l/planta/día |
| Pepino | 5 a 6,5 l/planta/día | |

| | | |
|---------------------|---------------------------------------|---|
| Tomate | 350 – 500 4,3 l/planta/día (450mm) | 700 - 1000 mm (surco) |
| Aguacate (Palta) | 500 – 800 2.5 a 5 l/árbol/día | |
| Banano | 1000 - 1300 | 26 litros en días soleados, 17 litros en seminublados |
| Cacao | 1500 – 2000 | |
| Cítricos | 500 - 1000 | 10, 15, 25, 45 y 65 litros por árbol por día (1ero al 6to (+) año) |
| Mango | 2,3 a 2,9 l/árbol/día | |

Fuente: Adaptado de productividad de algunos cultivos en Cuba (González, F. et. al. 2014)

Estrés hídrico para inducir la floración

La irrigación, alternada con estrés hídrico en los momentos correctos, puede ser de gran ayuda para aumentar la uniformidad de la producción. Sin embargo, hay que entender cómo ocurre este fenómeno y sus efectos.

En el caso de las orquídeas, por ejemplo, la ausencia de agua pasa el mensaje de un periodo peligroso para la planta, donde es posible que no sobreviva. De esta forma, su reacción natural es intentar reproducirse, de modo que concentra sus esfuerzos en esa misión, con la intención de garantizar la perpetuidad de la especie.

En el cultivo de cítricos, se utiliza ese mismo principio. La floración puede ser programada por la influencia de los periodos de sequía, momento en que los árboles pasan por un momento de baja oferta de agua en el suelo.

Con eso, la planta tiene uno de los factores esenciales para su desarrollo, potenciando la formación de los frutos, una vez que la planta entiende que debe reaccionar para sobrevivir.

Estrés hídrico en los cítricos

Entre los factores que son primarios para el desarrollo vegetativo, son destacados:

Temperatura;

Humedad;

Nutrición.

Cuando los tres elementos tienen perfecta armonía, las yemas del árbol producen nuevas ramas. Sin embargo, si alguno de ellos es privado, la yema produce flores y así se influye en la floración y, a su vez, la cantidad de frutos.

Para inducir la floración se debe realizar la supresión del riego por un periodo entre 25 y 40 días.

Los periodos adecuados para estresar el cultivo es la época más seca (finales de junio, hasta finales de julio). Por otra parte, cuando las plantas son sometidas a un déficit hídrico aumenta los sólidos solubles; la acidez del jugo, el grosor de la cáscara, y el número de fruta con clareta (grietas).

En la mayoría de los cítricos el periodo de máxima sensibilidad a la falta de agua es el de floración y cuajado de los frutos, seguido del que comprende las fases de crecimiento inicial de los frutos hasta la caída de diciembre.

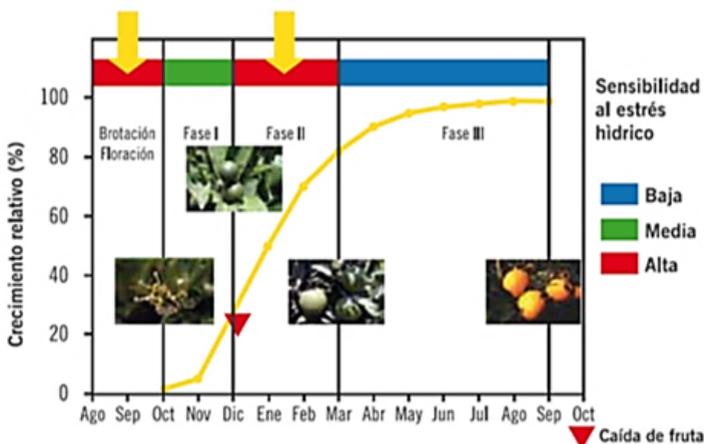


Figura 10. Periodos de máxima sensibilidad al estrés hídrico (Floración y engrose)
Fuente: Algunas consideraciones para el manejo de riego en Cítricos (Ferreyra, R. y Sellés, G. 2009a)

| Parámetro | Control | 20-T | 40-T | 40-P | 40-O |
|------------------------------|---------|--------|--------|--------|---------|
| Riego m ³ /ha-año | 5770 | 4490 | 3330 | 4610 | 4880 |
| Producción Tm/ha | 62.9 a | 57.9 b | 49.4 c | 58.0 b | 50.5 ab |
| Peso medio fruto, g | 162 a | 156 ab | 151 b | 158 a | 160 a |
| No. Frutos/ árbol | 1285 a | 1236 a | 1128 b | 1226 a | 1237 a |
| Azúcares °Brix | 12.0 a | 12.2 a | 12.6 b | 12.0 a | 12.1 a |
| Acidez (g/l) (2) | 7.0 a | 7.4 a | 6.8 a | 6.8 a | 7.6 a |

Producción y componentes de la producción en naranjos Salustiana en función del tratamiento de riego por goteo durante 1985-1992. El espesor medio de la corteza y el contenido de zumo de los frutos no fueron afectados por los tratamientos de riego (Restricción hídrica durante todo el todo el año (T), primavera (floración a cuaja) P y Otoño (Madurez). (Datos de Ferreyra, R. y Selles, G, 2009a)

Investigaciones similares realizadas por González y Castel en el 2003 indican que el Riego deficitario controlado en cítricos, reduce el tamaño de los frutos, pero incrementa sus niveles de grados Brix y la acidez; y afecta de forma relativa al número de frutos por árbol. (González, P. y Castel, J. 2003)



MÉTODOS DE RIEGO

Capítulo 2

MÉTODOS DE RIEGO

La clasificación más común de los métodos de riego, se establece de acuerdo con la forma como el agua es esparcida o distribuida sobre el suelo, dependiendo de las características topográficas, los tipos de cultivo, la disponibilidad del recurso hídrico, los costos y la posibilidad de acceder a tecnologías con altos requerimientos de inversión, entre otros factores.

Métodos de riego superficiales

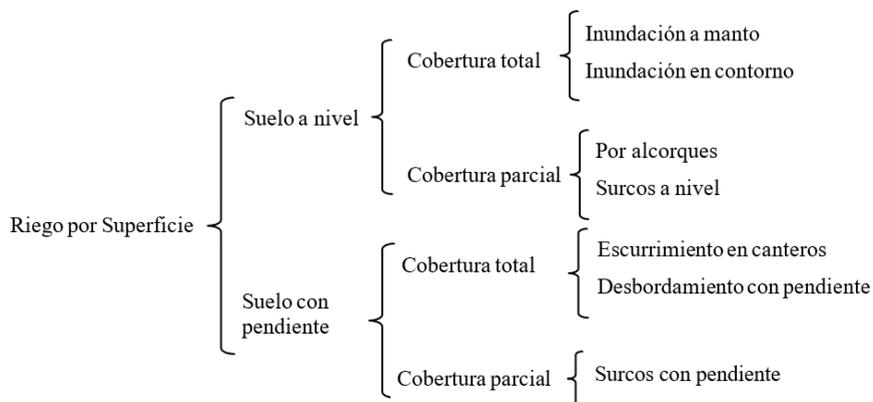
En esta modalidad de riego el agua penetra desde la superficie y se repone a intervalos de tiempo, generalmente de varios días, toda vez que la lámina de agua consumida alcanza un espesor adecuado para su manejo eficiente. De esta forma el agua penetra en el suelo a medida que escurre sobre el terreno.

En el riego por superficie desde una reguera ubicada en la cabecera de la parcela, se suministra un caudal que excede la capacidad de infiltración del área de la parcela, de manera que el sobrante superficial, resultante para cada posición de avance del frente de agua, permite llegar al final y completar el proceso de “mojado” de la parcela. Luego se continúa la aplicación del agua en su justo tiempo, se logra reponer el déficit de humedad en la zona radical.

En los métodos de riego por superficie, cabe hacer un distingo entre aquellos en los cuales el agua escurre por pequeños cauces artificiales o surcos, y aquellos en los cuales el caudal fluye en forma de un manto

de agua de reducido espesor y ancho considerable: riego por manto o por inundación.

En el siguiente cuadro se resumen las diferentes variantes que tienen los métodos de riego por superficie.



| Clase textural | Umbral de riego | |
|--------------------------|-------------------|-------------------|
| | Riego tradicional | Riego tecnificado |
| Arenoso | 20 – 40% | 20 – 30% |
| Franco | 30 – 60% | 30 – 40% |
| Arcilloso – F. arcilloso | 40 – 60% | 30 – 50% |

Fuente: Como determinar cuánto y cuándo regar. (Conadi 2017)

| | Riego por superficie | Riego por as- presión a alta presión | Riego por as- presión a baja presión | Riego por goteo |
|--------------------|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Costo de inversión | Bajo en terreno plano | Elevado | Elevado | Elevado |

| | | | | |
|---|-------------------|---------|----------------------|-------------|
| Necesidades energéticas (para bombeo) | Bajo o nulo | Elevado | Mediano | Bajo |
| Nivel técnico necesario para la operación y mantenimiento | Bajo | Mediano | Mediano | Elevado |
| Carga de trabajo para la operación | Elevado | Bajo | Mediano | Bajo |
| Eficiencia del riego | Baja (50 – 70%) | Elevada | De mediana a elevada | Muy Elevada |
| Costo del riego (por hora de trabajo) | De bajo a mediano | Elevado | De mediano a elevado | Elevado |

Cuadro 1. Características de los diferentes sistemas de riego
Tomado de: (Corrazón, R. 2007)

Sistemas de riego por gravedad

En el riego por superficie o gravedad los suelos deben poseer pendientes longitudinales uniformes: En estos sistemas de riego están: el sistema de riego por inundación, el riego por melgas, el riego por surcos y el riego por alcorques.

En el riego por inundación, se nivelan grandes lotes de terreno (piscinas) que se hayan separadas unas de otras por camellones o muros, en este

sistema el agua permanece formando una lámina sobre el suelo, las piscinas suelen tener pendientes longitudinales menores al 4%.

En los riegos por melgas, los terrenos se dividen en franjas de 4 a 25 o 35 m de ancho y de 50 a 400 metros de largo, el agua no permanece inundando el suelo.

En el sistema de riego por surcos, los suelos se preparan formando surcos o bancales.

El método de riego por melgas se utiliza, sobre todo, en cultivos extensivo tales como alfalfa, pastos y cereales. En nuestro medio es muy utilizado en las haciendas ganaderas donde la producción de pasto o alfalfa, dado que el pisoteo del ganado destruye de surcos.

a. Ventajas

- Se requiere poca mano de obra.
- Se puede utilizar caudales grandes, lo que permite un menor tiempo de riego.
- Bajo costo.
- Se pueden construir las melgas con dimensiones adecuadas para una eficiente operación de la maquinaria.
- Se consigue un buen lavado de las sales.

b. Desventajas

- Se requiere una precisa nivelación de los suelos.
- La pendiente en el sentido del fluido del flujo debe ser mayor a 0.2% pero no debe superar el 4%.

- Se requieren caudales relativamente altos, del orden de 2 a 6 l/s/m.
- Son afectados los cultivos sensibles al déficit de aireación.
- Hay dificultad en las labores del cultivo y de la cosecha.

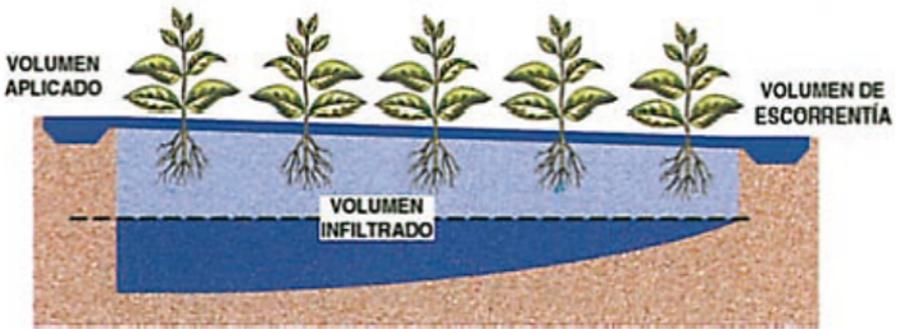
Tabla 5. Superficie de las piscinas para diferentes tipos de suelo y caudales de agua

| Caudal (l/seg) | Suelo arenoso | Fco. arenoso | Fco arcilloso | Arcilloso |
|-------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------|
| 30 | 0.02 has | 0,06 has | 0.12 has | 0.2 has |
| 60 | 0.04 ” | 0.12 ” | 0.24 ” | 0.4 ” |
| 90 | 0.06 ” | 0.18 ” | 0.36 ” | 0.6 ” |
| 120 | 0.08 ” | 0.24 ” | 0.48 ” | 0.8 ” |
| 150 | 0.10 ” | 0.30 ” | 0.60 ” | 1.0 ” |
| 180 | 0.12 ” | 0.36 ” | 0.72 ” | 1.2 ” |
| 210 | 0.14 ” | 0.42 ” | 0.84 ” | 1.4 ” |
| 240 | 0.16 ” | 0.48 ” | 0.96 ” | 1.6 ” |
| 270 | 0.18 ” | 0.54 ” | 1.08 ” | 1.8 ” |
| 300 | 0.20 ” | 0.60 ” | 1.20 ” | 2.0 ” |

Tomado de Hablemos de riego (ConGope 2017)

Sistema de riego por surcos

En esta modalidad, el perímetro mojado es generalmente inferior al espacio que existe entre los surcos; por lo tanto, el área neta de infiltración es inferior al producto del espacio por la longitud del surco. En terrenos de relieve plano o de pendiente uniforme se trazan surcos rectos; mientras que, en terrenos ondulados, los surcos deben seguir un recorrido que se aproxima a las curvas de nivel: surcos en contorno o surcos en curvas de nivel.



Tomado de (Fernández, R. 2010)

Figura 11 Eficiencia del riego por gravedad y el volumen de escorrentía

Otra variante empleada en terrenos de pendiente considerable lo constituye el método por corrugación, el que consiste en surcos pequeños con un espaciamiento reducido.

Este método se adapta especialmente a los cultivos en línea, dado que dicha disposición permita humedecer el volumen de suelo explorado por raíces y acercar o retirar la humedad, conforme al comportamiento y las exigencias del cultivo. Además, en la mayoría de los casos el surco de riego es una consecuencia de las labores culturales.

Tabla 6. Criterios para el diseño de riego por melga

| Textura del suelo y velocidad de infiltración del suelo | Gasto de la melga (lps) | Anchura (m) | Longitud máxima (m) |
|---|-------------------------|-------------|---------------------|
| Arenosa muy alta (mayor a 35 mm/h) | 70 | 3 - 6 | 50 - 100 |
| Franco arenosa alta (20 a 35 mm/h) | 40 a 70 | 6 - 10 | 100 - 130 |
| Migajón limoso mediana (13 a 20 mm/h) | 28 a 56 | 6 - 15 | 130 - 200 |
| Franco arcillosa baja (6 a 13 mm/h) | 14 a 30 | 6 - 20 | 200 - 300 |
| Arcilla fina muy baja (menor a 6 mm/h) | 12 a 29 | 6 - 20 | 200 - 600 |

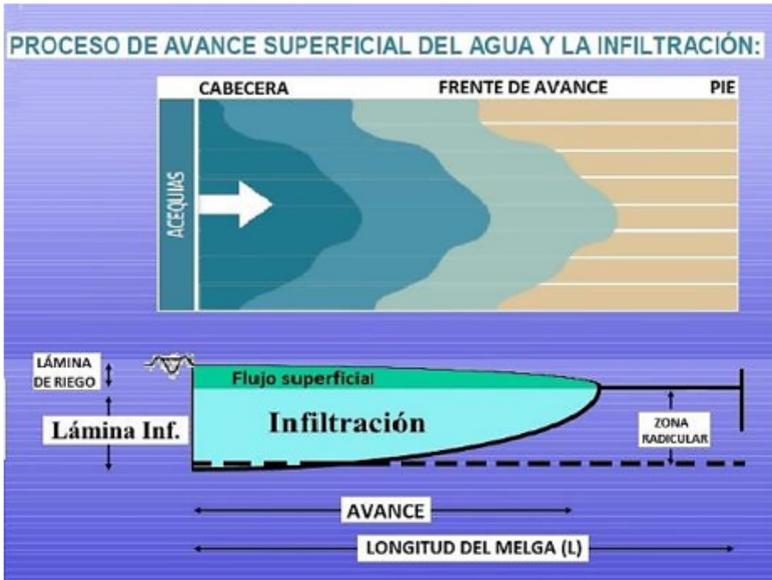
Basado en Diseño de riego superficial por melgas y surcos. Montero (2014)

Riego por superficie en terrenos sin pendiente

En riego sin pendiente se emplea un sólo caudal (el llenado de la unidad de riego) que es superior a la permeabilidad del suelo, entonces el agua se acumula formando carga hidráulica y el tiempo que interesa más, es el de llenado de la unidad. (Romanella, C. 2008)

Las unidades de riego pueden ser rectangulares, cuadradas o redondas y se las suele llamar piletas, bateas, cubetas, piscinas, bancales, palanganas, melgas a nivel cero.

La unidad de riego sin pendiente que más se presta a la motocultura moderna, es la pileta rectangular alargada o piscina a cero.



Pileta rectangular o melga a cero. (En ella se practica el riego por “inundación”)

Consiste en cubrir el suelo por una capa de agua, cuyo espesor está en relación con la lámina de riego que se desee aplicar.

El agua queda embalsada por bordes o diques que rodean las unidades de riego cuyo piso debe ser sensiblemente horizontal.

El número de bordes debe ser el mínimo posible por hectárea.

El agua debe cubrir uniformemente el suelo en toda su extensión sin formar “pozos” ni dejar “islas”, pero necesariamente los bordes que guían la sumersión no deben ser cubiertos por el agua.

El tamaño y forma de la unidad de riego surge de una interacción entre topografía, textura del suelo y necesidades de mecanización.

Por necesidades de mecanización y manejo de riego se aconseja evitar cornijales o esquineros, haciendo que las unidades de riego sean rectas, de lados paralelos, iguales y de la mayor longitud y superficie compatible con las propiedades físicas del suelo y la disponibilidad de caudales y tiempos de riego.

Topografía: La sistematización del terreno para riego “a cero” resulta más económica en pendientes naturales menores del uno y medio por mil (1,5 ‰) o sea quince centímetros en cien metros.

Cuando las pendientes son mayores del 1,5 ‰ la sistematización del terreno para riego “a manto” o “a cero” resulta onerosa por el número de bordes que se deben construir.

La pendiente longitudinal óptima para riego por inundación es cero, por eso el sentido del riego en este método debe ser lo más paralelo posible a las curvas de nivel.

Forma de la unidad de riego: Si las curvas de nivel están muy distanciadas, a tal punto que queda considerarse pendiente escasa en todo sentido, las unidades pueden ser piletas cuadradas o rectangulares anchas con lados tan largos como lo permita la textura del suelo y el caudal disponible.

Si hay pendiente, y el eje de la unidad de riego se hace paralelo a la curva de nivel, el ancho de la unidad debe ser tal que no resulte un desnivel superior a 3 centímetros, entre los futuros bordes paralelos de las mismas (esta diferencia es la que quedará luego entre el piso de una unidad y el piso de la unidad vecina y se la denomina “Tolerancia” El límite de la tolerancia ha sido tomado de los autores DELOYE Y REBOUR (2) quienes proponen 2,6 cm. (Aprox. 1 pulgada: 2,54 cm.) pero que nosotros consideramos 3 cm. por razones prácticas frente a tan pequeña diferencia. En el caso del riego del arroz donde la inundación se requiere principalmente para combatir las malezas, no importa si el agua tiene mayor o menor altura sobre el suelo y la “tolerancia” podrá ser mayor de 3 cm., por ejemplo 6 o 10 cm., lo que permite unidades más anchas.

La tolerancia es la diferencia de nivel (Δh) entre futuros bordes y podemos fijarla. La separación o distancia entre bordes (b) es nuestra incógnita.

Sabemos que la diferencia de nivel dividida por la distancia da el gradiente. Luego la distancia (b) entre futuros bordes, será, igual a la tolerancia de desnivel (Δh) dividida por la pendiente unitaria del terreno o gradiente (S_0).

$$\text{Ancho} = \frac{\text{Tolerancia}}{\text{Pendiente}} \qquad b = \frac{\Delta h}{S_0}$$

Ejemplos:

Si la pendiente del terreno es 6 ‰ ($S = 0,006$) y la tolerancia de desnivel entre bordes (Δh) es 0,03 m., el ancho (b) de la unidad de riego será:

$$b = \frac{\Delta h}{S_0} = \frac{0,03 \text{ m}}{0,006 \text{ m/m}} = 5 \text{ metros}$$

En arroz si fijamos como tolerancia 10 centímetros entre “bordes” o “pretilos” y la pendiente del terreno es 6 ‰, el ancho de las “pozas” será:

$$b = \frac{0,10 \text{ m}}{0,006 \text{ m/m}} = 16,6 \text{ metros}$$

A continuación, se da una tabla obtenida aplicando tolerancia de 3 y 10 centímetros entre el fondo de una unidad y el fondo de la vecina, la primera tolerancia para el cultivo de trigo, lino, forrajeras, algodón, maíz, viñedo, frutales, etc., y la segunda (0,10 m.) para, el cultivo del arroz.

El ancho (b) de la unidad de riego conviene que sea proyectado con múltiplo del ancho máximo de la labor de los implementos de motocultura que se usarán, más un espacio para ubicar el borde entre unidades vecinas.

Tabla 7. Anchos de unidades de riego a cero longitudinal según la pendiente transversal del terreno

| Pendiente transversal del terreno en ‰ | Gradiente (pendiente unitaria) en m/m | Ancho de las unidades de riego | | |
|--|---------------------------------------|---|---|--|
| | | Para una tolerancia de 4 cm entre borde y borde. En metros | Para una tolerancia de 6 cm entre borde y borde. En metros | Para una tolerancia de 10 cm entre borde y borde. En metros |
| 1 | 0,001 | 30,00 (*) | 60,0 (*) | 100,0 (*) |
| 1,5 | 0,0015 | 20,00 | 40,0 (*) | 66,7 (*) |
| 2 | 0,002 | 15,00 | 30,0 | 50,0 |
| 3 | 0,003 | 10,00 | 20,0 | 33,3 |
| 4 | 0,004 | 7,50 | 15,0 | 25,0 |
| 5 | 0,005 | 6,00 | 12,0 | 20,0 |
| 6 | 0,006 | 5,00 | 10,0 | 16,7 |

(*) Anchos entre bordes superiores a 20 m. dificultan el manejo de caudales. En esos casos conviene colocar más de una entrada de agua por unidad.

El ancho del espacio a dejar para bordes depende de la textura del suelo y del cultivo. Si el suelo es arcilloso y el cultivo es arroz el ancho del borde puede ser escaso 0,50 m. a 0,80 m. y su altura apreciable: 0,20 m, a 0,30 m. Si el suelo es franco y los cultivos deben segarse (cortarse) con guadañadoras, conviene que los bordes sean anchos pero bajos: 1 m, a 1,60 m. por 0,15 a 0,20 m, de alto.

Si el suelo es franco arenoso los bordes deben ser anchos 1,50 m. a 1,80 m. por 0,20 a 0,30 m. de alto.

El ancho total de la unidad de riego “a cero” tendrá que tener necesariamente rotación con el caudal disponible. El caudal de escurrimiento debe poder llegar al extremo de la unidad en 1/4 o menos del tiempo de infiltración de la lámina de dotación que se desea incorporar al suelo. (En texturas medias, esto se cumple dando el doble al triple del caudal de infiltración del área de la unidad).

La sistematización del terreno para el método de riego a cero puede hacerse también en pendientes naturales mayores de 1,5 emparejando el terreno en pendiente uniforme en dos sentidos, y seleccionando luego la diagonal en la cual la, pendiente será cero. Pero esto a costa, de mayor movimiento de suelo.

Teóricamente es cierto que anchos de unidades a cero, pueden ser menores a medida que aumenta la pendiente del terreno en el sentido transversal al eje de dicha unidad. Este eje por definición debe ser paralelo a las curvas de nivel.

Esto significa que para facilitar la motocultura, las piletas y melga a cero, sólo podrían proyectarse con lados rectos de cierta longitud, cuando la pendiente sea tan uniforme que las curvas resulten paralelas con escasas inflexiones, o se han rectificadas las curvas de nivel, lo que significa ya un gasto extra.

En la práctica las pendientes no son uniformes en tal grado y en distancias cada vez menores entre curvas de nivel es menos probable que dichas curvas no presenten inflexiones notables que impidan la instalación de unidades rectas suficientemente largas como para que la motocultura, sea eficiente.

Además, dado que el reducido ancho de las unidades fracciona demasiado el área irrigada, o que el espaciamiento entre bordes debe surgir de un logrado equilibrio entre la necesidad de un buen reparto transversal del agua y la necesidad de reducir al mínimo el número de bordes, cuya ejecución y conservación es costosa, y que además dificultan las labores cruzadas del suelo.

Todo lo expuesto es referente al anteproyecto de sistematización o diseño, llegada la, ejecución, una vez marcadas las unidades en el terreno, se las repasa con motoniveladoras dejándolas transversalmente horizontales, no moviendo para ello más de 1,5 cm en terraplén, en cada ancho de unidad de riego quedando en definitiva el piso de una con respecto al piso de la vecina con una, diferencia de nivel de sólo tres (3) centímetros.

Textura: El riego a cero en piletas y melgas se adapta mejor a texturas pesadas. Es el método más adecuado para regar suelos de baja infiltración y para el lavado de suelos.

También se presta para regar suelos de textura franca y arenosa pero las dimensiones de sus unidades de riego resultan reducidas, más

chicas mientras mayor es la infiltración de los suelos, lo cual dificulta la motocultura. (2008)

En cuanto a cohesión mediante la colocación de disipadores de energía a la entrada de las unidades de riego se evitan los problemas de erosión del suelo en cabecera. Para el resto de la unidad no hay problemas de erosión, por ser la pendiente nula.

Largo de la unidad de riego: Fijado el ancho (b o E) de la unidad de riego se puede determinar el largo ideal (l) mediante ensayos de campo midiendo los metros que un caudal máximo no erosivo, avanza en un tiempo iguala $1/4$ del tiempo de infiltración de la lámina que queremos aplicar.

Los resultados de gran número de ensayos de campo indican que la longitud. (L) de las unidades de riego está en relación con la textura del suelo.

Conviene que las unidades sean más largas posibles para economizar vueltas inútiles al equipo de laboreo mecánico.

Como en este método de riego el tiempo de infiltración puede ser grande y además el caudal puede ser elevado sin peligro de erosión, es que el agua puede hacerse llegar rápidamente al pie, por carga, hidráulica a pesar de no haber en el terreno pendiente a favor. Con este método se consiguen eficiencias de riego elevadas, mayores de 85%, como se verá luego cuando se trate el tema “Eficiencia” que es más crítica para los métodos de riego con pendiente. La siguiente

tabla empírica es una selección de límites numéricos propuestos por los diversos autores que figuran en la bibliografía al final.

Longitudes y áreas de orientación para anteproyectos de riego a cero

El empleo eficiente de la maquinaria agrícola está en relación al largó de las unidades de riego.

Caudal: El caudal que ingresa a una piscina a cero puede ser netamente superior al caudal de infiltración del área de dicha pileta, por cuanto lo que no se infiltra se acumula formando carga hidráulica y esta queda retenida por los bordes.

Cuadro 2. (Caudales mayores de 28 l/s. y menores de 280 l/s por unidad de riego)

| Textura | Longitud (L) de la piscina o melga a cero |
|------------------|---|
| Arenosa | < 70m |
| Franco arenosa | 70 a 100 |
| Franca | 100 a 200 |
| Franco arcillosa | 200 a 300 |
| Arcillo Limosa | > 300 |

Además, con la lámina necesaria en un riego por lo general no supera los 15 centímetros (1500 m³/ha.) los bordes de las piletas se hacen de una altura superior a los 20 centímetros; y como con respecto a erosión, con colocar disipadoras de energía a la entrada y/o aumentar dichas entradas se eliminan el problema por tratarse de pendientes nulas, es que: el límite máximo de caudal a respetar sería sólo aquel,

que al avanzar lo haga con un tirante menor que la altura de los bordes de la pileta.

El caudal máximo no erosivo por surco se calcula con la expresión de CRIDDLE siguiente:

$$Q_{mne} = \frac{6,3}{S \text{ ‰}}$$

Donde:

Q = Caudal máximo no erosivo en L/S

S = Pendiente en tanto por mil

El Manual de Agricultura N° 82 del Soil Conservation Service del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norteamérica editado en 1956 al respecto aclara que “En pendientes menores del 3% el peligro del caudal elevado no es tanto la erosión del suelo, sino la estabilidad de los bordos laterales de las unidades de riego”.

En pendientes nulas y sobre todo cuando hay cultivos de gran cobertura como pastos o cereales se puede esperar, que con caudales de aprox. 14 l/s por metro de ancho de melga, el agua avance con tirantes mayores de 15 cm lo cual es peligroso para los bordes de las unidades de riego. Con respecto a caudales mínimos manejables para riego a cero, se aconseja el doble al triple del caudal de infiltración del área de la unidad de riego y suelo fijarse como mínimo 28 l/s para suelos poco permeables.

Pero de todas maneras el caudal mínimo por unidad debe ser tal que llegue al extremo de la unidad de riego el 1/4 del tiempo de infiltración de dosis de riego o en menor tiempo aún.

Tiempo de llenado: El tiempo que tarda una unidad de riego a cero en llenarse surge de la siguiente ecuación.

$$t = \frac{d \times A}{Q - A \times i}$$

Donde

Q = Caudal en m³/s

t = Tiempo de llenado en segundos

d = Lámina de agua que se quiere aplicar, o sea la dotación de riego en metros.

A = Área de la unidad de riego en m²

i = Velocidad de infiltración básica (m/s)

Carga hidráulica o dominio necesario: En riego sin pendiente, el agua crea carga a medida que se va llenando la unidad de riego.

Si suponemos, para mayor seguridad que durante el tiempo de llenado de la unidad de riego, no se infiltra nada de lámina en el suelo, entonces el agua acumulada llegaría (Siguiendo con nuestro ejemplo) hasta una altura de 15 centímetros sobre el piso de la pileta.

Si el umbral de la compuerta de entrada coincide con el nivel del piso de la pileta, el área de la boca de la compuerta se irá sumergiendo o ahogando y por lo tanto dejará pasar menos agua.

En ese caso el “espejo de agua” de la acequia cabecera, debe ir adquiriendo una elevación adicional o presión hidráulica creciente, a medida que la unidad se vaya llenando, para asegurar de esta manera, durante todo el tiempo de llenado el ingreso del caudal previsto y no menos.

Es por tal motivo que, en riego a cero, es fundamentalmente disponer de dominio suficiente como para que durante todo el tiempo de llenado se disponga de la carga (diferencia de nivel aguas arriba y aguas abajo de la compuerta) que asegura el ingreso del caudal previsto.

Como generalmente no se usan láminas de riego superiores a 15 centímetros, se considera como suficiente que el “pelo de agua” de la acequia de cabecera, tenga un dominio de 30 centímetros sobre el piso de la pileta y en general que la altura de dominio sea el doble de la lámina para la cual se diseña el método de riego.

El coronamiento de los bordes de la acequia cabecera debe ser tal que admita una revancha $\frac{1}{3}$ del tirante, para tirantes chicos al $\frac{1}{6}$ del mismo, para tirantes grandes.

Se considera pequeños los tirantes menores de 20 centímetros.

Cuando no se dispone de dominio suficiente, la solución es aumentar el área de entrada del agua a las piletas, ya sea instalando compuertas más anchas que las comunes, o colocando mayor cantidad de compuertas por piletas, pero estas soluciones o resultan, caras o requieren mayor mano de obra.

Se pueden reemplazar las compuertas por otros dispositivos de derivación inclusive por sifones invertidos y construcción especial que facilite su cebado porque los caudales para riego “a cero” como vimos, deben en general ser superiores a 28 l/s para las unidades de riego de mínima superficie práctica.

Cultivos: Se adaptan al riego en “piletas o melgas a nivel cero” los cultivos cerrados o tupidos de cereales y forrajeras, como así también los de vegetación erecta (algodón, maíz) o arbustiva (viñedos y frutales) siempre que no sean afectadas por una saturación prolongada del suelo por el agua. Para el caso del arroz el riego a cero es ideal.

El método se utiliza en la mayoría de los suelos, pero los mejores resultados se obtienen en los que presentan de media a baja velocidades de infiltración. En suelos de textura arenosa no se aconseja su utilización, debido a que pueden ocurrir grandes pérdidas por percolación.

La alfalfa no se adapta al riego en piletas o melgas a nivel cero, el suelo de textura fina. En suelos limosos y arcillosos, es preferible regarla en surcos en curvas de nivel, por su marcada susceptibilidad a la falta de aire en la zona radicular.

Una sumersión mayor de 24 horas afecta seriamente el cultivo de alfalfa. La lámina de riego expresada en mm dividida por la infiltración promedio expresada en mm/hora, nunca debe dar un tiempo de infiltración igual o mayor que 24 horas para la alfalfa.

El agua no infiltrada se calienta con el sol y esto también perjudica al cultivo de alfalfa.

Tampoco se adaptan al riego “a nivel cero” las plantas cuyos frutos se perjudican por el contacto con el agua de riego, como son las cucurbitáceas en general y los tubérculos.

Por riego a manto se pueden combatir algunas plagas de la agricultura (Filoxera en viñedos, pulgones del arroz en macollamiento cuando aún están abajo, etc.)

Es práctico también como defensa contra heladas cubriendo el suelo con una pequeña lámina de agua con la víspera (método usado por los Incas en altiplanicie del Perú).

Para mejorar suelos esqueléticos de gravas y cantos rodados, el riego “a cero” con aguas turbias cargada de arena fina, lino y arcilloso resulta más efectivo.

Consideraciones para la determinación de los costos: El relieve natural más apropiado es el poco inclinado y llano para que los gastos de emparejamiento resulten menores.

En pendientes transversales superiores al 1,5 %. La cantidad de bordes por hectárea resulta grande, siendo costosa su ejecución y mantenimiento.

De todas maneras, el costo debe dividirse por el total de hectáreas que cubre el método, pues hay hectáreas que necesitarán mucho movimiento de suelo y otras que prácticamente no producen gastos.

El emparejamiento es laborioso por los asentamientos diferenciales que se producen en los primeros riegos.

El mantenimiento del nivel cero es difícil si se hacen labores de arado deficientes por mal estado de los implementos o por falta de idoneidad de los ejecutores.

Si una vez se ara hacia afuera, en la próxima vez se debe arar hacia adentro.

La operación de riego requiere escasa mano de obra si el terreno está bien nivelado.

Si no existe buen drenaje natural, con este método tarde o temprano se necesitará drenaje artificial.

Cuadro 3. Eficiencia de los métodos de riego

| Método de riego | Eficiencia de conducción | Eficiencia agronómica | | Eficiencia total (%) |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|--------------|----------------------|
| | | Aplicación | Distribución | |
| Gravedad | | | | |
| Melgas | 0.50 | 0.40 | 0.60 | 12.0 |
| Surcos | 0.50 | 0.65 | 0.75 | 24.4 |
| Presurizados | | | | |
| Aspersión | 1 | 0.90 | 0.80 | 72.0 |
| Goteo | 1 | 0.95 | 0.90 | 85.5 |
| Exudación | 1 | 1.00 | 0.98 | 98.0 |

Fuente: El Riego (IICA 2016)

Cuadro 4. Eficiencias de riego

| Sistema de riego, textura del suelo y topografía | melgas | surcos | melgas en contorno |
|--|---------|---------|--------------------|
| Franco arenoso | | | |
| 1. bien nivelado | 60 | 40 - 60 | 45 |
| 2. nivelación regular | 40 - 50 | 35 | 30 |
| Suelo profundo | | | |
| 1. bien nivelado | 70 - 75 | 65 | 55 |
| 2. nivelación regular | 50 - 60 | 55 | 45 |
| Suelo poco profundo | | | |
| 1. bien nivelado | 60 | 50 | 45 |
| 2. nivelación regular | 40 - 50 | 35 | 35 |
| Arcilloso | | | |
| 1. bien nivelado | 60 | 65 | 50 |
| 2. nivelación regular | 40 - 50 | 55 | 45 |

Fuente: Adaptado de Métodos de riego gravitacionales. Descripción, observación, diseño, operación y evaluación de métodos de riego gravitacionales (surco, melgas y piscinas arroceras). (Génova, L. et. al. 2016).

Riego con pendiente

Puede hacerse por melgas, por surcos, por corrugación o por desbordamiento.

Riego por melgas



Fuente: Atlixco México (2010). Riego por melgas en alfalfa

Riego por melgas en pendiente

A este método de riego por superficie con pendiente, también se lo llama “Riego por escurrimiento en melgas”, o “fajas”, “tablares”, “bordes” “caballones”, “platabandas”, etc.

Nosotros a este método lo llamaremos “Riego por melgas en pendiente” Una “melga en pendiente” es el espacio de tierra rectangular comprendido entre “dos bordes”. Recibe el agua por el lado menor ubicado más alto y por el otro lado menor, que debe quedar abierto, puede desaguar.

El método de riego por melgas en pendiente, consiste en hacer escurrir una delgada lámina de agua, que cubra todo el ancho y el largo de la unidad, durante el tiempo necesario para que se infiltre en ella, la dotación de riego que se desea aplicar.

A la unidad de riego la denominaremos “melga en pendiente”, su tamaño y forma surge principalmente de la interacción entre topografía, textura del suelo, caudales empleados y necesidades de mecanización.

Topografía: El riego por melgas en pendiente; se adapta bien a pendientes transversales mayores del uno y medio por mil (1,5 ‰) y menores de seis por mil (6 ‰).

Longitudinalmente la pendiente óptima es de 3% y la máxima 1,5% (Un metro cincuenta en 100 metros).

Los cultivos cerrados que no necesitan roturación periódica del suelo admiten pendientes longitudinales del 1,5% pero con inconvenientes varios como se verá más adelante (Subtítulo “Cultivos”).

Se requiere pendientes longitudinales superiores al 1,5 por mil (quince cm en 100 metros) para asegurar el escurrimiento del agua en delgada lámina. Esto hace que el sentido de riego en este método, deba ser; cortando oblicua o perpendicularmente las curvas de nivel.

La distribución del agua de riego en la superficie de la melga, sólo se podrá hacer si el terreno es homogéneo y además presenta pendiente continua y/o creciente en sentido longitudinal y pendiente cero en el sentido transversal.

Pendientes uniformes o crecientes en melgas

Las pendientes uniformes y sus variaciones dan la oportunidad de adaptarse a las pendientes naturales existentes en el terreno a fin de mover la mínima cantidad de suelo en la sistematización.

Terreno homogéneo, es un concepto teórico, los terrenos por naturaleza son heterogéneos y anisótropos, tanto en superficie como en profundidad, pero en la práctica nosotros consideramos homogéneos aquellos cuyas condiciones están comprendidas en un rango de variación normal.

Los rangos de variación normal y valores medios que se pueden tomar para diseño a nivel de anteproyecto figuran en la tabla N°12, tomada de ISRAELSEN Y HANSEN.

Anchos de la Unidad de Riego: Para que el movimiento del suelo sea mínimo conviene hacer depender el ancho de las melgas, de las pendientes naturales existentes en el sentido transversal a la dirección que se dará al riego.

Por otro lado, como en el caso de las piletas y melgas a cero, el ancho de las unidades, conviene que sea múltiplo de ancho de labor del implemento de motocultura, que se usará para, su cultivo, más un metro para, el borde entre melgas.

En general mientras mayor es la pendiente transversal del terreno menor tendrá que ser el ancho de la melga, frente a una misma tolerancia de desnivel entre futuros bordes.

Adoptaremos la misma, tolerancia que fijamos para unidades a cero, o sea, 0,03m entre futuros bordes. Si se divide esa tolerancia por el gradiente transversal a la dirección del riego que se hará por las melgas, se obtienen los valores que figuran en la Tabla N°1 a partir de la pendiente 1,5 %.

Anchos menores de 5 metros por melgas, no son prácticos, por la cantidad de bordes necesarios por hectárea. En ese caso es preferible pasar al método de riego por surcos espaciados según la textura del suelo.

Textura: Para diseñar métodos de riego en pendiente nos interesan las relaciones de textura, del suelo con la cohesión y la infiltración.

Las texturas limosas y arcillosas presentan un elevado grado de cohesión.

Las texturas arenosas son erosionadas fácilmente.

La débil cohesión que presenta la textura arenosa exigirá diseñar en ella, con poca pendiente o con poco caudal ambas decisiones técnicas, determinarían una lenta circulación del agua que produce pérdidas de tiempo y de agua por percolación.

La solución está en reducir las dimensiones de las unidades en lugares arenosos (Ver Tabla N°4) respetando las pendientes naturales existentes para poder sistematizar con mínimo movimiento del suelo y no achicando caudales para no bajar la eficiencia de riego.

La fuerte cohesión que presentan las texturas finas (franco, franco limoso y limoso) permite diseñar en ellas con fuerte pendiente o cualquiera existente pero no con caudales de infiltración elevados.

Los caudales de escurrimiento máximo no erosivos para texturas finas podrán ser elevados, pero deberán cortarse antes de llegar a 1/2 o 3/4 de la longitud de riego.

La solución para texturas finas está en aumentar el área de infiltración de la melga, pero sobre la base de aumento de longitud (400m o más) que se puede cubrir fácilmente en un 1/4 de tiempo de infiltración usando los caudales grandes de escurrimiento no erosivos admitidos por esa textura.

En texturas finas no conviene aumentar el área ensanchado la melga por que los segundos caudales, o sea los de infiltración para esa textura resultan muy pequeños.

Los caudales pequeños de ese orden, no pueden distribuirse en anchos grandes (mayores de 5m) forman pronto arroyuelos que divagan en el ancho de la melga sin llegar a cubrir su área de infiltración. Sin tal caso, aunque la pendiente lateral de un suelo de textura fina indique que el ancho puede ser grande, habrá que dimensionar melgas angostas o regar en forma encadenada mayor longitud (L).

En texturas finas resulta conveniente combinar el riego a cero con el riego por melgas en pendientes usando mayor caudal que el de infiltración y echando los desagües de las melgas en piletas a cero por medio del encadenado, Las piletas a cero se harán en la parte más baja del predio.

Largo de las unidades de Riego y Caudal de escurrimiento

La longitud de las unidades de riego está en relación con la textura la pendiente longitudinal y la magnitud del caudal de escurrimiento.

Como orientación muy general se puede decir que las unidades de riego con pendiente podrán ser más largas mientras más limoso y arcilloso sea el suelo y más cortas mientras más arenoso sea el mismo, pero el valor del caudal de escurrimiento no erosivo deberá surgir de un ensayo a campo.

Fijado el ancho (b) por topografía y conocida la pendiente longitudinal de la melga, se puede tener una idea sobre cuál será el caudal máximo no erosivo para un suelo franco, aplicando la fórmula empírica de CRIDDLE cuya expresión es:

$$q = 5,57 \times S^{-0,75}$$

Donde:

q = Caudal unitario máximo no erosivo aplicado por metro de ancho de melga (l/s por m).

S = Pendiente en el sentido longitudinal de riego en porcentaje.

Se ensaya a campo, caudales en ese entorno y se elige el máximo realmente no erosivo para la textura existente. Conocido el caudal máximo no erosivo, se determina la longitud (L) ideal para la melga mediante otro ensayo de campo, midiendo los metros que dicho caudal máximo no erosivo avanza en un tiempo igual a 1/4 del tiempo de infiltración de la lámina que queremos aplicar.

- Cuando las pendientes son escasas (menores del 1%) esta fórmula da valores muy altos de caudal máximo no erosivos los que a veces no se disponen en la cabecera de la unidad.

Emplear caudales menores a los máximos no erosivos da mayor seguridad en cuanto a erosión, pero puede hacer bajar la Eficiencia de aplicación.

Tabla 8. Dimensiones recomendadas y láminas a aplicar para riego en melgas

| Textura del suelo | Pendiente (%) | Lámina a aplicar | Dimensiones | | Caudal (l/s) |
|-------------------|---------------|------------------|-------------|-----------|--------------|
| | | | Largo (m) | Ancho (m) | |
| Gruesa | 0.25 | 5 | 150 | 15 | 225 |
| | | 10 | 245 | 15 | 200 |
| | | 15 | 400 | 15 | 170 |
| | 1.00 | 5 | 90 | 12 | 35 |
| | | 10 | 150 | 12 | 70 |
| | | 15 | 275 | 12 | 70 |
| | 2.00 | 5 | 60 | 9 | 35 |
| | | 10 | 90 | 9 | 30 |
| | | 15 | 185 | 9 | 30 |
| Media | 0.25 | 5 | 245 | 15 | 200 |
| | | 10 | 400 | 15 | 170 |
| | | 15 | 400 | 15 | 100 |
| | 1.00 | 5 | 150 | 12 | 70 |
| | | 10 | 305 | 12 | 70 |
| | | 15 | 400 | 12 | 70 |
| | 2.00 | 5 | 90 | 9 | 30 |
| | | 10 | 185 | 9 | 30 |
| | | 15 | 305 | 9 | 30 |

| | | | | | |
|------|------|----|-----|----|-----|
| Fina | 0.25 | 5 | 400 | 15 | 115 |
| | | 10 | 400 | 15 | 70 |
| | | 15 | 400 | 15 | 40 |
| | 1.00 | 5 | 400 | 12 | 70 |
| | | 10 | 400 | 12 | 35 |
| | | 15 | 400 | 12 | 20 |
| | 2.00 | 5 | 400 | 9 | 30 |
| | | 10 | 400 | 9 | 30 |
| | | 15 | 400 | 9 | 20 |

Fuente: Tomado de Diseño de riego por gravedad, (Grassi, C. 1998).

Tabla 9. Dimensiones y caudales recomendados para melgas

| Suelo | Velocidad de infiltración | Pendiente (%) | Caudal (l/s-m) | Ancho (m) | Largo (m) |
|-----------|---------------------------|---------------|----------------|-----------|-----------|
| Arenoso | Alta | 0,2 – 0,4 | 10 – 15 | 12 – 30 | 60 – 90 |
| | Mayor a 25 mm/h | 0,4 – 0,6 | 8 – 10 | 9 – 12 | 60 – 90 |
| | | 0,6 – 1,0 | 5 – 8 | 6 – 9 | 75 |
| Franco | Media 10 a 25 mm/h | 0,2 – 0,4 | 5 – 7 | 12 – 30 | 90 – 250 |
| | | 0,4 – 0,6 | 4 – 6 | 6 – 12 | 90 – 180 |
| | | 0,6 – 1,0 | 2 – 4 | 6 | 90 |
| Arcilloso | Baja | 0,2 – 0,4 | 3 – 4 | 12 – 30 | 180 – 300 |
| | Menor a 10 mm/h | 0,4 – 0,6 | 2 – 3 | 6 – 12 | 90 – 180 |
| | | 0,6 – 1,0 | 1 – 2 | 6 | 90 |

Fuente: Tomado de Sistema de riego por melgas, Cano, et. al. (2013)

Un criterio sería: Si no se dispone del caudal máximo que indica la fórmula y un caudal menor disponible puede llegar de la cabecera al pie de la unidad de riego en 1/4 del tiempo de infiltración sin producir erosión. No habrá ningún inconveniente en usar dicho caudal, menor al indicado por la fórmula de CRIDDLE.

- La altura máxima del tirante en melga se alcanza cuando se cumplen las peores condiciones de escurrimiento a saber:
 - a. Mínima pendiente
 - b. Máxima rugosidad del suelo
 - c. Máxima cobertura vegetal
 - d. Mínima dosis de riego

Cálculo del caudal de infiltración para una melga

El caudal de infiltración para una melga, en pendiente es igual al caudal de infiltración unitario en $1/s \times m^2$ multiplicado por los metros cuadrados del área de la melga. Para nuestro caso una melga de 20 m, de ancho por 208 m de largo requerirá un caudal de infiltración de:

$$Q = q_u \times a \times L = 0,012 \text{ l/s} \times m^2 \times 20 \text{ m} \times 208 \text{ m} = 50 \text{ l/s} = 180 \text{ m}^3/\text{ hora.}$$

En general se acepta:

$L < 300 \text{ m}$ (Largo de la melga)

$6 < a < 15 \text{ m}$ (ancho de la melga)

Proporciones del terreno a/L

Suelo Liviano $1/10 - 1/6$

” Medio $1/15 - 1/10$

” Pesado $1/20 - 1/15$

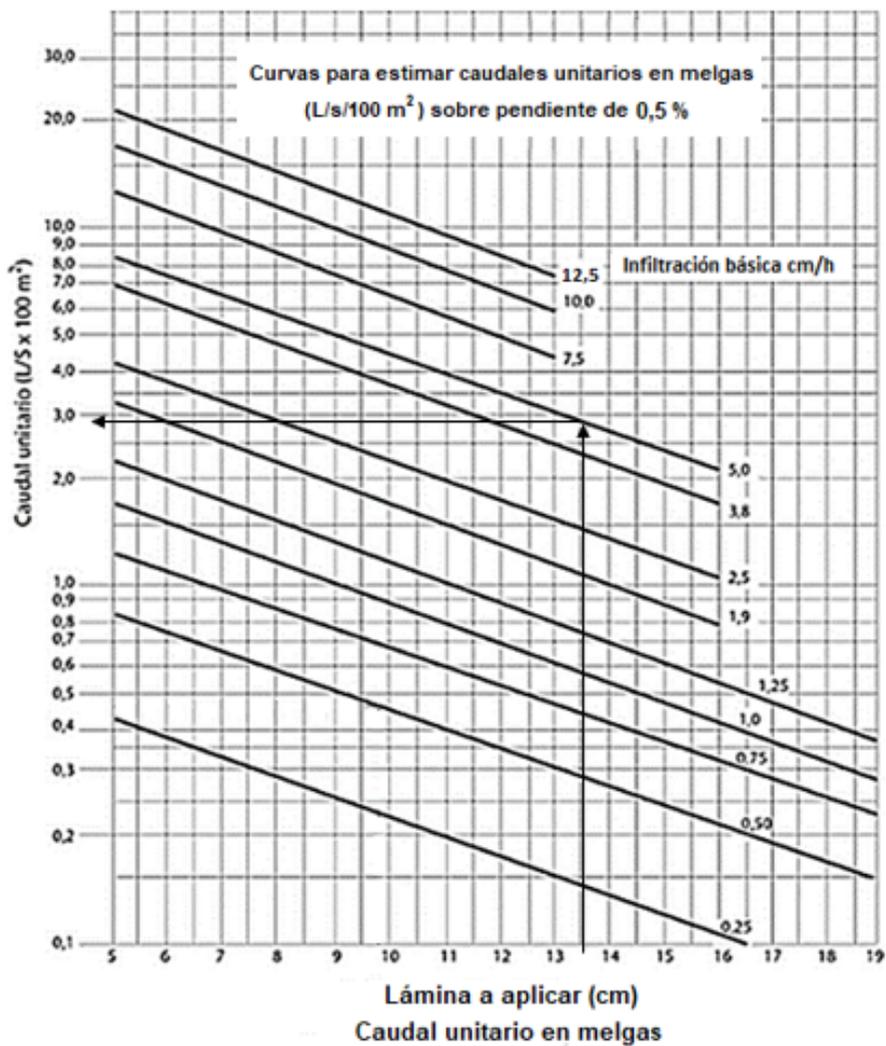


Figura 12. Caudal unitario para riego por melga

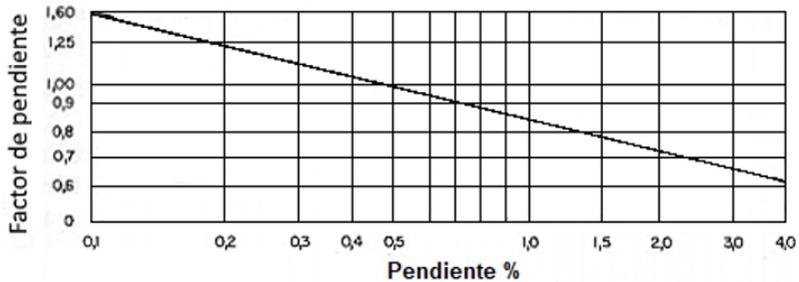


Figura 13. Para terrenos con otras pendientes el caudal se corrige con el factor obtenido de la siguiente gráfica.

Fuente: Apuntes de la materia de riego y drenaje (Cisneros, R. 2013)

Tabla 10. Normas generales para el diseño de riego superficial por melgas

| Velocidad de infiltración y textura del suelo | Caudal por melga (lps) | Anchura (m) | Longitud máxima (m) |
|---|------------------------|-------------|---------------------|
| Muy alta (Mayor a 40 mm/h) Textura gruesa (arena) | 70 | 3 – 6 | 50 – 100 |
| Alta (de 20 a 40 mm/h) Textura gruesa (franco arenosa) | 40 – 70 | 6 – 10 | 100 – 130 |
| Media (de 15 a 20 mm/h) Textura media (franco limoso) | 28 – 56 | 6 – 15 | 130 – 200 |
| Baja (8 a 15 mm/h) Textura fina (franco arcillosa) | 14 – 30 | 6 – 20 | 200 – 300 |
| Baja (menor a 8 mm/h) Textura muy fina (arcilla) | 14 – 30 | 7 – 20 | 200 – 600 |

Tomado de Mecanización de suelos (Romanella, C. 2008)

Estas especificaciones son para pendientes hasta de 4.0 m por kilómetro, las anchuras mínimas estarán de acuerdo con la maquinaria utilizada y pendiente longitudinal.

Tabla 11. Eficiencias recomendadas para el diseño de riego por melgas

| Pendiente (%) | Infiltración básica (mm/h) | | | |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|--------------|
| | Menor a 7,6 | 7,6 a 15,2 | 15,2 a 50,8 | 50,8 a 100,2 |
| < 0,05 | 75 | 73 | 70 | 62 |
| 0,05 – 0,51 | 70 | 70 | 75 | 70 |
| 0,50 – 1,01 | 65 | 70 | 70 | 70 |
| 1,00 – 2,01 | 60 | 65 | 70 | 75 |
| 2,00 – 4,00 | 55 | 60 | 65 | 65 |
| 4,00 – 6,00 | 50 | 55 | 60 | 55 |

Tomado de: Diseño de un sistema integrado de riego superficial (Acuña, C. 2014)

Existen métodos distintos para encontrar o realizar el diseño del sistema de riego superficial por melgas:

Tabla 12. Diseño del riego por melgas: gasto en l/s/m² para la aplicación óptima de la lámina de riego. Factor de fricción $K = 1/54$; pendiente topográfica $S_0 = 0.002$. Modelo de ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt.

| Suelo | Lámina de riego 8 cm | | | Lámina de riego 10 cm | | | Lámina de riego 12 cm | | |
|----------------|----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|-----------------------|-------|-------|
| | Qopt | DR | CUC | Qopt | DR | CUC | Qopt | DR | CUC |
| | l/s/m ² | horas | - | l/s/m ² | horas | - | l/s/m ² | horas | - |
| Franco arenoso | 0,01565 | 1,6 | 0,921 | 0,01425 | 2,2 | 0,938 | 0,01330 | 2,8 | 0,951 |
| Franco | 0,00965 | 2,6 | 0,922 | 0,00875 | 3,5 | 0,939 | 0,00810 | 4,5 | 0,952 |
| Franco limoso | 0,01040 | 2,4 | 0,922 | 0,00890 | 3,4 | 0,936 | 0,00800 | 4,5 | 0,949 |
| Limo | 0,00810 | 3,1 | 0,924 | 0,00700 | 4,3 | 0,937 | 0,00620 | 5,9 | 0,950 |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|---------|------|-------|---------|------|-------|---------|------|-------|
| Franco arcillo arenoso | 0,01740 | 1,5 | 0,923 | 0,01515 | 2,0 | 0,938 | 0,01360 | 2,7 | 0,951 |
| Franco arcilloso | 0,00330 | 7,5 | 0,927 | 0,00285 | 10,6 | 0,941 | 0,00270 | 13,4 | 0,952 |
| Franco arcillo limoso | 0,00175 | 13,7 | 0,924 | 0,00145 | 20,9 | 0,940 | 0,00130 | 27,9 | 0,953 |
| Arcilla arenosa | 0,00290 | 8,5 | 0,929 | 0,00265 | 11,4 | 0,945 | 0,00245 | 14,7 | 0,959 |
| Arcilla limosa | 0,00060 | 40,6 | 0,888 | 0,00051 | 59,0 | 0,901 | 0,00046 | 77,5 | 0,911 |
| Arcilla | 0,00053 | 46,5 | 0,888 | 0,00045 | 67,3 | 0,901 | 0,00040 | 90,3 | 0,911 |

Tomado de: Diseño de riego por melgas empleando las ecuaciones de Saint-Venant, y Green y Ampt. Saucedo, Zavala y Fuentes (2015)

Diseño de melgas con base en ecuaciones empíricas

Datos de diseño:

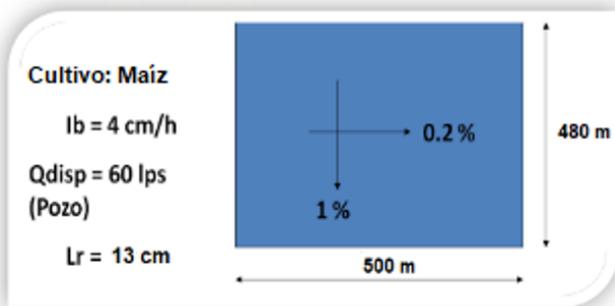
Plano del terreno con:

1. Curvas de nivel con equidistancia vertical de 10 cm.
2. Nivel de la entrada de agua y altura de operación de los canales alimentadores.
3. Cultivo que se va implantar.
4. Textura del suelo.
5. Láminas de riego.
6. Eficiencia de riego.

7. Infiltración básica o curva de velocidad de infiltración.
8. Ancho de implementos cosechadores.

Incógnitas de diseño:

1. División en tablas de riego (estas se obtienen del plano).
2. Dirección del trazo de las melgas (estas se obtienen del plano)
3. Pendiente trazo, S (%).
4. Anchura de melgas, W (m).
5. Longitud de riego o de melga, L (m).
6. Lámina de riego por aplicar, Lr (cm).
7. Gasto por melga, Q (lps).
8. Tiempo de riego por melga, T (hr).
9. Tiempo total de riego del campo, Tr.



Ejemplo:

Se tiene un terreno bien nivelado de 24 has, con la menor pendiente en dirección del lado corto, y la otra pendiente es de 1 %. En el terreno se desea cultivar maíz en melgas, las cuales deberán diseñarse para lograr la mayor eficiencia de aplicación. El terreno tiene una infiltración básica de 4 cm/hr. Para el riego se dispone de agua de un pozo que

descarga un caudal de 60 lps y de acuerdo a las características del suelo, cultivo y criterio de manejo, se pretende aplicar una lámina neta de 10 cm por riego. El muro tendrá 30 cm de base y 20 cm de altura.

Diseño de riego por melgas primer método

Esta secuencia de diseño de melgas puede ser utilizada para diseñar parcelas de riego en piscinas con muros con pendientes en ambas direcciones:

Se divide el terreno con Civilcad. En cada una de estas melgas se deberán tener los datos antes enunciados.

En cada melga se llevará a cabo el siguiente análisis:

1. Pendientes longitudinal y transversal de las melgas

Teniendo en cuenta que la pendiente transversal de las melgas debe ser nula o mínima, se orientará la dirección de las melgas de manera que la pendiente mayor sea a lo largo de las mismas dentro de los límites marcados para el método, cuidando en algunos casos de hacerlos cambios de dirección mínimos necesarios para evitar “altos” o “bajos” debido a la micro topografía del terreno.

De acuerdo al sentido de la pendiente y el lugar de entrada de agua se resta del valor de la cota de la curva de nivel en el punto más alto de la tabla el valor de la cota del extremo inferior, midiendo la distancia entre los dos puntos en forma paralela a la dirección de las melgas. La pendiente (S) será igual: En este caso la pendiente es de 1%.

$$S = \frac{N - N_2}{d} \times 1000$$

En la que:

- S = Pendiente (‰)
- N = Cota del punto más alto de la melga (m)
- N2 = Cota del punto más bajo de la melga (m)
- d = Distancia entre cotas (m)

2. Caudal máximo no erosivo

El caudal máximo no erosivo se determina experimentalmente, ensayando diferente caudales, o aplicando ecuaciones empíricas como la de Criddle et al (1956), que expresa:

$$Q_{\text{mne}} = \frac{C}{S^{0,75}} = \frac{5,6}{1^{0,75}} = 5,6 \text{ l/s/m}$$

Donde C= Factor que es igual a 5.6 (con cultivos poco protectores) y 9.3 (con cultivos densos).

S = pendiente en %

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (1974), citado por (García, M. et. al. 2018) propone para el cálculo del caudal unitario máximo, las siguientes ecuaciones:

2.1. Para cultivos bien establecidos, que forman una densa masa, compuesta por la vegetación y el suelo (cereales excepto maíz o pasto).

$$q_{\text{u máx}} = \frac{0,353}{S^{0,75}}$$

Donde: $q_{\text{u máx}}$ = Caudal máximo no erosivo en l/s/m de melga

S = Pendiente de la melga en m/m

2.2. Para cultivos que no forman una densa masa de vegetación y suelo (maíz).

$$q_{u\text{máx}} = \frac{0,177}{S^{0,75}} = \frac{0,177}{0,01^{0,75}} = 5,6 \text{ l/s/m}$$

donde los parámetros son los mismos que en la ecuación anterior

3. Lámina de riego

Se define de acuerdo a las características de la relación planta-suelo-clima, se aplica una eficiencia de riego de acuerdo al método y pendiente, de esta forma la lámina de riego se obtiene:

$$L_r = \frac{L_n}{E_a} = \frac{10\text{cm}}{0,70} \approx 14,3 \text{ cm}$$

Donde:

- L_n = Lámina neta a aplicar (cm)
- L_r = Lámina de riego (cm)
- E_a = Eficiencia en la aplicación (fracción)

4. Cálculo del caudal unitario

El caudal unitario se obtiene del gráfico 1, en este caso el caudal unitario es de 2,55 l/s/100 m²

$$F_c = 0,867 \times S^{-0,217} = 0,867 \times 1^{-0,217} = 0,867$$

Caudal unitario corregido $q_{uC} = F \times q_u = 0,867 \times 2,42 = 2,1 \text{ l/s/100 m}^2$

5. Largo y ancho de la melga

5.1. Longitud máxima de melga

$$L_{\text{máx}} = \frac{100 \times q_{\text{máx}}}{q_{uC}}$$

$L_{\text{máx}}$ = Longitud máxima de la melga, m

$q_{\text{máx}}$ = caudal máximo por melga, L/s/m

q_u = caudal unitario corregido, L/s/100 m².

$$L_{\text{máx}} = \frac{100 \times q_{\text{máx}}}{q_{uC}} = \frac{100 \times 5,581 \text{ l/s/m}}{2,1 \text{ l/s}} = 265 \text{ m se va a reducir a } 248,5$$

5.2. El ancho de las melgas se selecciona procurando que la pendiente transversal sea mínima y considerando la anchura de los implementos cosechadores, así el ancho de melga será múltiplo de esta dimensión (2 veces o 3 el ancho de una cosechadora o sembradora, por ejemplo), también se toma en cuenta si hay pendiente transversal que la diferencia entre bordos no sea mayor de 5 cm. Conociendo la lámina a aplicar se empleará la tabla 4 para determinar otros datos.

El ancho se puede calcular con la fórmula:

$$W(M_A) = \frac{2,5}{S} = \frac{2,5}{0,2} = 12,5 \text{ m}$$

Donde: S = Pendiente transversal en porcentaje.

| Ancho de las melgas | Textura | W (a)/L |
|-------------------------|-------------|-------------|
| • Angostas: 2 a 4 m | F. arenosas | 1/10 - 1/6 |
| • Medias: 10 a 20 m | Francas | 1/15 - 1/10 |
| • Muy anchas: 40 a 50 m | Arcillosas | 1/20 - 1/15 |

6. Número de melgas

6.1. Número de melgas por largo de la melga

El número de melgas por largo de la melga se determina con la siguiente fórmula:

$$M_L = \frac{\text{Largo Terreno} - A_m}{\text{Largo Melga} + A_m}$$

$$N_L = \frac{500 - 0,3}{248,5 + 0,3} = \frac{499,7\text{m}}{248,8\text{m}} = 2 \text{ melgas}$$

6.2. Número de melgas por largo de la melga

El número de melgas por ancho del terreno se determina mediante la fórmula.

$$Mw = \frac{\text{Ancho Terreno} - Am}{\text{Ancho Melga} + Am}$$

$$Mw = \frac{480 - 0,3}{12,5 + 0,3} = \frac{479,7m}{12,8m} \approx 37 \text{ melgas}$$

$$Nm = 37 \times 2 = 74 \text{ melgas por terreno}$$

7. Área del terreno

Se determina el área del terreno:

$$\text{Área de la melga} = L \times A = 248,5 \times 12,5 = 3106,25 \text{ m}^2$$

$$\text{Área del Terreno} = \text{Área melga} \times \text{Número de melgas} = 3106,25 \text{ m}^2 \times 74 = 22,99 \text{ has}$$

8. El caudal de la melga

Se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Q = \frac{LWq}{100} = \frac{Sm \times qu}{100}$$

Donde:

- Q = Gasto de la melga (lps)
- L = Longitud de la melga (m)
- q = Gasto unitario corregido (lps /100 m)
- W = Ancho de la melga (m)

$$Q = \frac{Sm \times q}{100} = \frac{3106,25 \times 2,1}{100} = 57,5 \text{ l/s}$$

9. El tiempo de riego por melga

Se calcula con la ecuación

10. Tiempo total de riego

El tiempo total de riego del campo se calcula con la siguiente ecuación:

$$Tt = 0,04167 \times T \times Nm$$

Donde:

- T_t = Tiempo de riego del terreno (días)
- T = Tiempo de riego por melga (h)
- Número de melgas por lote

$$T_t = 0.04167 \times T \times N_m = 0,04167 \times 1,9 \times 74 \approx 6 \text{ días}$$

Diseño de riego por melgas segundo método

El segundo método de diseño del sistema de riego que veremos, consiste en definir:

1. Ancho de la melga

Se define el ancho de melgas.

Teóricamente la pendiente entre bordos debe ser del 0% para que el agua avance frontalmente y uniforme.

$$Ma(Wa) = \frac{2,5}{S}$$

Donde:

- Ma = Ancho de melga (m)
- S = Pendiente transversal (%).

Sólo para $0.1 < S < 1 \%$

Mínimo recomendable: $Ma = 4 \text{ m}$.

$$Ma = \frac{2,5}{0,2} = 12,5$$

En terrenos con muy buena nivelación: ejemplo nivelación con láser, con textura media, puede haber un Ma de hasta 30 m.

Ma : debe ser múltiplo del ancho del implemento.

En este caso con los datos anteriores $Ma = 12 \text{ m}$.

2. Caudal unitario

Es un gasto aplicado a un metro de ancho por cien metros de largo.

Se determina el caudal unitario mediante la siguiente fórmula:

$$q_{uc} = \frac{0,253 \times I_b}{S^{0,22} \times e^{0,119Ln}}$$

Donde:

q_{uc} = caudal unitario corregido en l/s/10 m²

I_b = infiltración básica (Conductividad hidráulica a saturación K_s) en cm/h

e = Base de los logaritmos naturales (2,71828)

Ln = Lámina neta de riego

S = Pendiente longitudinal en porcentaje

En este caso:

$$q_{uc} = \frac{0,253 \times 4}{1^{0,22} \times e^{0,119 \times 10}} = 0,308 \text{ l/s/10 m}^2$$

3. Cálculo del caudal máximo permisible.

Para evitar la erosión del suelo por arrastre excesivo de partículas durante el riego. Se estima mediante una fórmula empírica (por lo que, para su aplicación no es lo único que existe, pero es aplicable).

$$Q_{ma} = \frac{C}{S^{0,75}}$$

Donde:

Q_{ma} = Caudal máximo por metro de ancho (l/s/m)

C = Factor que es igual a 5,58 (sin cubierta vegetal) y 9,3 (con cubierta vegetal)

S = Pendiente longitudinal

$$Q_{ma} = \frac{C}{S^{0,75}} = \frac{5,58}{1^{0,75}} = 5,58 \text{ l/s/m}$$

4. Longitud de la melga

Se determina la longitud permisible de la melga.

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L_{\max} = 10 \times \frac{Q_{\max}}{q_{uc}}$$

$$L_{\max} = 10 \times \frac{5,58 \text{ l/s /m}}{0,308 \text{ l/s /10m}^2} = 181 \text{ m}$$

Se dejará en 165 m por ser múltiplo de 500 metros de ancho considerando los bordos.

5. Tiempo de riego

Es el tiempo que transcurre desde el inicio del riego hasta el momento del corte.

Si el tiempo de duración del riego es mayor al T_r se producirá desbordamiento, si es menor, la melga no se regará completamente.

$$T_r = \frac{2,78 \times L_r}{q_{uc}}$$

Donde: T_r = Tiempo de riego (min)

L_r = Lámina de riego (m)

q_{uc} = Caudal unitario corregido (l/s/10 m²)

$$T_r = \frac{2,78 \times L_r}{q_{uc}} = \frac{2,78 \times 0,14}{0,308} \approx 1,26 \text{ horas}$$

6. Caudal de la melga

$$Q = \frac{S_M \times q_{uc}}{10}$$

Donde: Q = Gasto de la melga (l/s)

- q_{uc} = Gasto unitario (l/s /10 m²)
- SM = Superficie de la melga (m²) [Largo x Ancho] = 166 x 12 = 1992 m²

$$Q = \frac{S_M \times q_{uc}}{10} = \frac{1992 \times 0,308}{10} = 61,3 \text{ l/s}$$

7. Número de melgas

7.1. Número de melgas por largo del terreno

El número de melgas por largo del terreno se determina con la siguiente fórmula:

$$M_L = \frac{\text{Largo Lote} - \text{Separ_melgas}}{L + \text{Separ_melgas}}$$

$$M_L = \frac{500 - 0,3}{166 + 0,3} = \frac{499,7\text{m}}{166,3\text{m}} = 3 \text{ melgas}$$

7.2. Número de melgas por ancho del terreno

El número de melgas por ancho del terreno se determina mediante la fórmula.

$$M_w = \frac{\text{Ancho Lote} - A_m}{W + A_m}$$

$$M_w = \frac{480 - 0,3}{12 + 0,3} = \frac{479,7\text{m}}{12,3\text{m}} = 39 \text{ melgas}$$

$$N_m = M_L \times M_w = 3 \times 39 = 117 \text{ melgas por lote}$$

8. Área del lote

Se determina el área del lote

Área de la melga =

$$\text{Área del lote} = \frac{\text{Área melga} \times \text{Numero de melgas}}{10000} = \frac{1992 \text{ m}^2 \times 117}{10000} = 23,3 \text{ has}$$

9. Tiempo total o duración del riego

El tiempo total de riego del campo se calcula con la siguiente ecuación:

$$T_t = \frac{416,7 \times T_r \times S_p}{\text{Área Melga}} = \frac{416,7 \times 1,26 \times 23,3 \text{ has}}{1992 \text{ m}^2} \approx 6,14 \text{ días}$$

Donde: T_t = Tiempo de riego de la tabla (días)

T = Tiempo de riego por melga (hr)

S_p = Superficie del lote (ha)

L = Longitud de las melgas (m)

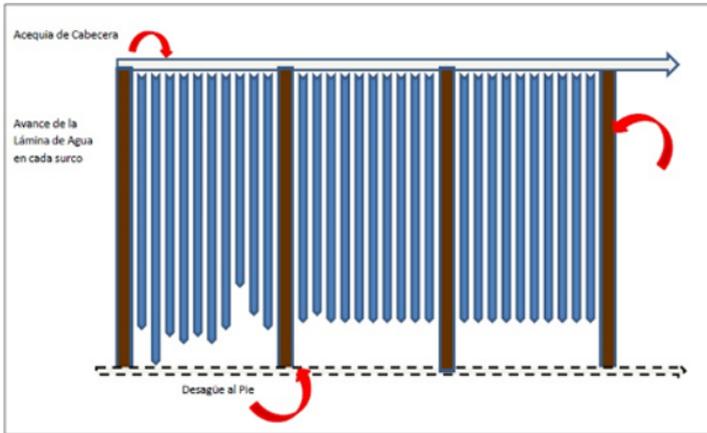
W = Ancho de melgas (m)

| | Lr = 8 cm | | Lr = 10 cm | | Lr = 12 cm | |
|------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| | qo (l/s/m ²) | Tr (h) | qo (l/s/m ²) | Tr (h) | qo (l/s/m ²) | Tr (h) |
| Arcilla | 0.00012 | 224.1 | 0.00010 | 338.2 | 0.00009 | 445.0 |
| Arcilla limosa | 0.00014 | 201.6 | 0.00012 | 270.5 | 0.00011 | 362.5 |
| Franco-arcillo-limoso | 0.00060 | 44.1 | 0.00050 | 66.6 | 0.00046 | 82.9 |
| Franco-arcilloso | 0.00088 | 31.4 | 0.00078 | 44.0 | 0.00072 | 57.8 |
| Arcilla arenosa | 0.00090 | 28.7 | 0.00080 | 42.4 | 0.00077 | 52.0 |
| Limo | 0.00399 | 6.9 | 0.00333 | 10.0 | 0.00296 | 13.7 |
| Franco | 0.00411 | 6.4 | 0.00354 | 9.6 | 0.00326 | 12.5 |
| Franco-limoso | 0.00446 | 6.2 | 0.00388 | 8.8 | 0.00349 | 11.6 |
| Franco-arcillo-arenoso | 0.00490 | 5.8 | 0.00476 | 7.4 | 0.00464 | 9.0 |
| Franco-arenoso | 0.02476 | 1.2 | 0.02223 | 1.6 | 0.02073 | 2.0 |

Cuadro 5. Diseño del riego por melgas: gasto en l/s/m² para la aplicación óptima de la lámina de riego. Factor de fricción $k = 1/54$, pendiente topográfica $S_o = 0.002$ (0,2%).

Fuente: Gasto óptimo en riego por melgas. (Saucedo, H. et. al. 2015)

Riego por surcos



Láminas inferiores a 60 mm no se pueden distribuir eficientemente mediante riego por melgas, (600 m³/ha) por lo cual se debe regar por surcos con este sistema se pueden distribuir eficientemente láminas inferiores a 30 mm (300 m³/ha).

Riego por surco a nivel cero

El suelo no queda cubierto por una capa continua de agua, sino que el agua cubre sólo el perímetro mojado de cada surco que puede estar colocado con mayor o menor espaciamiento según la textura del suelo.

Surcos a cero: El ensayo de riego en surcos a cero consiste simplemente en preparar en el predio en las diferentes texturas existentes surcos a cero longitudinal, y suficiente calado, de los largos que resulten del diseño. Se incorporan caudales de alrededor de 5 a 10 l/s por surco a cero para texturas medias. Se mide el tiempo de escurrimiento desde la cabecera al pie de la unidad. Esto debe resultar menor de 1/4 del tiempo de infiltración de la lámina de riego que se desea,

incorporar con eficiencia de aplicación que tiende al 89%. Si el tiempo de escurrimiento (t_e) resulta mayor de $1/4$ se podrá ensayar menor longitud de surco, menor perímetro mojable o mayor caudal.

Realizados los riegos en la cantidad que indicó el coeficiente “C” o habiendo regado con la lámina incrementada, por dicho coeficiente, se comprueba el avance de la, humedad por medio de la pala, barreno o sonda.

Si entre surcos contiguos se encuentra una zona seca continua o numerosas zonas secas, habrá que aproximar los surcos, es decir, habrá que reducir el espaciamiento (E).

Desde el punto de vista de la eficiencia de aplicación, no hay inconvenientes en aproximar los surcos más de lo indicado por las fórmulas empíricas o lo requerido por la textura del suelo se respeta el nuevo coeficiente “C” que surge de comparar el espaciamiento (E) ahora menor y el perímetro mojado que puede ser igual mayor o menor que antes. Pero este espaciamiento menor implicará mayores gastos por trazado de mayor cantidad de surcos por interfilas de plantas y además por construcción de nuevas compuertas de derivación o más tandas de surcos (“tapadas”).

El espaciamiento de los surcos, o sea la distancia entre surco y surco, depende de la naturaleza física del suelo y de la profundidad del suelo que se intenta mojar.

| Separación | (m) |
|---|------------|
| Arenoso grueso (perfil uniforme) | 0.30 |
| Arenoso grueso s/subsuelo compacto | 0.46 |
| Arenoso fino a Fr arenoso (uniforme) | 0.60 |
| Arenoso fino o Fr arenoso s/subsuelo compacto | 0.76 |
| Franco arenoso a Fr limoso (uniforme) | 0.90 |
| Fr arenoso a Fr limoso s/ subsuelo compacto | 1.00 |
| Fr arcilloso limoso (uniforme) | 1.20 |
| Suelos arcillosos | 1.00 |

Cuadro 6 Espaciamiento entre surcos

Fuente: Tecnología de Tierras y Aguas I. (Duarte, O. y Díaz, E. 2005)

En riego por surcos a nivel cero, debe considerarse el espaciamento (e) y el perímetro mojado (p) de los surcos y establecer la relación en que se encuentran.

$$\text{La relación } \frac{E}{P} = C$$

Da el coeficiente “C” de corrección de frecuencia de riego para incorporar una misma lámina o de espesor de lámina a incorporar.

La frecuencia de riego tendrá que ser mayor o sea menor el intervalo entre riego mientras mayor sea el espaciamento (E) entre surcos ya que la lámina (d) no cubre toda la superficie del suelo sino solamente el perímetro mojado de los surcos.

También podría hacerse mayor el calado o profundidad del surco en relación a un mayor espaciamento entre estos a fin de poder incorporaran mayor espesor de lámina.

Ejemplo: Si deseamos incorporar una lámina de 75 mm mediante surcos espaciados 1,80 m. con perímetro mojado de 0,60 m debemos llenar 3 veces los surcos con una lámina de 7,5 cm o darles un calado que permita incorporar 3 veces la lámina, es decir:

$$\text{El factor } C=3 \text{ surge de la relación: } \frac{E}{P} = \frac{1,80 \text{ m}}{0,60 \text{ m}} = 3$$

Lámina de riego (Corregida) 7,5 cm x 3 = 22,5 cm

En el riego por superficie, cuando el agua ingresa por la cabecera de la unidad de riego, comienza a avanzar e infiltrar al mismo tiempo. Una vez que el agua llega al pie, en la cabecera se ha infiltrado un volumen de agua determinado que dependerá del tiempo de avance* y de “las características y condiciones del suelo”. Además, resulta necesario un tiempo adicional para almacenar el agua uniformemente en la zona de raíces activas, cuya profundidad depende del cultivo (tiempo de infiltración). Cuanto más demore el agua en llegar al pie, más profundo se habrá infiltrado en la cabecera. Paz (2015).

El riego por surco se adapta a todos los tipos de suelos, con buena velocidad de infiltración y baja erodabilidad. Dado el parcial humedecimiento de la superficie del terreno que caracteriza al riego por surco, este método se presta para los suelos que tienen tendencias a formar costra al secarse dañando las plantas que recién germinan.

En cuanto a la pendiente, si bien el riego por surco funciona más eficientemente en terrenos llanos, de menos del 0.2%, puede emplearse este sistema con pendientes mucho mayores: Hasta el 3% en cultivos en hileras rectas y hasta el 15% en el caso de surcos en contorno.

Dado el reducido caudal que requiere cada surco, se emplea el método cuando los recursos hidráulicos disponibles son escasos, y en tal caso se riegan simultáneamente más o menos surcos, según el caudal con que se cuenta. Se logra además un buen control del caudal, con elementos simples como sifones, tubos, etc.

La eficiencia de aplicación que se logra al regar por surco puede calificarse de buena, cuando se lo compara con otros métodos, teniendo en cuenta que es posible regar por surco en condiciones topográficas relativamente desfavorables. Si se proyecta y opera adecuadamente, la eficiencia de aplicación puede ser alta (entre el 70% y el 80%). (Romanella, C. 2008)

Los costos de instalación y de operación del riego por surco, no son elevados, ya que se le puede usar con escasos trabajos de acondicionamiento de tierras, especialmente cuando se trata de cultivos estacionales.

Se logra con el riego por surcos un buen control del agua por medio de tubos, sifones y compuertas disponibles a bajo costo.

El riego por surco es el habitual de los cultivos en línea, en el surco el agua discurre por su parte inferior y las plantas generalmente ocupan los lomos del mismo, como se muestra en la figura.



Tomado de Riego por surcos: (Cenicaña 2015)

El número de surcos que se riegan simultáneamente puede ser ajustado al caudal disponible. El coste de inversión es muy bajo y la construcción del surco puede realizarla el propio agricultor. Esta modalidad de riego por superficie tiene limitaciones en cuanto al riesgo de erosión, alta escorrentía al final del surco y alta infiltración en suelos arenosos. (Corrazón, R. 2007)

Los surcos lineales son los más frecuentes, pero cuando hay fuerte pendiente, ésta se evita mediante los surcos de contorno como se muestra en la figura. En determinadas ocasiones para aumentar la longitud de los surcos se pueden diseñar estos en forma de zigzag.

Topografía

Pendientes en las que conviene aplicar el método: Los surcos angostos (triangulares) pueden hacerse desde pendientes transversales cero a 50 %.

Pero conviene hacer surcos en pendientes transversales mayores de 6 % y menores de 50%.

Si las pendientes naturales existentes son inferiores del 6%, los cultivos se adaptan al riego por melgas, es económicamente aconsejable regar por melgas y no por surcos.

La mano de obra para la operación de riego por surcos resulta onerosa, por cuanto hay que atender gran cantidad de unidades de riego de área reducida.

Si la pendiente transversal es superior al 5 % (cinco metros en 100 metros) los surcos tendrían que estar distanciados menos de 0,60m. y esto ya sería corrugación y no surco.

$$\frac{\text{tolerancia } 0,03\text{m}}{\text{gradiente } 0,050} = 0,60 \text{ m} = E = \text{espaciamiento entre ejes}$$

Longitudinalmente no se recomienda hacer surcos con pendientes en la dirección del riego, con mayores del 2% (2 metros en 100 metros) puesto que a esa pendiente los caudales máximos no erosivos, resultan tan pequeños (del orden de 0,3 L/s) que para que lleguen al extremo del surco en 1/4 del tiempo de infiltración las longitudes (L) tendrían que ser:

| | |
|-------------------|------------------|
| En arena | Menores de 50 m |
| En franco | Menores de 80 m |
| En limo arcilloso | Menores de 100 m |

Lo que no conviene a la motocultura (ver Tabla N° 9)

En pendientes menores los caudales pueden ser mayores y las longitudes (L) también, según la citada tabla N° 9.

La longitud en suelo arcilloso 400 m (ver tabla N° 9).

En surcos anchos y/o profundos a cero pueden agregarse caudales superiores a 10 l/s por surco.

Longitudes de surcos angostos en pendiente

Según la textura del suelo, pendiente y caudales de escurrimiento máximos no erosivos que pueden llegar al extremo del surco en 1/4 a 1/6 del tiempo de infiltración siendo la lámina $d = 30$ mm a 60 mm.

Las longitudes alcanzadas por los caudales máximos según pendientes y textura son una selección de resultados empíricos.

Tabla 13. Longitud máxima de surcos (m) y caudal máximo a aplicar según pendiente, textura y lámina requerida.

| Pendiente Longitudinal (%) | Caudal máximo por surco (l/s) | TEXTURA DEL SUELO | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|-------------------|-----|-----|-------------------|-----|-----|---------|-----|-----|-----------------|-----|-----|---------|-----|-----|--------------|-----|-----|----|----|-----|
| | | Arcillosas | | | Franco arcillosas | | | Francas | | | Franco arenosas | | | Arenosa | | | Arenas finas | | | | | |
| | | Lámina en cm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 5 | 7,5 | 10 | 15 | 5 | 7,5 | 10 | | |
| 2,5 | 2,52 | 320 | 360 | 460 | 535 | 290 | 350 | 400 | 250 | 300 | 350 | 440 | 200 | 240 | 280 | 150 | 180 | 210 | 265 | 68 | 83 | 100 |
| 5,0 | 1,26 | 220 | 266 | 304 | 320 | 195 | 243 | 275 | 167 | 205 | 236 | 300 | 137 | 157 | 190 | 99 | 121 | 144 | 180 | 45 | 53 | 65 |
| 7,5 | 0,84 | 175 | 213 | 243 | 305 | 152 | 182 | 213 | 129 | 160 | 190 | 235 | 105 | 129 | 152 | 83 | 99 | 114 | 145 | 38 | 45 | 53 |
| 10 | 0,63 | 144 | 182 | 205 | 260 | 129 | 150 | 182 | 114 | 137 | 160 | 200 | 91 | 105 | 129 | 68 | 83 | 99 | 120 | 30 | 38 | 45 |
| 15 | 0,42 | 114 | 144 | 157 | 215 | 106 | 129 | 152 | 91 | 114 | 129 | 160 | 75 | 91 | 106 | 53 | 68 | 78 | 100 | - | 30 | 38 |
| 20 | 0,32 | 99 | 121 | 144 | 185 | 91 | 106 | 121 | 76 | 91 | 106 | 140 | 60 | 76 | 91 | 45 | 60 | 68 | 85 | - | 25 | 30 |
| 25 | 0,25 | 91 | 106 | 129 | 160 | 76 | 91 | 114 | 68 | 83 | 99 | 120 | 53 | 68 | 76 | 38 | 53 | 60 | 70 | - | - | 28 |
| 30 | 0,21 | 83 | 99 | 114 | 146 | 68 | 83 | 105 | 60 | 76 | 91 | 110 | 45 | 60 | 68 | 35 | 45 | 53 | 65 | - | - | - |
| 40 | 0,16 | 68 | 83 | 99 | 120 | 60 | 76 | 91 | 53 | 60 | 76 | 90 | 42 | 53 | 53 | 30 | 36 | 45 | 60 | - | - | - |

Tomado de: Diseño de un sistema integrado de riego superficial (surcos, melgas y cuadros) (Acuña, C. 2014)

Si la pendiente longitudinal es poca, los surcos tendrán que ser anchos o más profundos.

Tabla 14. Largo máximo de surcos (m), según pendiente, textura y profundidad del suelo

| Pendiente, % | Arenosa | | | Franca | | | Arcillosa | | |
|--------------|---------------------------|-----|-----|--------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| | PROFUNDIDAD DEL SUELO, cm | | | | | | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 |
| 0.25 | 150 | 220 | 265 | 250 | 350 | 440 | 320 | 460 | 535 |
| 0.50 | 105 | 145 | 180 | 170 | 245 | 300 | 225 | 310 | 380 |
| 0.75 | 80 | 115 | 145 | 140 | 190 | 235 | 175 | 250 | 305 |
| 1.00 | 70 | 100 | 120 | 115 | 165 | 200 | 150 | 230 | 260 |
| 1.50 | 60 | 80 | 100 | 95 | 130 | 160 | 120 | 175 | 215 |
| 2.00 | 50 | 70 | 85 | 80 | 110 | 140 | 105 | 145 | 185 |

Tomado de Manual de riego parcelario (Maldonado, T. 2001)

Tabla 15. Largo máximo de surcos (m), según pendiente y textura del suelo

| Pendiente % | Longitud del surco (m) | | | | |
|-------------|------------------------|--------------|----------------|------------------|-----------|
| | Arenosa | Areno franca | Franco arenosa | Franco arcillosa | Arcillosa |
| 0.2 – 0.3 | - | - | - | - | > 350 |
| 0.3 – 0.4 | 60-90 | 75-150 | 90-250 | 180-300 | 200 - 300 |
| 0.4 – 0.6 | 60-90 | 75-150 | 90-180 | 90-200 | -- |

Fuente: Riego por pulsos en maíz regando por surcos (Antúnez, M. 2011a)

Diseño de riego por surcos

La aplicación de agua por medio de surcos implica que la zona de raíces en el suelo se humedezca por la infiltración de agua a través del perímetro mojado de pequeños cauces, los surcos, que constituyen la unidad de riego. Dado un determinado espaciamiento entre surcos, el agua cubre parcialmente el terreno (inundación parcial) y lo humedece por efecto de su avance tanto en profundidad como lateralmente.

Con respecto al tipo de suelo, este método es indicado para aquellos con buena velocidad de infiltración (aunque no excesiva) y baja erodabilidad.

También se presta para suelos con tendencia a formar costras, que impiden la germinación.

La eficiencia del sistema puede considerarse media (cuadro 3) en tanto que los costos de instalación y operación no son elevados pudiéndoselo emplear con escasos trabajos de nivelación, en la implantación de cultivos anuales.

Adaptación y diseño

| | |
|--------------------------|--|
| Suelos: | Cualquier tipo de suelos, excepto: arenas de infiltración rápida con distribución de agua lateral muy deficiente. Suelos con altas concentraciones salinas. Suelos que se agrieten produciendo peligro de desbordamiento del surco o por erosión lateral. |
| Pendiente del terreno: | Menores de 1 %. Si la precipitación no es intensa se acepta hasta un 3 %. Si la precipitación es tal que provoca problemas de erosión se acepta como máximo 0.5 %. Los terrenos deben estar parejos y con pendientes uniformes, en este caso los surcos pueden ser transversales a la pendiente natural del terreno que puede ser hasta del 15 %. |
| Infiltración: | De lenta a moderada, se mide en lps/100 m de surco. (ver tabla anexa) |
| Anchura entre surcos: | Varía de acuerdo al cultivo y a la maquinaria agrícola que se use. |
| Longitud: | Esta depende de la infiltración, el gasto máximo permisible en el surco el que a su vez depende de la pendiente y grado de erodabilidad del suelo. Es la distancia que el gasto de riego adecuado máximo avanza en la cuarta parte del tiempo necesario para que la lámina requerida se infiltre en el suelo. Se anexa tabla con longitudes máximas recomendables. |
| Sección transversal: | En forma de V o U, de 15 a 20 cm. de profundidad, de 25 a 30 cm. en la parte superior. |
| Gasto máximo no erosivo: | Se calcula con $Q = 0.631/S$. donde Q= gasto, lps. y S = pendiente de surcos, %. En surcos con pendientes planas los gastos pueden ser limitados por la capacidad del surco. Los surcos de hortalizas tienen capacidades de 1.3 a 1.6 lps. Los surcos de tamaño medio como los del maíz son de 1,9 a 2.5 lps. y los grandes como los del algodón suelen llevar hasta 3.2 lps. |
| Tiempo de riego: | El tiempo estimado en el que se debe aplicar el gasto, es el tiempo que se necesita para que la lámina neta se infiltre, más el tiempo necesario para que el gasto de riego alcance el extremo final del surco que se está regando. |
| Cultivos: | Todos los cultivos de escarda y que se siembran en hileras: maíz, sorgo, algodón, soya, legumbres, caña de azúcar y frutales. |
| Eficiencia del riego: | De 65 a 70 %. |
| Características | Si se maneja bien el agua, la eficiencia de campo es elevada. En las importantes: áreas donde es necesario el drenaje superficial, se puede utilizar los mismos surcos para evacuar rápidamente el escurrimiento producido por las lluvias. El método puede utilizarse en terrenos con pendientes fuertes. |

Fuente: Apuntes de la materia Riego y Drenaje. (Cisneros, R. 2013)

Para el diseño de un sistema de riego por surco se requiere los siguientes datos

- Infiltración básica (Ib): 8 mm/h
- Densidad aparente (da): 1.35 g/cm³
- Capacidad de campo (CC): 27% (θ_g)
- Punto de marchitez permanente (PMP): 13% (θ_g);
- Profundidad radicular: 70 cm; prof radicular efectiva = 45 cm.
- Evapotranspiración = 3.2 mm/día

Diseño riego por surco primer método

1. Longitud de surcos (L).

Para fijar la longitud de los surcos según Fuentes (1998) citado por (Cisneros, R. 2013), está condicionada por los siguientes factores:

- Económicos: a surcos más pequeños aumenta la mano de obra, por lo que se incrementan los costos.
- Textura del suelo: en suelos de textura arenosa hay que limitar la longitud de los surcos, para evitar la larga permanencia del agua y la percolación profunda.
- Cultivo: las plantas de raíces profundas necesitan mayor dosis de riego que las de raíces someras; por lo tanto, en aquellas se puede aumentar la longitud de los surcos, con el fin de incrementar la permanencia del agua en los mismos.

2. Cálculo del gasto por surco no erosivo (Q).

Este se calcula con la fórmula de Criddle

$$Q_{\text{máx}} = \frac{C}{S}$$

Donde: Q_{max} = caudal máximo no erosivo

$C = 0,57$ para suelos arenosos

$C = 0,628$ para suelos francos

$C = 0,96$ para suelo arcillosos

S = Pendiente en %

3. Tiempo de riego por surco (T).

Este se calcula mediante:

$$T_r = \frac{Vol}{3,6 \times Q} = \frac{L_r \times L \times W}{3,6 \times Q}$$

Donde: Tiempo de riego en horas

Vol = volumen por aplicar (m³)

L_r = lámina por aplicar (m)

W = ancho del surco (m)

L = longitud del surco (m)

Q = gasto por surco no erosivo (lps)

Suponiendo que se entrega en la bocatoma del terreno un gasto (Q_t).

Debemos calcular el número de surcos que podemos regar al mismo tiempo, así como otras variables a conocer:

$$\text{Número de surcos a regar} = \frac{Q_t}{Q}$$

Superficie del surco (A) = Largo x Ancho del surco (m)

Superficie de riego por serie (A_s) = Número de surcos x superficie del surco

$$\text{Avance de riego por hora (Arh)} = \frac{A_s}{T_r}$$

Avance de riego por día (Ard) = Arh x 24 hr

$$\text{Número de días de riego} = \frac{A}{\text{Ard}}$$

Diseño riego por surco segundo método

El segundo método consiste de:

1. Cálculo de la Lámina neta de riego (LARA)

Lámina de agua rápidamente aprovechable

$$\text{LARA} = \frac{(\text{CC} - \text{PM})}{100} \times \text{Da} \times \text{Pef} \times \text{Ag} = \frac{32 - 15}{100} \times 1.34 \times 45 \times 0.4 = 4.1 \text{ cm}$$

Donde: CC = Capacidad de campo

PM = Punto de marchitez

Da = Densidad aparente

Pef = 70% (Prof. total de raíces)

Ag = Factor de agotamiento, también llamado Umbral de riego

2. Frecuencia de riego Fr

$$\text{Fr} = \frac{\text{Lara}}{\text{Etc}} = \frac{41 \text{ mm}}{3.2 \text{ mm/día}} \approx 13 \text{ días}$$

Donde: Fr = Frecuencia de riego (Debe ser entero = Fr)

3. Periodo de riego (Pr).

El periodo es definido como el tiempo necesario para irrigar toda el área

$$\text{Pr} = \text{Fr (aj)} - \text{Días no laborables} = 13 - 3 \text{ días} = 10 \text{ días}$$

4. Lámina de riego ajustada, Lr (aj)

$$\text{Lr (aj)} = \text{Fr (aj)} \times \text{E}_{\text{tmax}}; \text{Lr (aj)} < \text{LARA}$$

$$\text{Lr(aj)} = 13 \text{ días} \times 3.4 \text{ mm/día} = 44.2 \text{ mm}$$

5. Lámina total de riego, Lb

Lámina total de riego, también llamada lámina bruta Lb

$$Lb = \frac{Lr (aj)}{Efa} = \frac{44.2 \text{ mm}}{45\%} = 98.2 \text{ mm}$$

6. Caudal máximo no erosivo (Qmne)

Para Gardner, citado por (Acuña, C. 2014), la ecuación para calcular el caudal máximo no erosivo en surcos es:

$$Qmne = \frac{C}{S^a} = \frac{0,998}{0,3^{0,55}} = 1,94 \text{ l/s}$$

Donde: Qmne = Caudal máximo no erosivo (lps)

S = Pendiente en %, y

Los valores de C y a dependen de la textura del suelo

| Textura | C | a |
|------------------|-------|-------|
| Arcillosa | 0,892 | 0,937 |
| Franca arcillosa | 0,998 | 0,55 |
| Franco | 0,613 | 0,733 |
| Arenas francas | 0,644 | 0,704 |
| Arenosas | 0,665 | 0,548 |

7. Espaciamiento de los surcos (E)

El espaciamiento de los surcos, o sea la distancia entre surco y surco, depende de la naturaleza física del suelo y de la profundidad del suelo que se intenta mojar.

Considerando el tipo de suelo el espaciamiento entre surcos se puede estimar mediante la siguiente fórmula:

$$E = P \text{ ef} \times Cs$$

Donde: E = espaciamiento entre surcos (metros)

P ef= profundidad efectiva de raíces del cultivo (metros)

Cs = coeficiente que depende del tipo de suelo

- en suelos arcillosos → Cs = 2,5

- en suelos franco arcillosos → Cs = 2,0

- en suelos franco limosos → Cs = 1,73

- en suelos francos → Cs = 1,5

- en suelos arenosos → Cs = 0,52

8. Largo máximo del surco (Lmax)

$$L_{\text{máx}} = 2.69 (fi) (Ln)^{0.5} (Qmne)^{0.555}$$

Donde:

Lmáx = Longitud máxima del surco (m)

fi = Factor de infiltración, (adimensional) (ver el cuadro 9)

Qmne = Caudal máximo no erosivo (lps)

Ln = Lámina neta (cm)

También puede calcularse empleando la siguiente fórmula:

$$L_{\text{máx}} = \frac{C \times Qmne^a}{Ln^b \times Ib^c} = \frac{44.3 \times 1.94^{0.8}}{41^{-0.073} \times 0.8^{0.7}} = 115 \text{ m} *$$

Donde: L = Longitud del surco (m)

Ib = Infiltración básica (cm/hr) Ver tabla en anexos

Q y Ln tienen el mismo significado y dimensiones que en la fórmula anterior

Los valores de los coeficientes a, b, c y C se detallan en el siguiente cuadro.

| Pendiente (%) | a | b | c | C |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|
| 0,25 | 0,8 | -0,073 | 0,7 | 44,3 |
| 0,75 | 0,4 | -0,075 | 0,3 | 52 |
| 1,5 | 0,4 | -0,07 | 0,3 | 48 |

Cuadro 7: Valores de coeficientes a, b, c y C
Formula desarrollada por el autor

Nota. Los valores de longitud máxima son referenciales, verifique su valor con los datos del cuadro 8.

| Pdte S (%) | TEXTURA DEL SUELO | | | | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|-----|-----|--------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| | Arenosa | | | Franca | | | Arcillosa | | |
| | Altura de la lámina a aplicar, mm | | | | | | | | |
| | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 | 50 | 100 | 150 |
| 0,25 | 150 | 220 | 265 | 250 | 350 | 440 | 320 | 460 | 535 |
| 0,50 | 105 | 145 | 180 | 170 | 245 | 300 | 225 | 310 | 380 |
| 0,75 | 80 | 115 | 145 | 140 | 190 | 235 | 175 | 250 | 305 |
| 1,00 | 70 | 100 | 120 | 115 | 165 | 200 | 150 | 230 | 260 |
| 1,50 | 60 | 80 | 100 | 95 | 130 | 160 | 120 | 175 | 215 |
| 2,00 | 50 | 70 | 85 | 80 | 110 | 140 | 105 | 145 | 185 |

Cuadro 8. Longitud máxima de surcos (m), según pendiente, textura y profundidad del suelo

| Infiltración básica (cm/hr) | fi |
|-----------------------------|----|
| < 1 | 31 |
| 1.1 - 2.5 | 24 |
| 2.6 - 5.0 | 17 |
| 5.1 - 7.5 | 10 |
| 7.6 - 10.0 | 7 |
| 10.1 - 15.0 | 4 |

Fuente: Apuntes de riego y drenaje (Cisneros, R. 2013)

9. Tiempo total de riego, Tr

$$T_R = b \sqrt{\frac{Ln}{c}} = \sqrt[.779]{\frac{4.1}{1.56}} = 3.45 \text{ horas}$$

Donde: TR = tiempo de riego, (horas)

Ln = lámina o altura de agua aprovechable (centímetros)

b y c = constantes que representan la infiltración de agua en el suelo

| Tipo suelo | b | c |
|------------------|-------|-------|
| Arenoso | 0,683 | 0,710 |
| Franco Arenoso | 0,711 | 0,850 |
| Franco | 0,757 | 1,321 |
| Franco Arcilloso | 0,779 | 1,560 |
| Arcilloso | 0,799 | 2,284 |

Cuadro 9. Coeficientes b, c de pruebas de infiltración

Adaptado de Riego por surco (Comisión Nacional de Riego 2010)

En el siguiente cuadro se muestra una referencia para definir el tiempo de riego (horas) necesario según textura del suelo y lámina de riego a infiltrar (mm).

| Lamina neta (mm) | Arenoso | Franco Arenoso | Franco | Franco Arcilloso | Arcilloso |
|------------------|---------|----------------|--------|------------------|-----------|
| 10 | 1,7 | 1,3 | 0,7 | 0,6 | 0,4 |
| 15 | 3,0 | 2,2 | 1,2 | 1,0 | 0,6 |
| 20 | 4,6 | 3,3 | 1,7 | 1,4 | 0,8 |
| 25 | 6,3 | 4,6 | 2,3 | 1,8 | 1,1 |
| 30 | 8,2 | 5,9 | 3,0 | 2,3 | 1,4 |
| 35 | 10,3 | 7,3 | 3,6 | 2,8 | 1,7 |
| 40 | 12,6 | 8,8 | 4,3 | 3,3 | 2,0 |

| | | | | | |
|----|------|------|-----|-----|-----|
| 45 | 14,9 | 10,4 | 5,0 | 3,9 | 2,3 |
| 50 | 17,4 | 12,1 | 5,8 | 4,5 | 2,7 |
| 55 | 20,0 | 13,8 | 6,6 | 5,0 | 3,0 |
| 60 | 22,8 | 15,6 | 7,4 | 5,6 | 3,3 |

El tiempo de riego también se puede determinar por la fórmula:

$$Tr = T_1 + t_2 + t_{adic};$$

t_{adic} = tiempo para hacer el cambio de riego desde un grupo de surcos hacia otro grupo de surcos.

10. Turnos de riego por día

$$\text{Turnos riego / día} = \frac{Tr}{Jd}$$

Tr = Tiempo total

Jr = jornada de riego

11. Turnos por periodo de riego

$$\text{Turnos / Pr} = \text{Turnos riego / día} * Pr$$

12. Superficie bajo riego por turno,

$$Sr / \text{Turno} = \frac{Sr}{\text{Turnos / Pr}}; Sr = An = \%At$$

13. Dosis bruta por turno, Db / Turno

$$Db / \text{Turno} = Sr / \text{Turno} * Lb$$

14. Caudal mínimo requerido, Q_{min}

$$Q_{min} = \frac{Db / \text{Turno}}{Tr}$$

Condición de diseño: $Q_0 > Q_{min}$.



RIEGO POR ASPERSIÓN

Capítulo 3

RIEGO POR ASPERSIÓN

Se denomina riego por aspersión, al método que consiste en aplicar agua a la superficie del terreno, rociándola a manera de una lluvia óptima.

El riego por aspersión consiste en la aplicación del agua en forma de lluvia artificial, la cual se forma debido a que el agua fluye a presión a través de pequeños orificios o boquillas. La presión se obtiene normalmente con equipos de bombeo, aunque puede ser obtenida por gravedad, si la fuente de agua está a una altura suficiente por encima del área a irrigar.



Fuente: Tomado de RAESA (RAESA s.f.)

Ventajas

- Se adapta a las distintas dosis de riego necesarias,
- No necesita nivelación. Facilita por lo general la mecanización, ya que hay una mayor posibilidad de mecanización de los suelos, dado que se eliminan los obstáculos propios del riego

por superficie.

- Fácil de automatizar
- Suele permitir el tratamiento con fertilizantes, fitosanitarios y lavado de sales.

Desventajas

- Mala uniformidad en el reparto por la acción de fuertes vientos o mal diseño.
- Alto coste de inversión inicial y mantenimiento y funcionamiento (energía).
- El sistema requiere estar presurizado para funcionar, lo cual implica generalmente el consumo de energía.
- Se reduce la eficiencia de riego en los extremos de los terrenos, esto se agrava en terrenos muy irregulares.
- Si el agua es de mala calidad, al quedar ésta sobre el follaje o tallos y evaporarse, deja en la superficie de la planta sales u otras sustancias que pueden ser tóxicas, tanto para la planta o para los animales, en caso de que el cultivo sea un forraje como alfalfa o pasto.
- Cuando la textura del suelo es predominantemente arcillosa o limosa, puede haber problemas por sellamiento superficial del suelo, disminuyendo la infiltración del agua.

Equipos de bombeo

La forma más usual de elevar el agua es por medio de bombas hidráulicas movidas por motores eléctricos o de explosión. En el caso

más general las bombas hidráulicas actúan en dos fases:

- **Aspiración:** Elevación del agua desde su nivel hasta la bomba.
- **Impulsión:** Conducción del agua desde la bomba hasta su destino.

La tubería que conduce el agua en la aspiración se llama tubería de aspiración (succión), y la que conduce en la impulsión se llama tubería de impulsión.

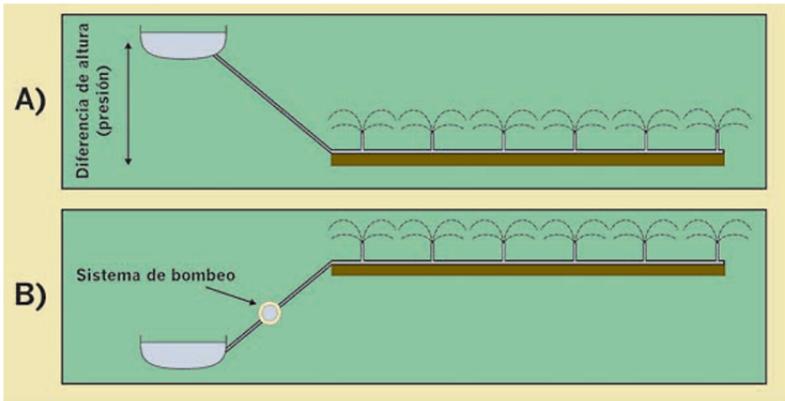
Para la selección de una bomba se tiene que considerar los siguientes aspectos:

- **Altura dinámica de aspiración (H_s):** Es la distancia vertical existente entre el eje de la bomba y el nivel inferior del agua, considerando pérdidas por fricción y menores.
- **Altura dinámica de descarga (H_i):** Es la altura vertical existente entre el nivel del emisor o el punto de descarga libre de la tubería de impulsión y el eje de la bomba considerando además pérdidas por fricción y otras.
- Caudal a bombear.

En el caso del riego localizado y del riego por aspersión, es necesario suministrar al agua una energía determinada para que ésta circule por las tuberías a presión.

En algunos casos cuando el agua circula o se encuentra almacenada en embalses, canales, ríos, y estos se encuentran situados a un nivel suficientemente alto con respecto a la parcela de riego, en donde el

agua conducida por la tubería adquiere la suficiente presión para hacer funcionar los emisores.



Fuente: Riego por aspersión, módulo 3 (Junta de Andalucía 2010).

Componentes del sistema de riego por aspersión

Los componentes mínimos que debe tener una instalación de riego por aspersión son:

- Unidad o grupo de bombeo (salvo cota piezométrica suficiente por gravedad)
- Tuberías de conducción, distribución y emisión
- Hidrantes o tomas de agua
- Elementos de control y regulación
- Emisores (Aspersores)

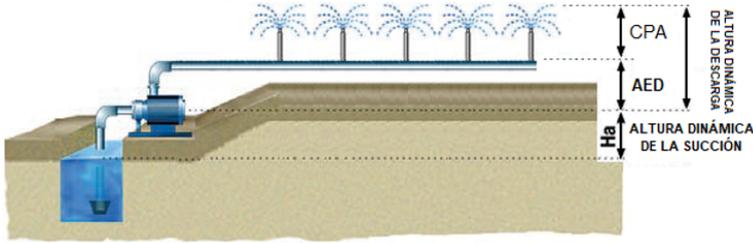


Figura 14. Esquema de un Sistema de riego por aspersión

Tipos de sistemas de riego por aspersión

- Móviles o viajeros:
- Móviles semifijos: Tubería móvil (Manual o Motorizada).
- Fijas: Tubería fija, permanente (cobertura total enterrada) y temporales (cobertura total aérea).

Tipos de aspersores

En general, los diferentes tipos de aspersores pueden agruparse atendiendo a distintos aspectos:

Según el mecanismo de giro se clasifican en:

- ***Aspersores de impacto:*** Son los más utilizados en agricultura. El giro se consigue mediante el impulso del chorro del agua sobre un brazo oscilante que se desplaza y vuelve a su posición inicial gracias a un muelle recuperador. Cuando el brazo vuelve a su posición original, golpea el cuerpo del aspersor provocando un ligero giro del mismo. La velocidad de giro es relativamente pequeña, por lo que se les considera aspersores de giro lento.
- ***Aspersores de turbina o engranaje:*** Su giro es continuo empleando la presión del agua a su paso por un mecanismo de

engranajes que va unido al cuerpo del aspersor. En general son aspersores de gran tamaño que trabajan con altas presiones y suministran caudales elevados.

Según la presión de trabajo se clasifican en:

- ***De baja presión:*** Los más usuales son los de impacto, que suelen trabajar a presiones menores de 2.5 kg/cm² (“kilos”). Por lo general tienen una sola boquilla de un diámetro de salida inferior a 4 milímetros, y generan un caudal inferior a 1.000 litros/hora. Usados generalmente en jardinería y riego de hortalizas.
- ***De media presión:*** Son aspersores que trabajan a una presión comprendida entre 2.5 y 4 kg/cm². Suelen llevar una o dos boquillas con un diámetro comprendido entre 4 y 7 milímetros, pudiendo suministrar caudales entre 1.000 y 6.000 litros/hora. Suelen utilizarse en marcos desde 12x12 metros a 24x24 metros, lo que indica que el alcance del aspersor puede variar de 12 a 24 metros.
- ***De alta presión:*** Son aspersores cuya presión de funcionamiento es superior a los 4 kg/cm². Suelen ser de gran tamaño, más conocidos como “cañones”, y pueden tener una, dos o tres boquillas. El caudal del aspersor puede variar entre 6.000 y 40.000 litros/hora, aunque los grandes cañones pueden llegar a los 200.000 litros/hora (200 metros cúbicos/hora).

Distribución del agua sobre el suelo

El proceso de distribución del agua aplicada por cada aspersor no es uniforme en toda la superficie regada por él, sino que la cantidad de agua que cae en cada sitio varía en función de la distancia al aspersor.



Aspersor de impacto



Aspersor de turbina

Fuente: Netafim (Netafim 2019)

Cada tipo y modelo de aspersor origina una distribución del agua que depende principalmente del tamaño, ángulo y número de boquillas, de la presión de trabajo, la disposición de los aspersores en el campo y de las condiciones de viento.

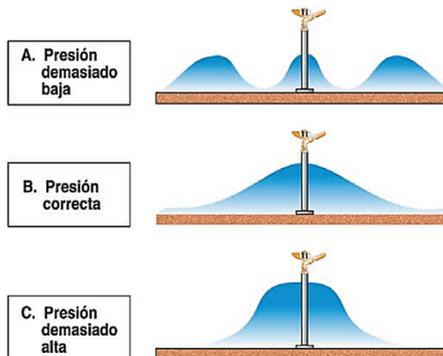
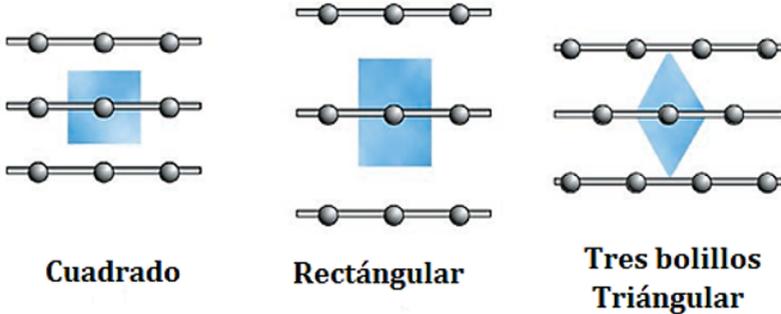


Figura 15. Efecto de la presión del agua en el aspersor en la distribución de la lluvia generada.

Tomado de: Riego por aspersión (Junta de Andalucía 2010)

Disposición de los aspersores

Para lograr una mayor uniformidad de aplicación de la lluvia provocada por los aspersores es necesario que exista un solape de las superficies regadas por los aspersores cercanos entre sí. Por esta razón, la elección del marco de riego es fundamental.



Tomado de Riego por aspersión (Junta de Andalucía 2010)

Los marcos de riego más habituales son: marco real o cuadrado, en rectángulo y en tresbolillo o triángulo.

Los siguientes valores de separación entre aspersores y ramales de aspersión son los más recomendados para cada tipo de marco de riego:

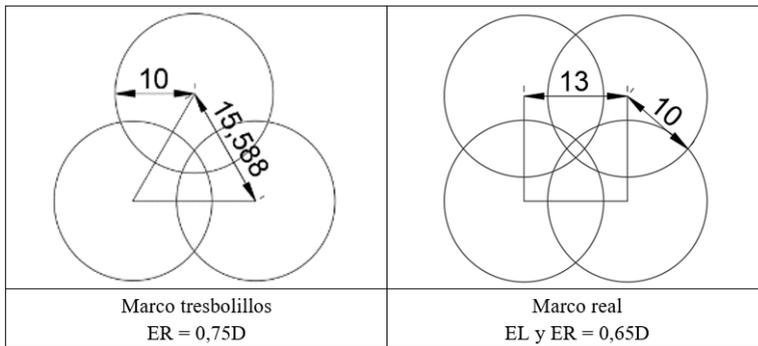
- En disposiciones en marco real (Cuadrado) la separación entre ramales y entre aspersores debe ser el 65% del diámetro.
- En disposiciones en tresbolillos (triángulo), la separación entre los aspersores debe ser el 77,9% y el espaciamiento entre ramales es 67.5% del diámetro mojado.

Espaciamiento según la disposición

La disposición, el espaciado y la presión operativa del aspersor influye significativamente sobre el coeficiente de uniformidad del aspersor.

Para determinar el espaciado más adecuado del aspersor según la disposición, modelo y presión operativa del mismo es recomendable utilizar el programa Winsipp de la Senninger, el cual permite visualizar la distribución del agua sobre el suelo, además que permite conocer el coeficiente de uniformidad para cada caso en particular.

Disposición y espaciado de los aspersores.



Elaborado por el autor

El espaciado de los aspersores y de las líneas regantes varía de acuerdo a la disposición de los emisores.

Cuadrada

$$ER = EL$$

$$ER = 0,6 - 0,7 D$$

Rectangular

$$ER = 0,5 - 0,83EL$$

$$ER = 0,4 - 0,5 D$$

$$EL = 0,7 - 0,8 D$$

Triangular

$$ER = 1,15 - 1,3 EL$$

$$ER = 0,75 - 0,8 D$$

$$EL = 0,6 - 0,7 D$$

Determinación del diámetro de la tubería principal

Determinar el diámetro óptimo de la tubería principal es un aspecto fundamental en el diseño de un sistema de riego presurizado, ya que esto reduce al mínimo los costos de instalación y operativos de dicho sistema.

Metodología para la determinación de diámetro económico óptimo para un sistema de riego por aspersión

Cuando se tiene que bombear un caudal definido Q , a lo largo de cierta distancia y que éste caudal llegue con determinada presión; es imprescindible la utilización de tubería para lograr tal fin; por lo tanto, la selección de su diámetro es un criterio tanto técnico como económico. Generalmente su selección se realiza en base al criterio de la velocidad de circulación del agua, y pocas veces se lo hace en función del costo total durante la vida útil del proyecto o la tubería.

Al momento de seleccionar el diámetro de la tubería no solo se debe considerar un criterio técnico (velocidad y pérdida por fricción); sino también debe estar basado en un criterio económico.

El criterio económico está sustentado en el análisis del Costo Total del Ciclo de Vida para una longitud de tubería dada. Dicho Costo Total incluye el costo inicial de instalación (costo fijo o de capital), más el costo de operación (bombeo) en el cual se incurre a lo largo de todo el tiempo de trabajo de la tubería.

Todos los diámetros de tubería tienen un costo de instalación fijo y un costo de operación que crece exponencialmente en la medida en que se aumenta el diámetro, pero los costos operativos del proyecto disminuyen conforme aumenta dicho diámetro.

Con la ayuda de una hoja de cálculo electrónica y teniendo en cuenta ciertas variables como el tiempo de duración de operación, el costo de la energía, longitud del ciclo de vida, eficiencia del motor y de la bomba y el costo de capital de la tubería, entre otros, se puede hacer un análisis considerando todo el espectro de posibilidades que influyen en la cuantificación del valor del costo total del ciclo de vida y así poder escoger la opción económica más viable para el proyecto.

La empresa agrícola es por naturaleza una empresa de producción, y como tal, está destinada a la generación de ingresos y utilidades como resultado de la venta de sus productos. Su utilidad se mide como la diferencia entre los ingresos generados en las ventas de sus productos y los egresos demandados en su producción. Para tener éxito una empresa agrícola debe reducir al máximo los costos de instalación y operación del sistema de riego, pero sin afectar su producción para lograr así obtener la máxima rentabilidad.

Diámetro óptimo económico

Cuando se hace referencia al diámetro óptimo económico se puede definir como aquel que minimiza el costo total anual, el cual consiste de la amortización anual de la inversión y el valor de las pérdidas de energía, matemáticamente este criterio puede expresarse como:

$$\frac{dC_1}{d\phi} \leq \frac{dC_2}{d\phi}$$

Donde:

C1: Costo anual debido a la inversión de diámetro “d”.

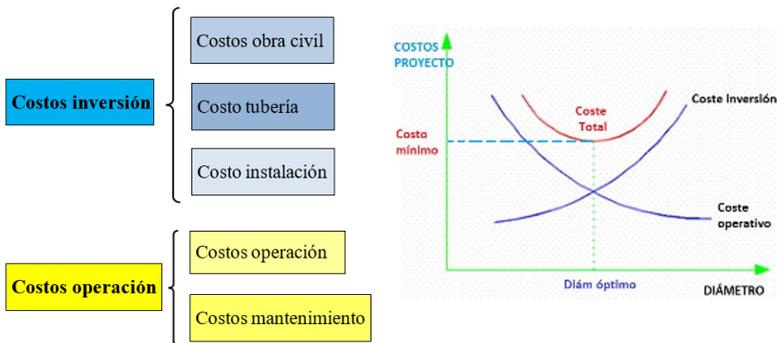
C2: Costo operativo del sistema de riego al bombear el caudal a través de la tubería de dicho diámetro.

Ctotales de inversión: Cfijos inversión + Cvariables inversión.

CFijos inversión: Ctubería+CBomba+CAcc Tub.+Cinst Bomba+Cinst tubería.

Cvariables inversión: Cbombeo + CMantenimiento.

En el mismo sentido es posible decir que es el diámetro más económico donde la suma de los gastos anuales debidos a la energía consumida más el valor de la anualidad por la inversión efectuada, es mínima.



Ejemplo

Se desea instalar una tubería de PVC UZ, de 384 m de longitud para conducir 360 m³/h (100 litros/s). Se estima una vida útil de 25 años y el mantenimiento anual en el 2 % de la inversión. El interés es del 12

%, la inflación del costo de la energía es del 7 %; el precio medio del Kw-hora es de 9.68 centavos y el grupo motobomba funciona durante 840 h anuales con una eficiencia de motobomba de 0.7. Determinar el diámetro económico adecuado.

Solución

Los diámetros disponibles y sus pérdidas de carga correspondientes son los que se indican a continuación.

Se tantea con distintos diámetros de tubería para ver cuál diámetro presenta el menor coste en el proyecto de riego. Se considera como capital inicial el valor de la tubería y se calculan los costos anuales fijos (amortizables y no amortizables) y variables.

Para el cálculo del N° de Reynolds, se consideró una viscosidad cinemática de agua igual a $1,007 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Para el cálculo del coeficiente de fricción, se empleó la ecuación de Pavlov:

Para este análisis se seguirá la metodología propuesta por Távora Fuente especificada no válida.

Análisis de los costos de instalación de la tubería:

Factor de recuperación 0,127499

| Diámetro (mm) | 160 | 200 | 250 | 315 |
|--|---------|---------|----------|----------|
| Precio unitario (tubo de 6 m) 0.63 MPa | 80,9 | 131,25 | 188,53 | 302,24 |
| Precio total (64 Tubos) | 5177,60 | 8400,00 | 12065,92 | 19343,36 |

| | | | | |
|---------------------------------------|--------|---------|---------|---------|
| Amortización (Inversión x Fa) | 660,14 | 1070,99 | 1538,39 | 2466,56 |
| Mantenimiento anual (2% inversión) | 103,55 | 168,00 | 241,32 | 386,87 |

Cálculo del costo de la energía

$$C = \frac{0,0098 \times Q \times H_T}{E_{fb} \times E_{fm}} \times t \times C_e = \frac{0,0098 \times 100 \times H_T}{0,7} \times 840 \times 0,0968 = 11,38 \text{ H}$$

Cálculo del diámetro económico

Análisis de la inversión

| | | | | | |
|--|------------------|------------|------------|----------------|------------|
| 01 Diámetro Nominal. (mm) | Presión | 160 | 200 | 250 | 315 |
| 02 Diámetro Interno (mm) | 0,63 Mpa | 152,16 | 190,20 | 237,75 | 299,57 |
| 03 Velocidad (m/s) | 100 lt/s | 5,50 | 3,52 | 2,25 | 1,42 |
| 04 Reynolds | Rugosidad | 836774,82 | 669419,86 | 535535,89 | 425028,48 |
| 05 ($\epsilon/3,7D$) | 0,003 | 5,33E-06 | 4,26E-06 | 3,41E-06 | 2,71E-06 |
| 06 Coeficiente de fricción (f). | | 0,0123 | 0,0127 | 0,0131 | 0,0136 |
| 07 Pérdida de carga por impulsión - (mca) | | 48,02 | 16,17 | 5,47 | 1,78 |
| 08 Altura manométrica - DHsist. (m. c. a.) | | 92,63 | 60,78 | 50,08 | 46,40 |
| 09 Rendimiento (n) | | 0,77 | 0,77 | 0,77 | 0,77 |
| 10 Potencia necesaria - Pnec. (HP) | | 161,45 | 105,25 | 86,72 | 80,34 |
| 11 Potencia consumida. (kW) | | 119,47 | 77,89 | 64,17 | 59,45 |
| 12 Consumo efectivo de energía (kWh) | 840 horas al año | 100354,56 | 65425,19 | 53905,59 | 49941,10 |
| 13 Costo de Tubería individual (6 m) | | 80,9 | 131,25 | 188,53 | 302,24 |
| 14 Costo Total Tubería | 64 Tubos | 5177,60 | 8400,00 | 12065,92 | 19343,36 |
| 15 Costo Instalación Tubería de Impulsión | | 600,00 | 630,00 | 665,00 | 700,00 |
| 16 Costo Inversión Inicial | | 5777,60 | 9030,00 | 12730,92 | 20043,36 |
| 17 Anualidad | 0,127499 | 736,64 | 1151,32 | 1623,19 | 2555,53 |
| 18 Costo energía consumida | ¢ 9,38 | 9413,26 | 6136,88 | 5056,34 | 4684,48 |
| 19 Costo anual de Mantenimiento de Sistema | | 234,36 | 246,08 | 259,75 | 273,42 |
| 20 Costo Operación del Sistema | | 9647,62 | 7534,29 | 5316,09 | 4957,90 |
| 21. Costo Anual Total (CAT) | | 10384,26 | 7524,29 | 6939,29 | 7513,42 |

Realizando una regresión lineal de los diámetros analizados y costos anuales generados, se obtiene la siguiente ecuación:

$$CAT = 0,3524D^2 - 184,38D + 30703$$

Derivando esta ecuación se obtiene:

$$\frac{dCAT}{dD} = 0,705D - 184,38$$

Resolviendo esta expresión resulta: $D = 261 \text{ mm}$

La tubería de diámetro comercial más económico para este proyecto es de 250 mm.

Cálculo de la tubería alimentadora de la subunidad de riego

Laterales alimentadas por un punto intermedio

Con frecuencia se presenta una situación como la de la figura x, en la que el lateral consta de dos ramales (uno a cada lado de la tubería alimentadora). En este caso hay que determinar el punto óptimo de la lateral en que debe conectarse a la terciaria de tal manera que las presiones mínimas (presión operativa) sean iguales en los dos extremos de la lateral. Cuando el terreno es horizontal, el punto óptimo es evidentemente el centro de la lateral. Cuando el terreno tiene una pendiente “S”, este punto óptimo está más cerca del extremo más alto de la lateral.

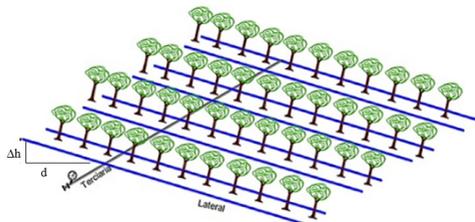
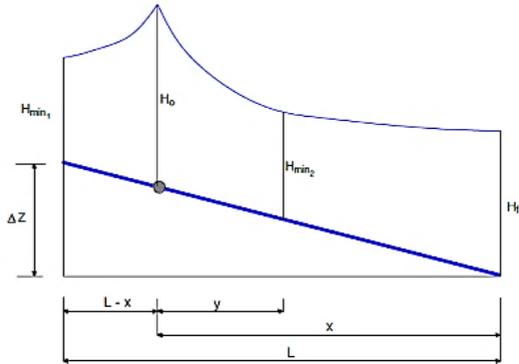


Figura 16. Esquema de subunidad de riego con laterales alimentados por un punto intermedio.

Tomada de: Determinación del punto de alimentación de una subunidad de riego con desnivel. Arviza, J. y Palau, V. (2016).

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

Sea x la distancia del punto óptimo al extremo más bajo. El cálculo se desarrolla por tanteos, siguiendo los pasos siguientes:



Se elige un diámetro para la lateral y se calcula hf , pérdida de carga por fricción en la tubería de longitud l , número de emisores y caudal igual a la suma de los caudales de los dos ramales.

$$hf_{-T} = S \cdot F \cdot l$$

1. Se calcula “ d ”, desnivel entre ambos extremos de la lateral,

$$d = S \cdot L$$

En todo caso se considera que “ d ” e “ S ” son positivos

2. Se calcula la diferencia de presión $h_m - h_n$ según la ecuación ()

$$h_m - h_n = t \cdot hf_{-T}$$

Se comprueba que $h_m - h_n < \Delta H_l$. (ΔH_l es la pérdida de presión máxima admisible en la lateral). Si tal condición no se cumple, el

- El punto de alimentación, y por lo tanto el valor de x se desplaza ligeramente si es necesario para no coincidir con una fila de cultivos. Como norma general, el desplazamiento no debe ser mayor a $\frac{3}{4}$ de la separación entre líneas regantes cuando es hacia arriba, y $\frac{1}{4}$ de la separación cuando es hacia abajo.
- Se calcula h_m , presión inicial de los dos ramales según la ecuación (10)

$$h_m = h_a + m \cdot h_f \cdot T \cdot (x/L - 0,5) \cdot d$$

Donde h_a es la presión operativa de aspersor y “ m ” es un factor en función de $d/h_f T$ cuyos valores se muestran en la tabla 11. También se puede calcular en función de x/l según la ecuación (11).

$$m = \left(\frac{x}{L}\right)^{2.75} - \frac{1}{4} \left(\left(\frac{x}{L}\right)^{3.75} + \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{3.75} \right) \left(\left(1 - \frac{x}{L}\right) \left(\left(\frac{x}{L}\right)^{2.75} + \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{2.75} \right) \right)$$

- Se calcula h_n , presión mínima común en ambos ramales según ecuación:

$$H_n = h_m - t \cdot h_f T$$

Tabla 16. Tabla para determinar x/l en laterales alimentadas por un punto intermedio

| d/h_f | x/l | m | t |
|---------|-------|------|-------|
| 0,0 | 0,500 | 0,11 | 0,149 |
| 0,1 | 0,555 | 0,12 | 0,148 |
| 0,2 | 0,604 | 0,13 | 0,154 |
| 0,3 | 0,648 | 0,16 | 0,165 |
| 0,4 | 0,687 | 0,20 | 0,169 |
| 0,5 | 0,723 | 0,23 | 0,165 |
| 0,6 | 0,755 | 0,26 | 0,163 |

| | | | |
|-----|-------|------|-------|
| 0,7 | 0,783 | 0,31 | 0,154 |
| 0,8 | 0,809 | 0,34 | 0,146 |
| 0,9 | 0,833 | 0,37 | 0,138 |
| 1,0 | 0,854 | 0,41 | 0,132 |
| 1,1 | 0,873 | 0,45 | 0,126 |
| 1,2 | 0,891 | 0,48 | 0,111 |
| 1,3 | 0,906 | 0,53 | 0,097 |
| 1,4 | 0,920 | 0,55 | 0,084 |
| 1,5 | 0,933 | 0,57 | 0,072 |
| 1,6 | 0,944 | 0,59 | 0,062 |
| 1,7 | 0,954 | 0,62 | 0,052 |
| 1,8 | 0,963 | 0,64 | 0,043 |
| 1,9 | 0,971 | 0,67 | 0,029 |
| 2,0 | 0,978 | 0,70 | 0,022 |
| 2,1 | 0,983 | 0,72 | 0,012 |
| 2,2 | 0,988 | 0,72 | 0,007 |
| 2,3 | 0,992 | 0,73 | 0,003 |
| 2,4 | 0,995 | 0,74 | 0,001 |
| 2,5 | 0,998 | 0,75 | 0,001 |
| 2,6 | 0,999 | 0,75 | 0,001 |
| 2,7 | 1,000 | 0,75 | 0,001 |

Tomado de: Determinación del punto de alimentación en subunidades de riego localizado (Arviza, J. y Palau, V. 2016)

Clasificación de los sistemas de aspersión.

Tipos de sistemas de riego por aspersión

Los sistemas de aspersión suelen clasificarse según el grado de movilidad de los diversos componentes que integran el sistema.

De esta manera se facilita la comprensión de su funcionamiento y además se ofrece una mejor idea acerca de los costos necesarios e inversiones a realizar. De forma general los costes de inversión se incrementan y los requerimientos de mano de obra disminuyen a medida que aumenta el número de elementos fijos del sistema.

Los sistemas de aspersión se clasifican en dos grupos: sistemas estacionarios y sistemas de desplazamiento continuo.

Sistemas estacionarios

Son aquellos que permanecen fijos mientras riegan. A su vez se pueden clasificar en móviles, semifijos y fijos.

Móviles: Son aquellos en los que todos los elementos de la instalación son móviles: tuberías primarias, secundarias y terciarias, si las hubiera, ramales de aspersión, portaaspersores yaspersores. También el equipo de bombeo puede ser móvil, normalmente accionado por un motor de combustión conectado a la toma de fuerza de un tractor, que se va desplazando.

Normalmente estos equipos suelen usarse en parcelas pequeñas o para dar riegos complementarios. También se usan en parcelas de mayor tamaño por requerir una inversión inicial reducida, aunque su uso tiende a ser cada vez menos debido al problema que suponen la movilización de las tuberías.

Los inconvenientes más destacables son que tienen un elevado coste de aplicación (mano de obra para realizar los cambios de posturas,

transporte de tuberías, etc.), problemas en el cambio de postura (ya que es preciso programar bien el resto de tareas que requiere el cultivo), etc.).

Semifijos: Son aquellos que normalmente tienen fijos el equipo de bombeo y la red de tuberías principales, las cuales suelen ir enterradas. En caso de existir tuberías secundarias y terciarias, éstas podrían ir enterradas también. Pueden ser a su vez:

- De tubería móvil, cuando el ramal de aspersión se cambia de toma o boca de riego con los cambios de posturas de riego. Es frecuente que los ramales lleven directamente acoplados los aspersores o bien ir dotados de mangueras que desplazan a los aspersores una determinada distancia (30 a 45 metros) pudiéndose realizar varias posturas de riego sin necesidad de mover el ramal de aspersión.
- De tubería fija, cuando el ramal está enterrado en el suelo y para cambiar de postura se mueven los portaaspersores y aspersores.

Fijos: Son aquellos sistemas que mantienen inmóviles todos los elementos que componen el sistema de riego.

Éstos son sistemas de cobertura total, en los que los aspersores mojan toda la superficie que compone una unidad de riego. Se pueden diferenciar:

- Sistemas fijos permanentes, que son los que mantienen fijos todos sus elementos durante la vida útil de la instalación, por lo

que todas las tuberías deben estar enterradas. Requieren mucho cuidado y vigilancia en las operaciones de preparación de suelo y durante la campaña de cultivo con objeto de no dañar las tuberías y los tubos elevadores. Son muy usuales en jardinería y en cultivos como tabaco y maíz.

- Sistemas fijos temporales, los cuales se instalan al principio de la campaña de riego y se retiran al final de la misma, lo que implica que los ramales y sus tuberías de alimentación se encuentran sobre la superficie del terreno.

Sistemas de desplazamiento continuo

Son aquellos sistemas que se encuentran en movimiento mientras aplican el agua. Los más usuales son los pivotes, alas de avance frontal y los cañones enrolladores.

Pivotes o “pívol”: Son equipos de riegos autopropulsados que están constituidos fundamentalmente por una estructura metálica (ala de riego) que soporta la tubería con los emisores. La máquina gira alrededor de un extremo fijo (punto pivote), por donde recibe el agua y la energía eléctrica y en donde se sitúan los elementos de control. El ala describe un círculo o sector circular girando alrededor del extremo fijo, y sobre ella se sitúan los aspersores cuyo caudal aumenta conforme se aleja del eje, mientras que en el extremo libre se suele instalar un aspersor de gran caudal para cubrir una distancia comprendida entre 15 o 20 metros, incrementando de esa manera el alcance del pivote. La longitud del ala regante varía frecuentemente de 50 a 800 m.

Cañones de riego viajero.- Aspersor girante al extremo de una tubería móvil. El Aspersor va montado sobre un trineo o carretón y se mueve en línea recta ($v = 5$ a más de 30 m/hora). El caudal puede ser mayor a 60 m³/hora. Alcance = 50 m (con $p = 8$ atm). P normal = 6 atm.

La tubería puede ser de polietileno y se enrolla en un tambor de gran diámetro. Propulsión: por la presión del agua, que cede parte de su energía a 1) turbina en el cañón, o 2) ruedas del carretón.

Tuberías

En todo sistema de riego, la red de tuberías será la encargada de conducir el agua desde la fuente de agua, ya sea un pozo, un embalse o un río, hasta el área de cultivo. Las características principales de las tuberías plásticas de PVC de pared compacta y de PE (polietileno), son actualmente, los materiales más utilizados para el transporte y distribución del agua para riego agrícola.

Características

Los tubos de PVC suelen tener una longitud de 6 metros y son de color gris o blanco (PVC-EC) o bien azul o morado (PVC-UZ), con dos tipos de embocadura: unión mediante unión encolada para el tubo espigo campana o junta de caucho para el segundo.

Las características principales del PVC y que determinan su uso en la agricultura son la estabilidad dimensional, resistencia a los factores ambientales, reciclabilidad, además, bajo peso y durabilidad.

Características del PVC

- Es altamente resistente. Las tuberías de riego de PVC pueden durar más de sesenta años.
- Es versátil gracias a su flexibilidad lo que permite que sea usado en múltiples aplicaciones.
- Es estable e inerte por lo que es adecuado en riegos con agua ligera o medianamente ácidas.
- No arde por sí solo ni se quema con facilidad.
- Se puede adquirir con distintos niveles de dureza.
- Es flexible y puede manejarse esta cualidad sin que sea necesario utilizar altas temperaturas. Además, no pierde sus propiedades.
- Es muy económico.

Nota. Las tuberías de PVC orientado soportan resistencias a presión interna de más de 2 veces la presión nominal, lo que permite soportar sobrepresiones puntuales como los golpes de ariete y otras malfunciones en la red.

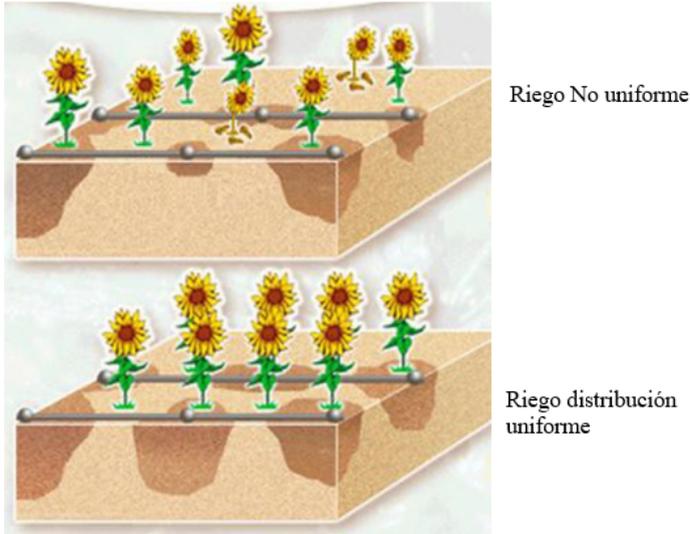
Presión nominal (PN)

La presión nominal (PN) es la presión hidráulica máxima que un componente es capaz de resistir en utilización continuada durante 50 años (largo plazo) a la temperatura de servicio de 20 °C.

Coefficiente de uniformidad

Índice que permite estimar el agua que se aplica al suelo. Cuanto más parecida sea la cantidad de agua que se ha infiltrado en todos los puntos de la parcela, mayor será la uniformidad del agua infiltrada.

Esto significa que todas las plantas dentro de la zona irrigada deberían recibir la misma cantidad de agua. EcuRed (s.f.)



Uniformidad del riego. Tomado de: Evaluación de la uniformidad de cintas de riego en condiciones de campo (2014)

La uniformidad de distribución es especialmente importante cuando se aplica el fertilizante junto al agua de riego.

Si la uniformidad es baja existirá mayor riesgo de déficit de agua en algunas zonas y de filtración profunda en otras. Se mide colocando vasos colectores en una superficie para medir la cantidad caída en cada uno de ellos y determinar estadísticamente el porcentaje de uniformidad en los volúmenes colectados.

Diversos son los factores que afectan la uniformidad del riego. Entre ellos se encuentra el hecho de que el chorro no se pulveriza de forma uniforme en todo su trayecto, provocando diferencias entre la

cantidad que aplica en su área de influencia, la presión a la que trabaja el aspersor, también ocurre variaciones por el arrastre de agua por el viento, el modelo del aspersor, etc.

En el caso de riego por goteo Ruíz, Lozano y Gavilán (2014) recomiendan tiempos de riego aproximados de 13, 15 y 20 minutos para cintas de 5, 3.8 y 2.5 l/h·m,

Diseño Sistema de Riego subfoliar

Se desea regar 15,2 hectáreas de cultivo de maíz sembradas en suelo franco arcilloso. La Etc de la zona es de 4,2 mm/día.

1. Lámina neta de riego (Ln)

Esta corresponde a la lámina de agua que se debe reponer en cada riego.

$$Ln = \frac{(CC - PM)}{100} \times da \times Pr \times Ag$$
$$Ln = \frac{(35 - 21,3)}{100} \times 1,4 \times 34\text{cm} \times 0,45 = 2,93 \text{ cm}$$

Donde: Ln = es la lámina de riego que se debe aplicar en cada riego (cm)

CC = es el contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo (cm^3/cm^3)

PM = es el contenido volumétrico de humedad a punto de marchitez permanente (cm^3/cm^3)

Pr = es la profundidad de raíces (cm)

Ag = es el factor de agotamiento (Umbral de riego).

2. Lámina bruta de riego (Lb)

$$Lb = \frac{Ln}{Ea} \quad \mathbf{VER} = Lb \times 100$$

Lb (Lr) = es la cantidad de agua que se requiere reponer en cada riego durante el desarrollo del cultivo (m³/ha).

Ea = es la eficiencia de la aplicación del riego (adimensional) Ver Tabla 11

$$Lb = \frac{Ln}{Ea} = \frac{2,93}{0,7} = 4,19 \text{ cm} = 419 \text{ m}^3/\text{ha}$$

3. Frecuencia o Intervalo de riego (Fr)

Este corresponde a la frecuencia de riego durante el periodo de mayor demanda de agua. El diseño de riego debe estar en función de esta frecuencia. Durante los meses cuando sea menor la evapotranspiración la frecuencia entre un riego y otro se puede alargar. El cálculo se hace a partir de la siguiente expresión:

$$Fr = \frac{Ln}{Etc}$$

Donde: Frecuencia de riego (días)

Etc = Evapotranspiración del cultivo (cm/día)

Lr = es la lámina de riego a reponer (cm)

$$Fr = \frac{Ln}{Etc} = \frac{2,93 \text{ cm}}{0,42 \text{ cm/día}} = 7 \text{ días}$$

4. Periodo de riego (días)

$$PR = Fr - \text{días de descanso}$$

$$PR = 7 - 2 = 5 \text{ días}$$

5. Tiempo o duración del riego (Tr)

$$Tr = \frac{Lr}{p}$$

Tr = es el tiempo de riego en cada unidad de riego (horas)

Lr = Lámina del riego (cm)

p = Precipitación o velocidad de aplicación del agua (cm/h)

Tabla 17. Valores de la EDa para varios CU y porcentajes de área adecuadamente regada.
Keller y Bliesner (1990).

| CU (%) | Porcentaje de área adecuadamente regada | | | | | | | |
|-----------|---|----|----|----|----|----|----|----|
| | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 |
| 94 | 88 | 88 | 92 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 |
| 92 | 83 | 87 | 90 | 92 | 93 | 95 | 96 | 97 |
| 90 | 79 | 84 | 87 | 89 | 92 | 93 | 95 | 97 |
| 88 | 75 | 81 | 84 | 87 | 90 | 92 | 94 | 96 |
| 86 | 71 | 77 | 82 | 85 | 88 | 91 | 93 | 96 |
| 84 | 67 | 74 | 79 | 83 | 86 | 89 | 92 | 95 |
| 82 | 63 | 71 | 77 | 81 | 85 | 88 | 91 | 94 |
| 80 | 59 | 68 | 74 | 79 | 83 | 87 | 90 | 94 |
| 78 | 55 | 65 | 71 | 77 | 81 | 86 | 89 | 93 |
| 76 | 50 | 61 | 69 | 75 | 80 | 84 | 88 | 92 |
| 74 | 46 | 58 | 66 | 73 | 78 | 83 | 87 | 92 |
| 72 | 42 | 55 | 64 | 70 | 76 | 82 | 86 | 91 |
| 70 | 38 | 52 | 61 | 68 | 75 | 80 | 85 | 90 |
| 68 | 34 | 49 | 58 | 66 | 73 | 79 | 85 | 90 |
| 66 | 30 | 45 | 56 | 64 | 71 | 78 | 84 | 89 |

Tomado de El riego por aspersión (Peña, E. 2012)

La eficiencia de la distribución del agua (Eda) en función del área adecuadamente regada puede calcularse mediante la ecuación de Allen (1987)

$$EDa = 100 + \left(606 - 24,9a + 0,349a^2 - 0,00186a^3\right) \left(1 - \frac{CU}{100}\right)$$

$$Tr = \frac{Lr}{p} = \frac{4,19}{6} = 7 \text{ horas}$$

$$Trm = Tr + Trev$$

Trm = es el tiempo de riego con cambio de posición de los módulos (horas)

Trev = Tiempo para revisión, cambio y mantenimiento del sistema

$$Trm = 7 + 1 = 8 \text{ horas}$$

6. Módulos de riego (m)

El número de módulos de riego se calcula con la fórmula:

$$m = \frac{2 \times P_R}{N}$$

m = Número de módulos de riego.

P_R = Periodo de riego.

N = Número de válvulas abiertas en paralelo.

$$m = \frac{2 \times P_R}{N} = \frac{2 \times 5}{2} = 5 \text{ módulos}$$

7. Tiempo total de Riego (Tt)

$$Tt = Trm \times m$$

$$Tt = 8 \times 5 = 40 \text{ horas}$$

8. Superficie de la Unidad de Riego (SUR)

La superficie de la unidad de riego es el área del terreno que se riega al mismo tiempo.

$$\text{SUR} = \frac{\text{Área neta}}{\text{m}}$$

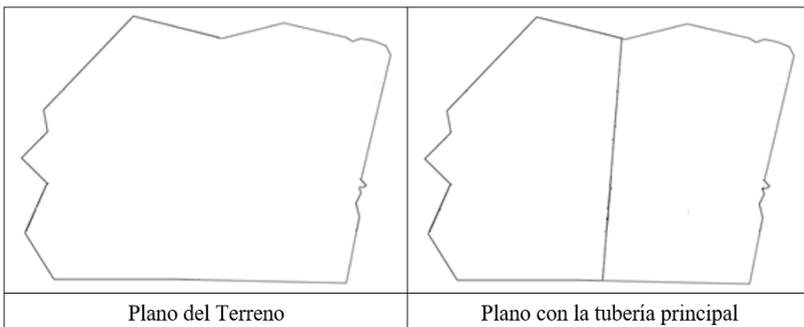
SUR = Superficie de unidad de riego en hectáreas (ha/mód)

Área neta = área a regar en hectáreas

$$\text{SUR} = \frac{\text{Área neta}}{\text{m}} = \frac{15 \text{ has}}{5 \text{ módulos}} = 3 \text{ has/mód}$$

La forma del módulo (o submódulo) de riego depende del terreno, del criterio del instalador y condiciones de campo.

Plano de un terreno a instalar un sistema de riego suprafoliar para maíz.



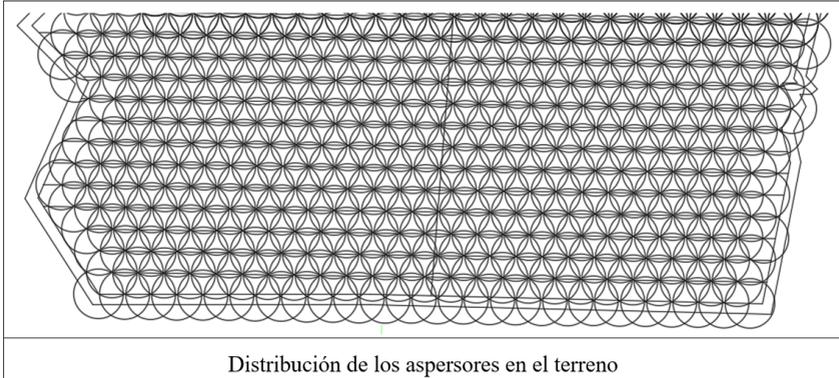
Largo y ancho del módulo (L_m y A_m)

Se utilizará el aspersor Senninger 3023-2 con 2,76 bares a un distanciamiento EL de 13 y ER de 15,6 m en triángulo. Precipitación = 6,1 mm/h

Cada submódulo tendrá un área de 1,5 hectáreas.

Número de aspersores por submódulo (NRoc/SubUR).

$$NRoc/SubUR = \frac{SUR/2}{EL \times ER} = \frac{15000}{13 \times 15,59} = 74 \text{ aspersores/SubUR}$$



Diseño de las unidades de riego

Se deberá escoger un largo y ancho de modulo que facilite la distribución de los aspersores en el campo con una forma adecuada del módulo de riego.

Se busca un número divisible que contenga con el menor exceso o déficit al valor calculado anteriormente. (74)

En este caso existen dos posibles alternativas:

- Alternativa 1: 75.- 5 líneas de 15 aspersores. Exceso 1 aspersor
- Alternativa 2: 72.- 8 líneas de 9 aspersores, o 9 líneas con 8 asp.
Déficit 2 aspersores.

Se escogerá la alternativa 2 de 9 líneas con 8 aspersores.

9. Largo y ancho del módulo (Lm y Am)

Largo módulo

$$Lm = EL \times N_{LR}$$

$$Lm = 13m \times 9 = 117 \text{ m.}$$

Ancho módulo

$$Am = ER \times N_{Roc}$$

$$Am = 15,6m \times 8 = 124,8 \text{ m}$$

$$\text{SUR ajustado} = \frac{N^{\circ}Roc \times Nll \times EL \times ER}{5000} = \frac{8 \times 9 \times 13 \times 15,6}{5000} = 2,92 \text{ Has/mod}$$

10. Cálculo de caudales

- Caudal del aspersor (q)

$$q = \frac{p \times EL \times ER}{1000} = \frac{6,1 \times 13 \times 15,6}{1000} 1,24 \text{ m}^3/\text{h} = 5,44 \text{ GPM}$$

En donde:

q = caudal del aspersor en m³/h

p = Precitación del aspersor en mm/h

EL = Espaciamiento entre líneas regantes

ER = Espaciamiento entre aspersores

- Caudal de la línea regante (Qll)

$$Qll = q \times NRoc = 5,44\text{gpm} \times 8 = 43,52 \text{ gpm}$$

- Caudal de la subunidad de riego (QValv)

$$= 391,68 \text{ gpm}$$

- Caudal del Sistema (QS)

$$Q_{\text{Sistema}} = Q_{\text{Valv}} \times N_{\text{Valv}} = 391,68\text{gpm} \times 2 = 783,36 \text{ gpm}$$

Comprobación

$$Q_{\text{Comp}} = 10 \times Q_s \times p = 10 \times 2,92 \text{ has/m} \times 6,1 \text{ mm/h} = 178,1 \text{ m}^3/\text{h} = 783,73 \text{ gpm}$$

11. Determinación del diámetro de tuberías

$$H_f \text{ ideal} = \frac{\text{PUR} + \text{AE}}{4,5} = \frac{28,1 + 2,5}{4,5} = 6,8 \text{ mca}$$

- Tubería principal (Etapa mitad del riego)

| Q m ³ /s | Ø mm | v m/s | J m/m | L m | Hf |
|---------------------|------|-------|--------|-----|-------------|
| 0,0495 | 200 | 1,61 | 0,0135 | 200 | 2,73 |

- Tubería principal (Etapa inicio del riego)

| Q m ³ /s | Ø mm | v m/s | J m/m | L m | Hf |
|---------------------|------|-------|--------|---------|------|
| 0,0247 | 200 | 0,8 | 0,0037 | 200 | 0,76 |
| 0,0247 | 140 | 1,64 | 0,0206 | 200 | 4,17 |
| | - | - | - | Total = | 4,93 |

- Tubería línea regante

$$H_f \text{ ideal} = 0,2 * \text{PUR} = 0,2 * 28,1 \text{ m} = 5,6 \text{ mca}$$

Tubería telescópica

| Q m ³ /s | Ø mm | f | J m/m | L m | Hf |
|---------------------|------|-----|--------|-----|------|
| 0,00274 | 50 | 0,4 | 0,0637 | 48 | 1,22 |
| ” | 40 | 0,4 | 0,1851 | 40 | 2,96 |

12. Cálculo de pérdidas menores

- En la succión

| | |
|----------------------|------|
| Accesorios | K |
| Codo 90° 200 mm: | 0,42 |
| Valv pie con colador | 5,90 |
| $K_T =$ | 6,32 |

$$\text{Carga de velocidad} = \frac{v^2}{19,6} = \frac{1,61^2}{19,6} = 0,13 \text{ m}$$

$$\text{Pérdida en succión} = C_v * \Sigma K_S = 0,13 * 6,32 = 0,83$$

- En la descarga

| | |
|----------------------|-------|
| Accesorios | K |
| Codo 90° 200 mm: | 0,42 |
| Válvula compuerta : | 0,55 |
| Válvula chekc : | 0,70 |
| Reductor 200 - 140 : | 1,22 |
| Tee : | 5,18 |
| Válvula PVC | 6,10 |
| $K_T =$ | 14,17 |

$$\text{Pérdida en descarga} = C_v * \Sigma K_D = 0,13 * 14,17 = 1,84 \text{ mca}$$

13. Altura Dinámica Total

- Altura dinámica en succión.

$$\text{ADS} = \text{AES} + C_v + \text{PaccS} + \text{HfS} = 3,6 + 0,13 + 0,83 + 0,8 = 5,36 \text{ mca}$$

Nota: HfS puede asumirse como 0,8 mca

- Altura dinámica en descarga

$$\text{ADD} = \text{AED} + \text{HfD} + 1,5\text{HfLR} + C_v + \text{Pacc} + C_p + \text{AE} = 0,5 + 4,93 + 1,5 * 4,18 + 0,13 + 1,84 + 28,3 + 2 \approx 43,97 \text{ mca}$$

- Altura Dinámica Total (HT)

$$\text{ADT (TDH)} = \text{ADS} + \text{ADD} = 5,36 + 43,97 = 49,33 \text{ m}$$

14. Potencia equipo de bombeo

$$\text{Pot} = \frac{Q \times H_T}{\eta}$$

En donde:

Pot = Potencia del equipo de bombeo

Q = Caudal sistema (l/s)

HT = Altura dinámica total (m)

η = Eficiencia de turbina (adimensional)

$$\text{Pot (HP)} = \frac{Q \times H_T}{76 \times \eta} = \frac{49,4 \times 49,33}{76 \times 0,8} = 40 \text{ HP}$$

Se requiere de un motor de 50 HP.

Determinación del punto de alimentación de las líneas regantes de una subunidad de riego con pendiente

Ejemplo:

La lateral de riego posee un espaciamiento entre aspersores de 11,6 m, entre líneas regantes la separación es de 9,86 m; la presión operativa es de 2,81 Kg/cm². El caudal nominal del aspersor es de 0,11 l/s (1,74 GPM) y la tubería tiene un diámetro interior de 14.2 mm. La pendiente de la tubería es del 1,3 %. La presión mínima de funcionamiento es de 10 mca y la máxima variación de presión admisible en subunidad de 5 m. La subunidad mide 139 m de ancho y 151 m de largo.

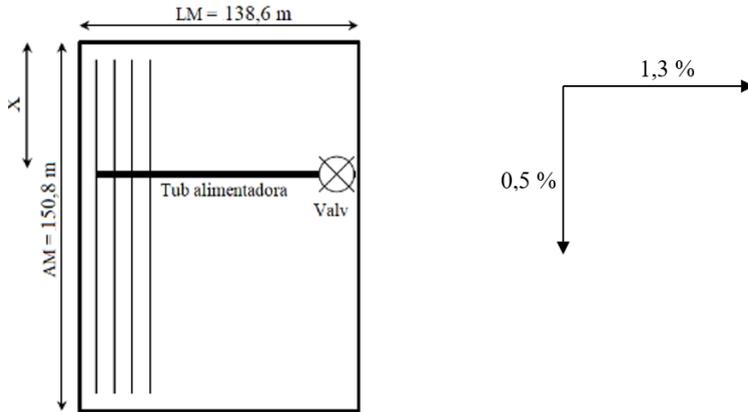


Figura 1. Esquema de distribución de tubería lateral y terciaria de la subunidad.

Elaborado por el autor

El reparto óptimo, R , se define como la relación entre las pérdidas en el lateral y en el total de la subunidad.

Montalvo y Arbiza, (1990) proponen una expresión para determinar el reparto óptimo, R , de la pérdida total de presión en función de la separación en laterales, E_l , y el coeficiente de forma de la subunidad, CF , definido como la relación entre las longitudes del lateral, L_l , y la terciaria, L_t .

Dependiendo del tipo de subunidad se proponen dos fórmulas:

a. Laterales alimentados por un extremo:

$$R = \frac{\Delta H_l}{\Delta H_s} = \frac{0,842CF^{0,1577}}{E_l^{0,06}}$$

b. Laterales alimentados por el punto medio:

$$R = \frac{\Delta H_l}{\Delta H_s} = \frac{0,776CF^{0,1402}}{E_l^{0,054}}$$

$$\Delta h_s = \frac{\Delta P_s}{\gamma} \pm Z_1 \pm Z_t \text{ pérdida de carga admisible en la subunidad}$$

(+) → Desnivel descendente

(-) → Desnivel ascendente

$$CF = \frac{Ll}{L_T} = \frac{150,8}{138,6} = 1,1$$

$$R = \frac{0,776 \times CF^{0,1402}}{El^{0,054}} = \frac{0,776 \times 1,1^{0,1402}}{9,9^{0,054}} = 0,7$$

Lo cual quiere decir que podemos perder el hasta 70 % en los laterales y el 30 % en la tubería alimentadora.

$$Z_1(d) = Sl_R \times Ll = 1,3\% \times 138,6 \text{ m} = 1,80 \text{ m.} \quad Sl_R = \text{Pendiente línea regante}$$

$$Z_t = St \times L_T = 0,5\% \times 150,8 \text{ m} = 0,75 \text{ m.} \quad St = \text{Pendiente alimentadora}$$

$$\Delta h_s = \frac{\Delta P_s}{\gamma} \pm Z_1 \pm Z_t = 5,6 - 1,8 + 0,75 = 4,55 \text{ m}$$

$$\Delta H_l = 0,7 \cdot 4,55 \text{ m.c.a.} = 3,19 \text{ m.c.a.}$$

$$\Delta H_t = 0,3 \cdot 4,55 \text{ m.c.a.} = 1,37 \text{ m.c.a.}$$

O sea, se puede tener una pérdida de carga máxima de 3,19 m.c.a. en el línea regante y 1,37 m.c.a. de perdida máxima de carga en la alimentadora.

Diámetro línea regante: 40 mm, alimentadora: 110 mm.

Se determina la pérdida en las líneas regantes y alimentadora

$$H_f = J \times L \times f$$

Donde:

H_f = Pérdida de carga en tubería

J = Gradiente de fricción: Q en GPM y D en mm

L = Longitud de la tubería

f = Factor de salidas múltiples de Christiansen

$$Q_{11} = 1,74 \text{ gpm} \times 13 = 22,62 \text{ gpm.}$$

$$J = \frac{4,762 \times 10^7 * (Q/C)^{1,8}}{D^{4,8}} = \frac{4,762 \times 10^7 * (22,62/145)^{1,8}}{40^{4,8}} = 0,034$$

$$H_f = J \times L \times f = 0,034 \times 150,8 \times 0,372 = \mathbf{1,93 \text{ mca}}$$
 se acepta $\varnothing_{LR} = 40 \text{ mm}$

$$Q_{ter} = 22,62 \text{ gpm} \times 14 = 316,68 \text{ gpm}$$

$$J = \frac{4,762 \times 10^7 * (Q/C)^{1,8}}{D^{4,8}} = \frac{4,762 \times 10^7 * (316,68/145)^{1,8}}{110^{4,8}} = 0,031$$

$H_f = J \times L \times f = 0,031 \times 138,6 \times 0,371 = 1,59 \text{ mca}$; pero se acepta $\varnothing_{Lter} = 110 \text{ mm}$ debido a que la suma de $\Delta H_i + \Delta H_t$ resulta menor a $\Delta h_s = 4,55 \text{ m}$.

$H_f = J \times L \times f = 0,031 \times 138,6 \times 0,371 = 1,59 \text{ mca}$; pero se acepta $\varnothing_{Lter} = 110 \text{ mm}$ debido a que la suma de $\Delta H_i + \Delta H_t$ resulta menor a $\Delta h_s = 4,55 \text{ m}$.

Calculando relación d/hf

| d/Hf | x/L | m | (d/Hf) De 0,9 a 1,0 aumenta 0,1 |
|------|-------|------|--------------------------------------|
| 0,8 | 0,809 | 0,34 | El d/hf calculado aumenta 0,033 |
| 0,9 | 0,833 | 0,37 | (x/L) De 0,833 a 0,854 aumenta 0,021 |
| 1,0 | 0,854 | 0,41 | (m) De 0,37 a 0,41 aumenta 0,04 |

$$0,1 \rightarrow 0,021$$

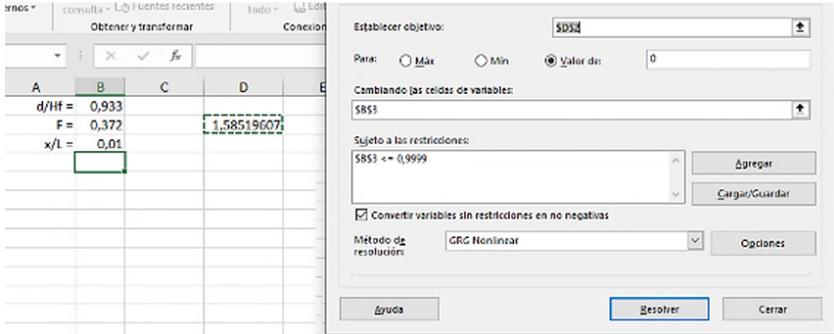
0,033 \rightarrow X, de donde $X = 0,007$; lo cual resulta que $x/L = 0,833 + 0,007 = 0,84$

De la tabla 11 se obtiene por interpolación $x/l = 0,84$; además esta tabla da $m = 0,38$ y $t = 0,136$

También se puede obtener x/l utilizando la función Solver de Excel:

La ecuación 9 debe ingresarse de la siguiente forma:

$$= \frac{d}{hf} \left(1 - \left(\frac{d \cdot F}{hf} \right)^{0,57} \right) + \left(\frac{d \cdot F}{hf} \right)^{1,57} - \left(\frac{x}{L} \right)^{2,75} + \left(1 - \frac{x}{L} \right)^{2,75}$$



El valor obtenido es Excel aplicando Solver es de 0,84.

Calculando el punto de alimentación desde el extremo más bajo la tubería:

$$x = 0,84 \times 150,8 \text{ m} \equiv 126,7 \text{ m}$$

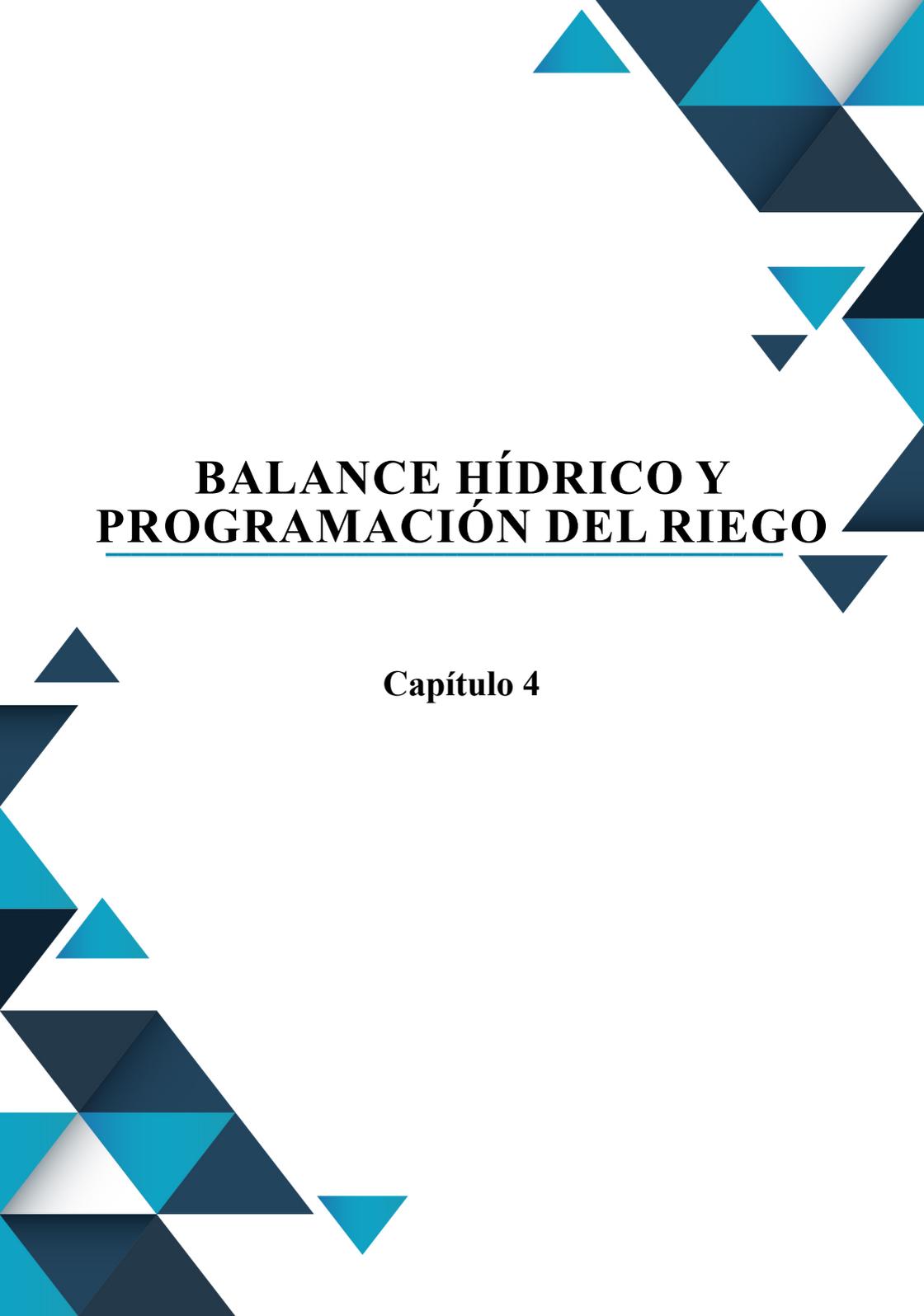
Calculando la presión inicial en cada tramo (hm)

$$hm = ha + m \cdot hf - d(x/L - 0,5) = 28,1 + 0,38 \cdot 1,93 - 1,8(0,84 - 0,5) = 28,22 \text{ m}$$

Calculando la presión mínima (hn)

$$hn = hm - t \cdot hfT = 28,22 - 0,136 \times 1,93 = 27,96 \text{ m.}$$

La cual es aceptable para el correcto funcionamiento de los aspersores.



BALANCE HÍDRICO Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

Capítulo 4

BALANCE HÍDRICO Y PROGRAMACIÓN DEL RIEGO

El conocimiento del balance hídrico del suelo en la zona radicular es fundamental para una buena gestión del agua de riego. Para un manejo adecuado del mismo, es necesario responder a tres preguntas: cuándo, cuánto y cómo regar. Las respuestas dependerán del grado de conocimiento de los procesos ligados a las transferencias hídricas en la zona radicular del cultivo, el suelo y la atmósfera.

Efectos negativos del déficit de riego en los cultivos:

- Afecta negativamente al desarrollo y producción del cultivo.
- Disminuye el tamaño de los frutos.
- Reducción de la rentabilidad de los cultivos.

Efectos negativos por riego excesivo en los cultivos:

- Riesgo de asfixia radicular.
- Mayor incidencia de enfermedades y nemátodos.
- Disminuye la calidad de los productos (menor contenido en azúcar y proteínas de los frutos, mayor grosor de la corteza)
- Frutos más sensibles al estropeo y ataque de enfermedades (especialmente fungosas).

El manejo del riego deberá entenderse como la combinación óptima entre las necesidades hídricas del cultivo, las características del suelo, tanto como medio de transporte y almacenamiento de agua, y la aplicación del agua a la parcela, con sus condicionantes técnico-

económicos y sociales. Por eso, el conocimiento de lo que sucede al agua en el suelo es importante en la gestión del riego. La determinación del balance hídrico del suelo en la zona de enraizamiento, con la respectiva cuantificación de los términos que lo constituyen, y la caracterización de los modelos de los procesos de transferencia hídrica (modelos de extracción radicular y de escorrentía del agua en el suelo), es una necesidad determinante para la gestión del riego, para su mejora y optimización.

Cálculo de la unidad de riego

A partir de las necesidades netas de un cultivo, es posible determinar las necesidades brutas de riego, al considerar la eficiencia del sistema de riego ($NB = NN / \text{eficiencia de riego}$). Por ejemplo, considerando una necesidad neta de 4500 m³/ha (Tabla 4), en riego por surcos (eficiencia del 40%) se requerirán 11200 m³/ha de agua de riego.

Una tecnificación del riego más avanzada en riego superficial, es el reemplazo de acequias de cabecera por un sistema de mangas o tuberías a baja presión. A este sistema, puede acoplarse un sistema de control de pulsos de riego que podría permitir aumentar la eficiencia de riego hasta 65%. Para reducir el problema de agrietamiento del suelo (que puede propiciar el ataque de *Phytophthora*), se recomienda el riego frecuente en este tipo de suelos cada 4 a 5 días.

El suelo requiere riego en el cultivo de tomates, si su lectura está entre 15 y 20 cb en riego por goteo o cuando marca entre 25 y 30 cb en riego por surcos.

| Cultivo | Profundidad radicular máxima (m) ¹ | Fracción de agotamiento ² (para ET ≈ 5 mm día ⁻¹) UR |
|---|---|---|
| Hortalizas Pequeñas | | |
| Brócoli | 0.4-0.6 | 0.45 |
| Repollo, col | 0.5-0.8 | 0.45 |
| Zanahoria | 0.5-1.0 | 0.35 |
| Coliflor | 0.4-0.7 | 0.45 |
| Lechuga | 0.3-0.5 | 0.30 |
| Cebolla – seca | 0.3-0.6 | 0.30 |
| – de rama verde | 0.3-0.6 | 0.30 |
| Rábano | 0.3-0.5 | 0.30 |
| Hortalizas – Familia de la Solanáceas | | |
| Berenjena | 0.7-1.2 | 0.45 |
| Pimiento Dulce | 0.5-1.0 | 0.30 |
| Tomate | 0.7-1.5 | 0.40 |
| Hortalizas – Familia de las Cucurbitáceas | | |
| Melón | 0.9-1.5 | 0.45 |
| Pepino – cosechado fresco | 0.7-1.2 | 0.50 |
| Calabacín (zucchini) | 0.6-1.0 | 0.50 |
| Melón dulce | 0.8-1.5 | 0.40 |
| Sandia | 0.8-1.5 | 0.40 |
| Yuca o Mandioca – año 1 | 0.5-0.8 | 0.35 |
| – año 2 | 0.7-1.0 | 0.40 |
| Papa o patata | 0.4-0.6 | 0.35 - 0.40 |
| Leguminosas | | |
| Frejoles o judías verdes | 0.5-0.7 | 0.45 |
| Frejoles o judías grano seco | 0.6-0.9 | 0.45 |
| Frejol vainas largas, Verdura | 0.8-1.2 | 0.45 |
| Garbanzo (Chick pea) | 0.6-1.0 | 0.50 |
| Habas – Frescas | 0.5-0.7 | 0.45 |

| | | |
|------------------------------|---------|------|
| – Secas/Semilla | 0.5-0.7 | 0.45 |
| Maní o cacahuete | 0.5-1.0 | 0.50 |
| Lentejas | 0.6-0.8 | 0.50 |
| Guisantes o arveja – Frescos | 0.6-1.0 | 0.35 |
| – Secos/Semilla | 0.6-1.0 | 0.40 |
| Soya o soja | 0.6-1.3 | 0.50 |
| Cereales | | |
| Cebada | 1.0-1.5 | 0.55 |
| Trigo de Primavera | 1.0-1.5 | 0.55 |
| Trigo de Invierno | 1.5-1.8 | 0.55 |
| Maíz, (grano seco) | 1.0-1.7 | 0.55 |
| Maíz, (fresco) | 0.8-1.2 | 0.50 |
| Sorgo – grano seco | 1.0-2.0 | 0.55 |

Cuadro 10. Umbrales óptimos de riego Taylor, (1972)

Los valores de UR son válidos para $ET_c \approx 5 \text{ mm día}^{-1}$. El valor de UR puede ser ajustado para diferentes valores de ET_c de acuerdo a la siguiente expresión:

$$UR_{aj} = UR_{Cuadro} + 0.04 (5 - ET_c)$$

Fuente: Evapotranspiración de los cultivos. Manual FAO 56 (2000)

Programación del riego

Δ almacenamiento = Δ almacenamiento antecedente + Req de riego – Necesidad hídrica.

Jul decadal 1 = se aplicará 10 mm en el semillero.

Jul decadal 2 = se aplicará 6 mm en el semillero.

Jul decadal 3 = se aplicará 15 mm en el campo quedando un almacenamiento de 1.7 mm.

Ago decadal 4 = se aplicará 15 mm y quedará un remanente de 1.1 mm.

Programación del riego

| Mes | Década | Etapa | Kc | ETo | ETc | Req. Riego | Δ almac |
|-----|--------|---------|------|--------|--------|------------|---------|
| | | | coef | mm/dec | mm/dec | mm/dec | (mm) |
| | | | | | | | 10 mm |
| Jul | 1 | Inicial | 0.43 | 30 | 12.9 | 6 | 3.1 |
| Jul | 2 | Inicial | 0.43 | 30 | 12.9 | 10 | 0.2 |
| Jul | 3 | Desarr | 0.45 | 30 | 13.5 | 15 | 1.7 |
| Ago | 1 | Desarr | 0.52 | 30 | 15.6 | 15 | 1.1 |
| Ago | 2 | Desarr | 0.70 | 30 | 21 | 20 | 0.1 |
| Ago | 3 | Media | 0.90 | 30 | 27 | 30 | 3.1 |
| Sep | 1 | Media | 1.02 | 34 | 34.68 | 35 | 3.42 |
| Sep | 2 | Media | 1.00 | 34 | 34 | 35 | 4.42 |
| Sep | 3 | Media | 0.92 | 34 | 31.28 | 30 | 3.14 |
| Oct | 1 | Final | 0.83 | 31 | 25.73 | 25 | 2.41 |
| Oct | 2 | Final | 0.73 | 31 | 22.63 | 25 | 4.78 |
| Oct | 3 | Final | 0.43 | 31 | 13.33 | 5 | -3.55 |
| | | | | | | | |
| | | | | | 264.55 | 251.0 | |

Se observa que los meses con mayor consumo de agua son aquellos comprendidos en la fase intermedia cuyo valor máximo es de 34.68 mm (1er decenal del mes de septiembre), el caudal específico entregado por el sistema de riego debe ser suficiente para satisfacer este requerimiento hídrico del cultivo.

Durante la primera etapa del cultivo se tiene que considerar la lámina total máxima de agua que se puede evaporar, o agua fácilmente evaporable máxima (AFE máx, mm), puede estimarse en función

de la textura del suelo (Ritchie et al., 1989) citado por FAO (2000), ya que esta característica del suelo es determinante de la cantidad de agua que es retenida con menor potencial y que puede ser más fácilmente extraída por evaporación. AFE (REW) es mayor en suelos de textura media, con elevada capacidad retentiva de agua y moderada conductividad hidráulica, mientras que es menor en suelos de textura arenosa. Las expresiones de estimación son las siguientes:

$REW_{max} = 20 - 0,15 \text{ Arena}$, si la fracción de arena es $> 80\%$ (2.27a)

$REW_{max} = 11 - 0,06 \text{ Arcilla}$, si la fracción de arcilla es $> 50\%$ (2.27b)

$REW_{max} = 8 + 0,08 \text{ Arcilla}$, si la fracción de arena es $< 80\%$ y de arcilla $< \text{al } 50\%$ (2.27c)

Donde: tanto la arena como la arcilla de la capa superficial del suelo, de profundidad Z_e , se expresa en porcentaje.



INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

Capítulo 5

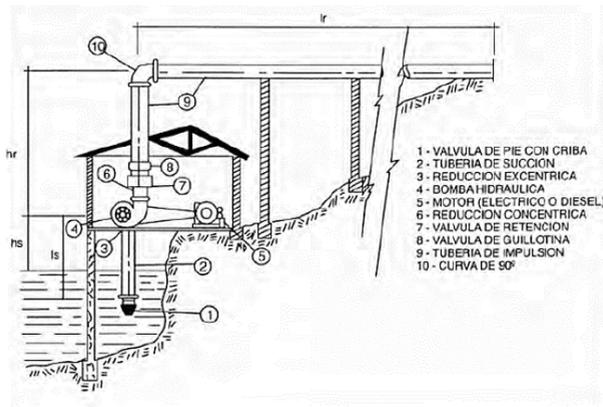
INSTALACIÓN DE LOS EQUIPOS DE BOMBEO

Las bombas hidráulicas utilizadas para riego son clasificadas como bombas hidrodinámicas (turbo-bombas o rotodinámicas), pudiendo ser de tipo centrífugas o radiales (lentas, normales o rápidas), mixtas o diagonales (ultrarrápidas o hélico-centrífugas y helicoidales) y axiales o impulsoras.

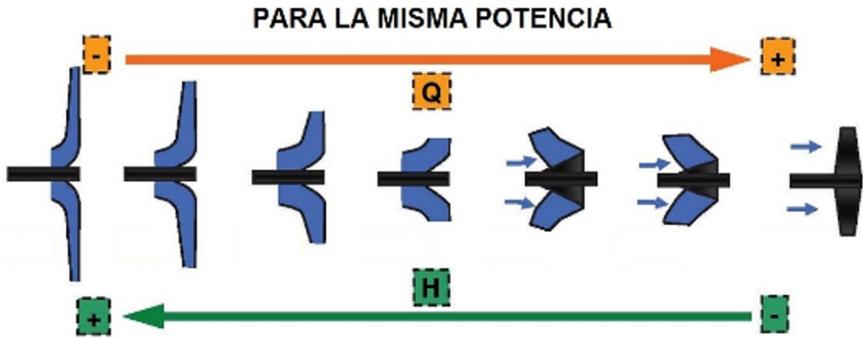
Pueden ser de caudales medios a altos, presión alta o baja, de eje horizontal o vertical, succión simple o doble, unietapas o multietapas, rotores cerrados, semi-cerrados o abiertos, no son autocebantes y son de superficie o sumergidas.

Selección de bombas

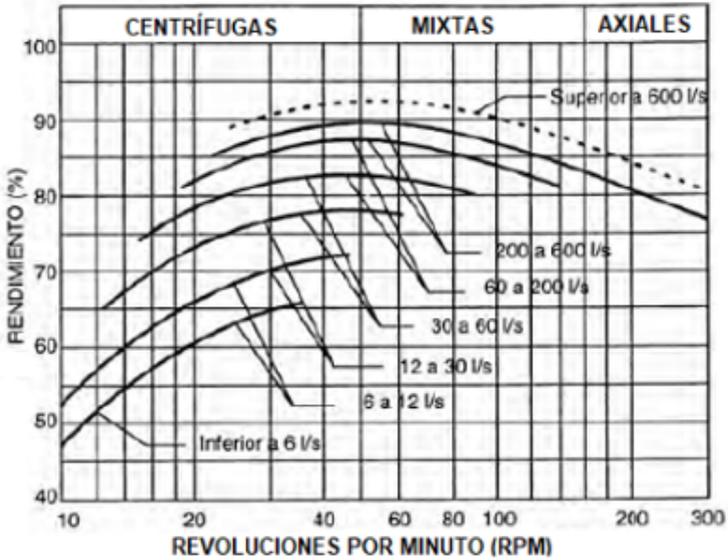
El proceso de selección de bombas, desde el punto de vista hidráulico, sigue las siguientes etapas: determinación de los parámetros de instalación y de la bomba, determinación del tipo de bomba, preselección, verificación del funcionamiento sin cavitación, selección y especificación del modelo seleccionado.



Esquema de una caseta de estación de bombeo (García, C. Días, A. y Calgario, M. 2003)



Selección del tipo de bombas en función del caudal y presión o carga requerida



NPSH (Net Positive Suction Head)

El NPSH (Net Positive Suction Head, o altura neta positiva en la aspiración) es la presión mínima que debe haber en la entrada de la bomba para evitar fenómenos de cavitación.

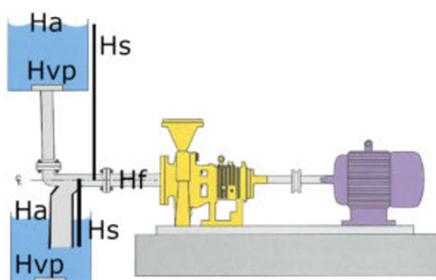
Esta variable de las bombas es la que determina su adecuado funcionamiento y representa a la presión mínima requerida a la entrada de la bomba para evitar el fenómeno de cavitación

NPSH disponible

El NPSHa “disponible” se calcula como la presión justo en la entrada de la bomba, se puede medir con un manómetro colocado en la aspiración o con sistemas de telemedida como Regometer. Depende de distintos factores como:

- Altura de la lámina de agua. medida desde el aljibe hasta el eje central de la entrada de la bomba. H_s
- La presión en la superficie del agua, generalmente en la presión atmosférica, pero si se presuriza el aljibe puede aumentarse, aunque esa tarea tendría un coste energético inasumible. H_a
- La presión de vapor del agua, este factor depende de la temperatura, y para bajarlo es necesario refrigerar el fluido por lo que en riego es inviable. H_{vp}
- Pérdidas de carga entre la toma del aljibe y la entrada de la bomba. H_f

$$NPSH_a = H_s + H_a - H_{vp} - H_f$$



Cavitación

La condición de no cavitación sería la siguiente:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5 \text{ m}$$

El $NPSH_{disp}$ se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$NPSH_{disp} = 10^5 \times \frac{p^l - p^v}{\gamma} \pm H_a - h_a$$

p^l es la presión sobre el líquido en el depósito de aspiración. Si el agua que se bombea se almacena al aire libre, p^l será la presión atmosférica. Este valor depende de la altura como se verá más adelante.

p^v es la presión de vapor del líquido. La tensión de vapor o presión de vapor a una temperatura determinada equivale a la presión bajo la cual el agua comienza a desprender burbujas. En la tabla siguiente se dan los valores.

Tabla 18: “Valores de la tensión de vapor y de la densidad del agua según la temperatura”

| | | | | | | |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Temperatura °C | 0 | 4 | 10 | 20 | 30 | 40 |
| Tensión de vapor (mca) | 0,06 | 0,08 | 0,12 | 0,24 | 0,43 | 0,75 |

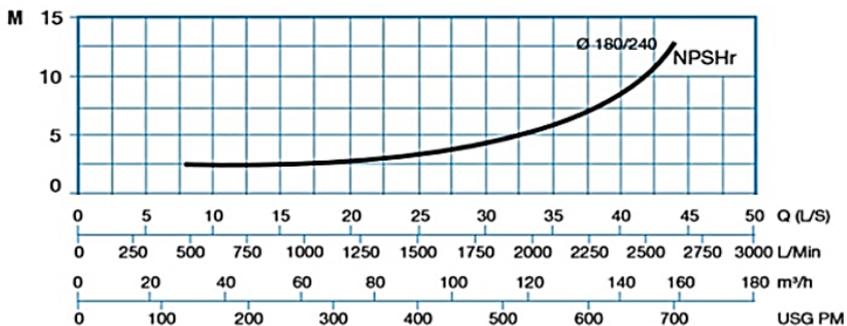
Tomado de iaga.es (Monge, M. 2017)

γ = Peso específico del agua = 9810 N/m³ (Valor aceptado)

1 bar = 10 mca.

H_a o altura de aspiración en metros (Positivo si es en carga, o negativo si es en succión caso más común).

h_a es la pérdida de carga que se produce en el tramo de la aspiración.



Curva de NPSHreq. El valor del NPSH requerido se mide en metros (escala de la izquierda) y depende del caudal bombeado (catálogo bombas IDEAL).

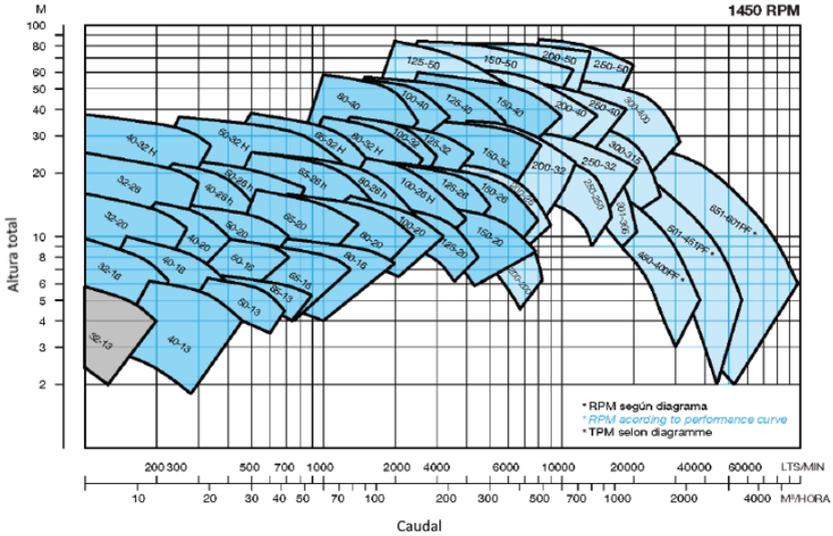
Bombas e instalaciones del equipo

La instalación de las bombas de riego es un procedimiento que debe realizarse con cuidado y precisión. La operación y mantenimiento inadecuados de los sistemas de bombeo pueden representar riesgos graves, incluida la pérdida completa del suministro de agua.

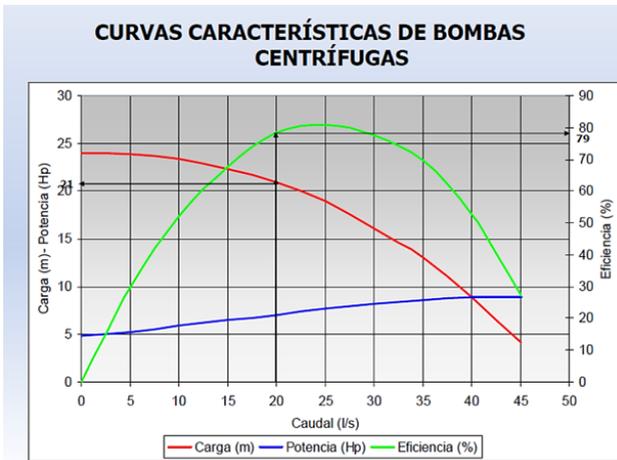
El montaje y desmontaje de las bombas se realizará mediante el izado de las mismas a través de los tubos guía, un sistema con aparejo de izaje operado por motor eléctrico y su respectiva estructura de apoyo se incluyen en el suministro de equipos de la estación.

La bomba y el motor eléctrico deben ser diseñados y ensamblados por el mismo fabricante, las condiciones de operación específicas de cada estación se indican en la tabla adjunta, se debe cumplir con las especificaciones de caudal y Altura Dinámica total con un rango

de variación de +/- 5%. Este requisito no exonera al contratista de suministrar equipos con condiciones de operación lo más cercana posible a las indicadas. (Contrataciones públicas 2014)



Diagramas de características o de abanico para una serie de bombas centrífugas (Bombas Ideal). Tomado de (Heras, Salvador 2011)



Partes constitutivas de la Bomba sumergible

Parte Hidráulica: La parte hidráulica de la bomba compuesta por la voluta y el impulsor. La voluta sería de diseño no concéntrico con ranura de desahogo en donde actúan los álabes del impulsor tipo semi abierto que empuja en la parte externa de los alabes. Los filos de los álabes del impulsor deben tener una dureza de al menos 45 RCA a una profundidad de 4-5 mm para evitar desgaste prematuro por abrasión o corrosión. El impulsor es fijado al eje mediante un tornillo que facilita el montaje y desmontaje del mismo.

De ser necesario se instalarán anillos de desgaste entre la voluta y el cuello de aspiración del impulsor para mantener la eficiencia hidráulica del impulsor.

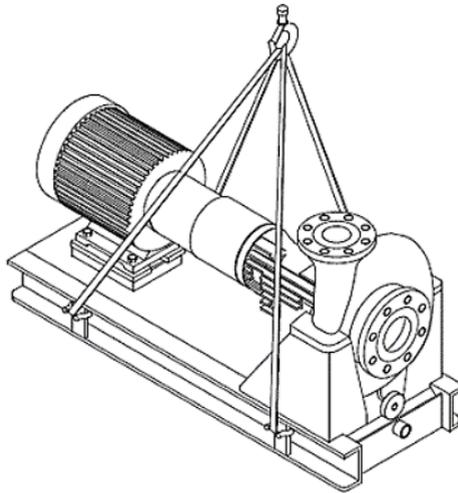
Motor Eléctrico.- Del tipo jaula de ardilla acoplado directamente a la parte hidráulica formando un solo conjunto, con factor de servicio mínimo de 1.15, para soportar variaciones de Voltaje en un rango de más o menos 10%. El motor y el cable deben tener una protección a prueba de humedad IEC Clase IP68 (20m), es decir, deben ser capaces de trabajar sumergidos continuamente sin perder su integridad. La Potencia del motor debe ser capaz de cubrir sin sobrecargarse todo el rango de la curva de operación de la bomba. Se debe adjuntar las curvas de rendimiento del motor, tales como Torque, Corriente, Factor de Potencia, Potencia de entrada/salida, eficiencia. Las bobinas del estator deben tener aislamiento resistente a la humedad que sea capaz de soportar una temperatura de 180 °C.

Tablero de control

El tablero de control de cada estación de bombeo debe estar equipado para arranque, control y alternación de las bombas electro sumergibles para las estaciones elevadoras, cada una a un voltaje de operación entre 440-460V y con la potencia de motor especificada.

Izado del equipo

El izado del equipo debe realizar con un trípode con polipasto (Tecele) eléctrico o manual con capacidad de levantar 2,5 Ton.



Forma correcta de fijación para el izado.

Elementos constitutivos de las bombas centrífugas

Una bomba centrífuga se compone de dos elementos principales:

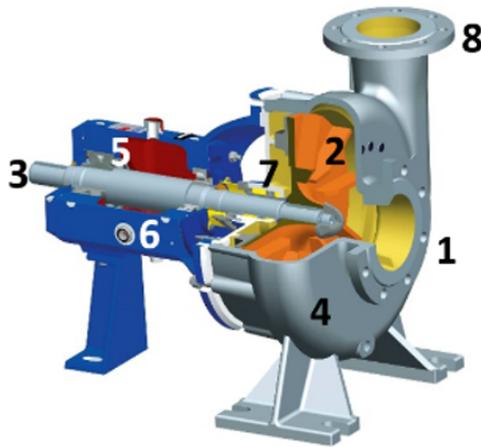
1. Brida de succión
2. Impulsor o rodete
3. Eje o Rotor

4. Voluta
5. Rodamientos o cojinetes
6. Cajera de rodamientos
7. Sellos mecánicos
8. Brida de descarga

Un rodete o impulsor, constituido por álabes que producen un cambio en el momento cinético del fluido, de modo que su velocidad y presión a la salida son superiores a las de la entrada.

Voluta, encargada de conducir al fluido desde la salida del rodete hasta la brida de descarga. Está formada por un conducto cuya sección aumenta gradualmente hasta alcanzar la salida de la bomba. En ella, parte de la energía de velocidad se transforma en energía de presión, reduciéndose las pérdidas por fricción. Es frecuente la existencia a la salida del rodete, de un difusor constituido por álabes fijos y cuya misión es la de contribuir a esta transformación de energía cinética en energía de presión.

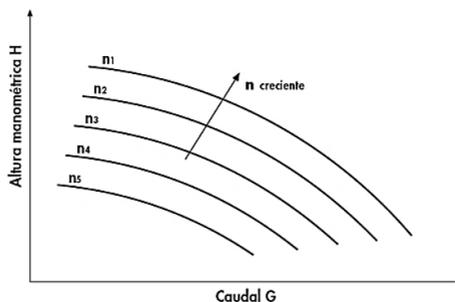
Las bombas centrifugas tienen un impulsor giratorio montado en un eje conectado a un motor. El impulsor aumenta la velocidad del agua y la descarga a una cavidad diseñada para convertir la velocidad del flujo en presión. Las bombas centrifugas equipadas con un sólo impulsor se denominan bombas de una sola etapa, mientras que las que tienen dos o más impulsores se llaman bombas de multietapas. Estas últimas pueden bombear a mayores alturas de descarga, pero con el mismo caudal.



Tomada de Power Mi blog (Trocel, D. 2019)

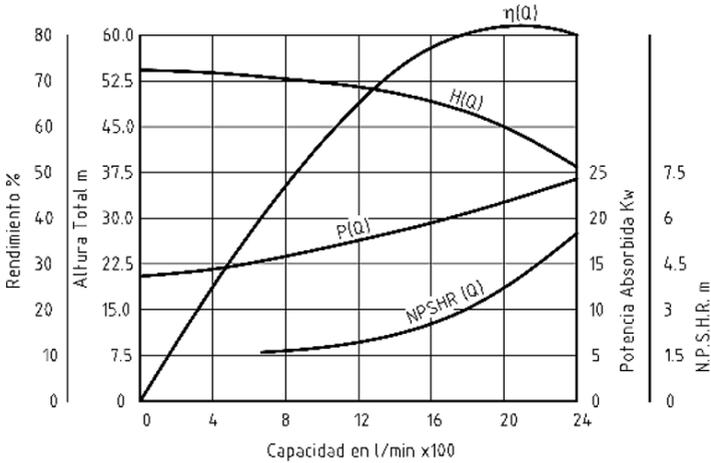
Curva característica de una bomba

La curva característica de una bomba describe la relación entre la altura manométrica (caída de presión) y el caudal, datos que permiten escoger la bomba más adecuada para cada instalación. La altura manométrica de una bomba es una magnitud, expresable también como presión, que permite valorar la energía suministrada al fluido, es decir, se trata de la caída de presión que debe de vencer la bomba para que el fluido circule según condiciones de diseño.



Como puede observarse en la figura anterior, para cada velocidad de rotación n , hay una curva característica. Nótese también que, si la velocidad se reduce, también disminuye la altura manométrica máxima y el caudal máximo.

Curva NPSH - Caudal



Si la velocidad de rotación n se mantiene constante, la curva de potencia absorbida P aumenta con el caudal Q . El rendimiento η , en cambio, tiene un máximo en presencia de un determinado caudal Q y disminuye cuando el caudal Q se hace superior o inferior a dicho valor.

Generar la curva característica

Algunas veces ocurre que ya no existe la hoja de la curva, o bien el vendedor no la proporcionó, entonces se debe crear una curva para hacer funcionar el equipo en condiciones óptimas que aseguren su máximo rendimiento con máxima eficiencia.

Procedimiento:

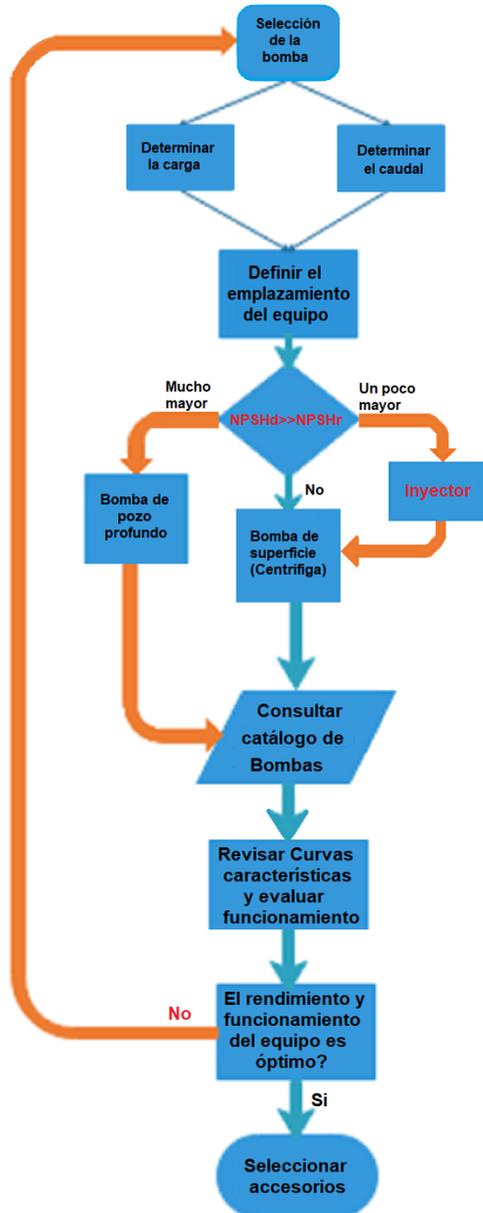
1. En la descarga de la bomba colocar una válvula (de bronce) y un manómetro en aceite.
2. Realizar pruebas de bombeo en por lo menos 4 medidas de caudal en las siguientes condiciones: caudal a 1 mca u 8 PSI, caudal a la mitad de la carga de presión requerida, caudal a 1,1 veces la carga requerida y caudal con la válvula casi cerrada).
3. Registrar las lecturas: para cada caudal anotar la presión alcanzada.
4. En Excel en una columna colocar los caudales y en la columna adyacente colocar las cargas en mca o en PSI.
5. Insertar un gráfico de regresión polinomial 2, si desea puede incluir la ecuación de la tendencia cuadrática (ecuación de la curva característica).

Selección de una bomba

Para seleccionar una bomba debemos conocer los siguientes datos:

1. Caudal
2. Altura manométrica a vencer por la bomba o pérdida de presión del circuito
3. Valor de NPSHd

A continuación, mostramos un diagrama de flujo para la selección de una bomba:



Algoritmo para seleccionar bombas. Adaptado de (Martín, G. 2012)

Instrucciones de alineación bomba-unidad motriz

Realice la alineación angular para una corrección vertical

1. Coloque el indicador de alineación angular a cero en la posición central superior (posición de las 12 en punto) de la mitad del acoplamiento del motor (Y).
2. Gire el indicador a la posición central inferior (posición de las 6 en punto).
3. Registre la lectura del indicador.

| Cuando el valor de lectura es... | Entonces |
|----------------------------------|---|
| Negativa | Las mitades del acoplamiento están más separadas en la parte inferior que en la superior. Realice uno de los siguientes pasos: Agregue separadores para levantar el pie del motor en el extremo del eje. Extraiga separadores para bajar el pie del motor en el otro extremo. |
| Positiva | Las mitades del acoplamiento están más juntas en la parte inferior que en la superior. Realice uno de los siguientes pasos: Extraiga separadores para bajar el pie del motor en el extremo del eje. Agregue separadores para levantar el pie del motor en el otro extremo. |

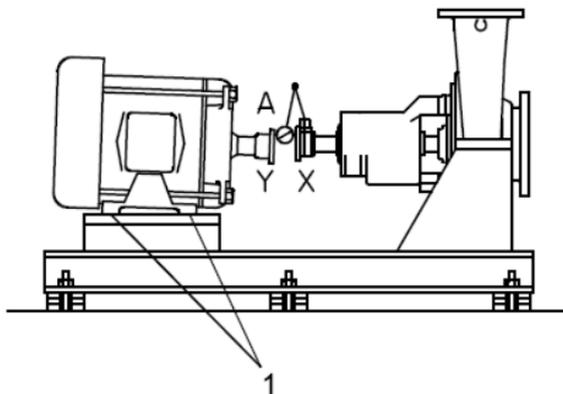


Figura 17. Ejemplo de alineación vertical incorrecta (vista lateral)

4. Separadores
5. Repita los pasos anteriores hasta lograr el valor de lectura permitido.

Realice la alineación angular para una corrección horizontal

1. Coloque el indicador de alineación angular (A) en cero en el lado izquierdo de la mitad del acoplamiento del motor (Y), 90° desde la posición central superior (en la posición de las 9 en punto).
2. Gire el indicador pasando por la posición central superior hasta el lado derecho, y colóquelo a 180° con respecto a la posición inicial (en la posición de las 3 en punto).
3. Registre la lectura del indicador.

| | |
|----------------------------------|---|
| Cuando el valor de lectura es... | Entonces |
| Negativo | <p>Las mitades del acoplamiento están más separadas en el lado derecho que en el izquierdo.</p> <p>Realice uno de los siguientes pasos:</p> <p>Deslice el extremo del eje del motor hacia la izquierda.</p> <p>Deslice el extremo opuesto hacia la derecha.</p> |
| Positivo | <p>Las mitades del acoplamiento están más juntas en el lado derecho que en el izquierdo.</p> <p>Realice uno de los siguientes pasos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deslice el extremo del eje del motor hacia la derecha. • Deslice el extremo opuesto hacia la izquierda. |

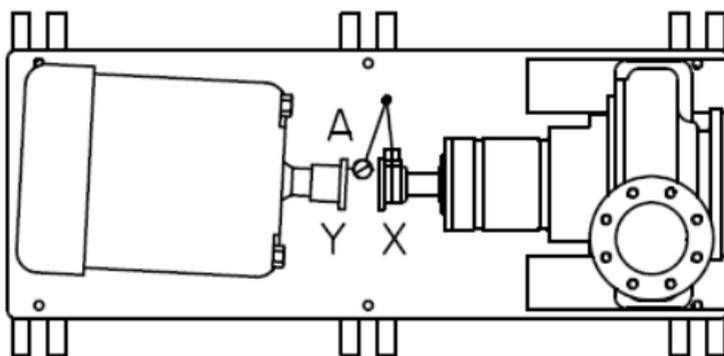


Figura 18. Ejemplo incorrecto de alineación horizontal (vista superior)

4. Repita los pasos anteriores hasta lograr el valor de lectura permitido.

Realice la alineación en paralelo para la corrección vertical

Consulte la tabla de alineación en “Valores permitidos del indicador para los controles de alineación” (consulte el manual de instalación) para ver el valor de alineación en frío adecuado en función de la elevación de la temperatura y la temperatura de funcionamiento de la bomba.

Antes de iniciar este procedimiento, asegúrese de que los indicadores de cuadrante estén acoplados de manera adecuada.

Una unidad se encuentra en alineación paralela cuando el indicador de paralelo (P) no varía más de 0,05 mm (0,002 pulg.) al medirlo en cuatro puntos separados a 90°, a la temperatura de funcionamiento.

1. Coloque el indicador de alineación en paralelo (P) a cero en la posición central superior (posición de las 12 en punto) de la mitad del acoplamiento del motor (Y).
2. Gire el indicador a la posición central inferior (posición de las 6 en punto).
3. Registre la lectura del indicador.

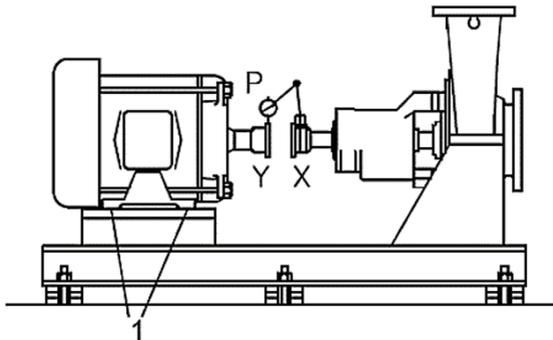


Figura 18. Ejemplo de alineación vertical incorrecta (vista lateral)

4. Separadores
5. Repita los pasos anteriores hasta lograr el valor de lectura permitido.
6. Ubique el calibrador a 90° (posición de 3 y 9) para comprobar alineación horizontal

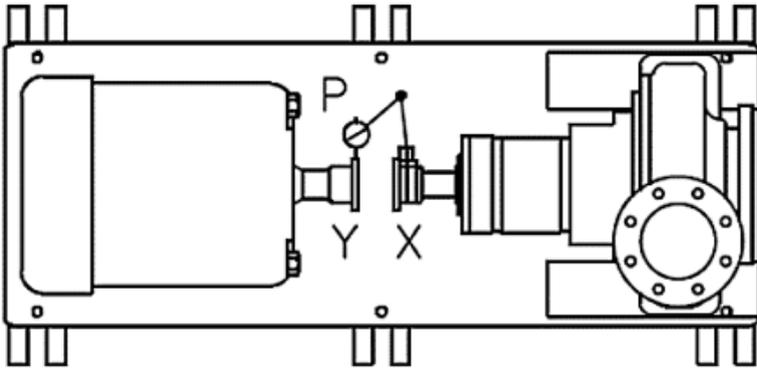


Figura 19. Ejemplo de alineación horizontal incorrecto (vista superior)
(ITT Goulds Pumps 2018)

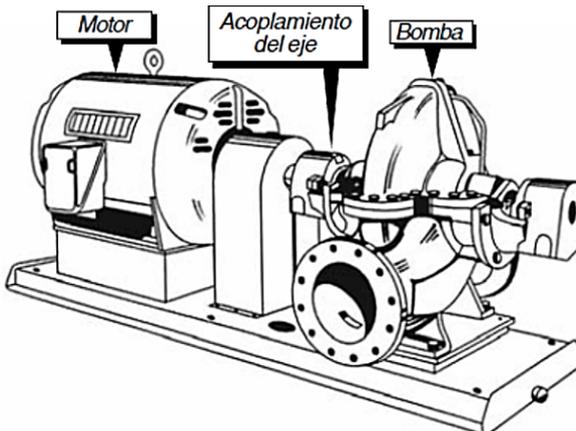
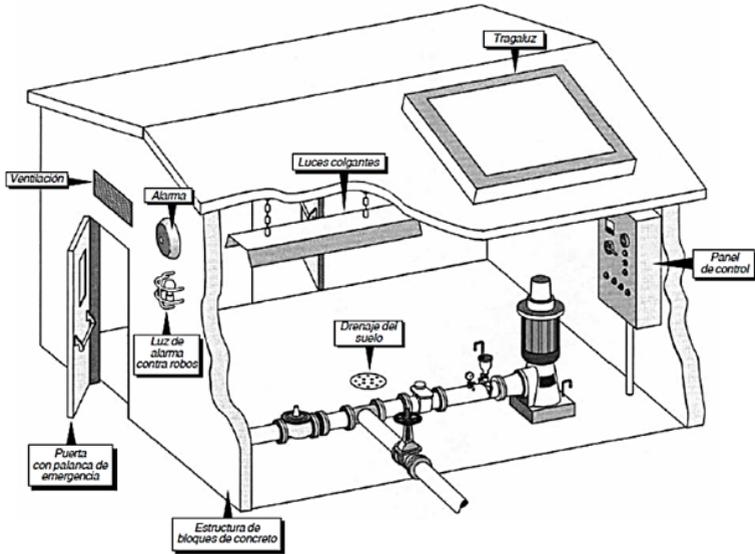


Figura 20. Parte del equipo motobomba

Modelo de caseta de la estación de bombeo

La caseta debe tener suficiente iluminación y aireación, junto con seguridad para los equipos e instrumentos de control.



Tomado de: Bombas e instalaciones de bombeo. (Zendejas, A. y Serrano, M. 2005)

El operador de la estación debe de tener el manual de operación, y el programa de revisión y mantenimiento del equipo de riego.

Solución a posibles problemas

| Diagnóstico de Falla Posibles | Causas | Medidas Correctivas |
|--|---|---|
| Flujo menor de lo establecido | Bomba operando con presión elevada. | Verifique si el punto de operación e impulsor de la bomba están bien. Asegúrese que la instalación hidráulica no esté atascada. |
| | Presencia de aire en la instalación hidráulica y/o en la bomba. Cebado inadecuado. | Verifique la formación de burbujas de aire en la succión y efectúe el cebado adecuadamente retirando toda la presencia de aire en la tubería. |
| | Acumulación de aire formando bolsas en la tubería de succión. | Corregir la instalación hidráulica en la succión. |
| | Instalación hidráulica (tubería de succión y descarga) y/o bomba atascada. | Inspeccione la bomba y la tubería retirando toda impureza. |
| | Altura de succión y/o pérdida de carga excesiva en la succión (tubería mal dimensionada). NPSH disponible inadecuada. | Disminuya la altura de succión, instale la bomba más cerca del nivel del agua. Corrija el nivel del depósito del líquido. Cambie la tubería de succión para disminuir la pérdida de carga. Verifique la presencia de cuerpos atascados en la tubería y filtros en la succión de la bomba. Verifique todos los sellos de la bomba e instalación hidráulica en la succión asegurándose de que no existe succión de aire. |
| | Sellado del eje con defecto permitiendo la succión de aire. | Sustituya el sello del eje. |
| | Sentido de rotación invertido | Verifique el sentido de rotación según la placa de orientación fijada en la bomba, si es necesario corrija la conexión entre los cierres de las terminales del motor eléctrico con la red de alimentación. |
| | Baja rotación; velocidad del motor eléctrico, frecuencia y tensión de alimentación. Error de parámetros en el Inversor de frecuencia. | Verifique la velocidad del motor eléctrico, corríjala, si es necesario. Verifique la tensión y frecuencia de alimentación, corríjala, si es necesario. Corrija los parámetros de tensión y frecuencia respetando las especificaciones del inversor y motor eléctrico. |
| | Impulsor dañado o desbalanceado. | Verifique y sustituya las piezas dañadas. |
| | Formación de estrías o rugosidad en el casquillo protector del eje. | Sustituya el casquillo protector del eje. Cambie el sello del eje |
| Falla en la alimentación eléctrica. | Verifique las protecciones y alimentación eléctrica evitando la falta de fase. | |
| Funcionamiento inestable, vibración excesiva y/o alto ruido. | Presencia de aire en la instalación hidráulica y/o en la bomba. Cebado inadecuado | Verifique la formación de burbujas de aire en la succión y efectúe el cebado adecuadamente retirando toda la presencia de aire en la tubería. |
| | Altura de succión y/o pérdida de carga excesiva en la succión (tubería mal proyectada). NPSH disponible inadecuada. | Disminuya la altura de succión, instale la bomba más cerca del nivel del depósito. Corrija el nivel del depósito del líquido. Cambie la tubería de succión para disminuir la pérdida de carga. Verifique la presencia de cuerpos atascados en la tubería y filtros en la succión de la bomba. Verifique todos los sellados de la bomba e instalación hidráulica en la succión asegurándose de que no existe succión de aire. |
| | Impulsor dañado o desbalanceado. | Sustituya la pieza dañada. Verifique la presencia de material atascando el impulsor, haciendo la limpieza. Haga el balanceo del impulsor. |
| | Baja presión o menor a la prevista durante el dimensionamiento de la bomba | Regule el punto de trabajo. Si la sobrecarga del motor eléctrico es permanente, consulte al Soporte técnico de la fábrica. |
| | Desalineación en el acoplamiento entre la bomba y el motor. | Corrija la alineación. |
| | Bomba bajo tensión o vibraciones de resonancia en la tubería. | Verifique las conexiones de la tubería y fijación de la bomba; si es necesario acorte las distancias de las fijaciones de las tuberías. Use junta de expansión reduciendo las vibraciones. |
| | Lubricante inadecuado, excesivo o insuficiente. | Cambie el lubricante conforme es indicado en el manual. Corrija el nivel del aceite. |

| | | |
|---|--|---|
| | Balero dañado. | Haga el mantenimiento correctivo. Sustituya el balero. |
| | Flujo insuficiente. | Asegure las condiciones mínimas de funcionamiento, mejorando la alimentación de la bomba. |
| Elevación de la temperatura en los cojinetes | Desalineación en el acoplamiento entre la bomba y motor. | Corrija la alineación. |
| | Bomba bajo tensión o vibraciones de resonancia en la tubería. | Verifique las conexiones de la tubería y fijación de la bomba; si es necesario acorte las distancias de las fijaciones de las tuberías. Use junta de expansión reduciendo las vibraciones. |
| | Lubricante inadecuado, excesivo o insuficiente. | Cambie el lubricante conforme es indicado en el manual. Corrija el nivel del aceite. |
| Temperatura excesiva en el interior de la bomba | Presencia de aire en la instalación hidráulica y/o en la bomba. Cebado inadecuado. | Verifique la formación de burbujas de aire en la succión y efectúe el cebado adecuadamente retirando toda la presencia de aire en la tubería. |
| | Altura de succión y/o pérdida de carga excesiva en la succión (tubería mal proyectada). NPSH disponible inadecuada. | Disminuya la altura de succión, instale la bomba más cerca del nivel del depósito. Corrija el nivel del depósito del líquido. Cambie la tubería de succión para disminuir la pérdida de carga. Verifique la presencia de cuerpos atascados en la tubería y filtros en la succión de la bomba. Verifique todos los sellados de la bomba e instalación hidráulica en la succión asegurándose de que no existe succión de aire. |
| | Flujo insuficiente. | Asegure las condiciones mínimas de funcionamiento, mejorando la alimentación de la bomba. |
| Sobrecarga del motor | Baja presión o menor a la prevista durante el dimensionamiento de la bomba | Regule el punto de trabajo. Si la sobrecarga del motor eléctrico es permanente, consulte al Soporte técnico de la fábrica. |
| | Densidad o viscosidad del fluido bombeado más de lo indicado en la dimensión del punto de trabajo de la bomba. | Consulte el Soporte técnico de la Fábrica. |
| | Alta velocidad. | Corrija la rotación dentro de las especificaciones del punto de operación. |
| | Falla en la alimentación eléctrica. | Verifique las protecciones y alimentación eléctrica evitando falta de fase. |
| Presión final de la bomba excesiva | Alta velocidad | Corrija la aceleración (velocidad RPM) dentro de las especificaciones del punto de operación del motor. |

Fuente: (Franklin Electric 2017)

ANEXOS

| Textura del suelo | CC % | PM % | Densidad (g/cm ³) | Veloc Infiltr (mm/h) | Cond Hidr Ks (mm/h) | Inf Bás lb (mm/h) |
|-----------------------------------|------|------|-------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| Arcilloso | 42 | 30 | 1,40 | 0,8 a 3,0 | 0,3 – 0,6 | 1 – 74 |
| Arcillo limoso | 41,6 | 27,8 | 1,24 | 1 a 4,0 | 0,5 – 1,2 | 2,3 |
| Arcilla arenosa | 37,1 | 26,0 | 1,48 | 2 a 6 | 0,6 – 1,2 | 2,6 |
| Franco arcilloso | 35 | 21,3 | 1,40 | 5 a 7,5 | 1 – 17 | 4 |
| Franco arcillo limoso | 37,9 | 21,0 | 1,30 | 5 a 6,5 | 1 – 15 | 2 |
| Franco limoso | 32 | 13,6 | 1,37 | 8,5 a 12,2 | 6 – 30 | 10 |
| Limoso | 31,6 | 10 | 1,37 | 9 a 15 | 2,5 | 8 |
| Franco | 29 | 13 | 1,44 | 13 a 18 | 13 – 3,4 | 5 – 10 |
| Franco arcillo arenoso | 28,3 | 18,3 | 1,51 | 6 a 8 | 1,5 – 19 | 2,1 |
| Franco limo arcilloso | 35,7 | 15,3 | 1,42 | 6.5 a 8.6 | | |
| Franco Limo arenoso | 25 | 10 | 1,46 | 12 | | |
| Franco Areno limoso | 18 | 8 | 1,43 | 15 | | 4 |
| Franco arenoso | 16 | 7 | 1,44 | 16 a 25 | 10,9 – 19 | 12 |
| Franco arenoso + materia orgánica | 29 | 10 | 1,43 | 30 a 50 | 50 – 120 | |
| Arena franca | 13 | 6 | 1,44 | 30 a 50 | 50 – 160 | 15 – 25 |
| Arenoso | 10 | 5 | 1,42 | 90 | > 250 | 36 |

Anexo 1. Parámetros hídricos de los suelos
Adaptado de Riego por gravedad (SAGARPA 2010)

| n | $l_0 = 1$ | | | | | n | $l_0 = 1/2$ | | | | |
|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | $\beta=1,75$ | $\beta=1,80$ | $\beta=1,85$ | $\beta=1,90$ | $\beta=2,00$ | | $\beta=1,75$ | $\beta=1,80$ | $\beta=1,85$ | $\beta=1,90$ | $\beta=2,00$ |
| 1 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 2 | 0,650 | 0,644 | 0,639 | 0,634 | 0,625 | 2 | 0,532 | 0,525 | 0,518 | 0,512 | 0,500 |
| 3 | 0,546 | 0,540 | 0,535 | 0,528 | 0,518 | 3 | 0,455 | 0,448 | 0,441 | 0,434 | 0,422 |
| 4 | 0,497 | 0,491 | 0,486 | 0,480 | 0,469 | 4 | 0,426 | 0,419 | 0,412 | 0,405 | 0,393 |
| 5 | 0,469 | 0,463 | 0,457 | 0,451 | 0,440 | 5 | 0,410 | 0,403 | 0,397 | 0,390 | 0,378 |
| 6 | 0,451 | 0,445 | 0,435 | 0,433 | 0,421 | 6 | 0,401 | 0,394 | 0,387 | 0,381 | 0,369 |
| 7 | 0,438 | 0,432 | 0,425 | 0,419 | 0,408 | 7 | 0,395 | 0,388 | 0,381 | 0,375 | 0,363 |
| 8 | 0,428 | 0,422 | 0,415 | 0,410 | 0,398 | 8 | 0,390 | 0,383 | 0,377 | 0,370 | 0,358 |
| 9 | 0,421 | 0,414 | 0,409 | 0,402 | 0,391 | 9 | 0,387 | 0,380 | 0,374 | 0,367 | 0,355 |
| 10 | 0,415 | 0,409 | 0,402 | 0,396 | 0,385 | 10 | 0,384 | 0,378 | 0,371 | 0,365 | 0,353 |
| 11 | 0,410 | 0,404 | 0,397 | 0,392 | 0,380 | 11 | 0,382 | 0,375 | 0,369 | 0,363 | 0,351 |
| 12 | 0,406 | 0,400 | 0,394 | 0,388 | 0,376 | 12 | 0,380 | 0,374 | 0,367 | 0,361 | 0,349 |
| 13 | 0,403 | 0,396 | 0,391 | 0,384 | 0,373 | 13 | 0,379 | 0,372 | 0,366 | 0,360 | 0,348 |
| 14 | 0,400 | 0,394 | 0,387 | 0,381 | 0,370 | 14 | 0,378 | 0,371 | 0,365 | 0,358 | 0,347 |
| 15 | 0,397 | 0,391 | 0,384 | 0,379 | 0,367 | 15 | 0,377 | 0,370 | 0,364 | 0,357 | 0,346 |
| 16 | 0,395 | 0,389 | 0,382 | 0,377 | 0,365 | 16 | 0,376 | 0,369 | 0,363 | 0,357 | 0,345 |
| 17 | 0,393 | 0,387 | 0,380 | 0,375 | 0,363 | 17 | 0,375 | 0,368 | 0,362 | 0,356 | 0,344 |
| 18 | 0,392 | 0,385 | 0,379 | 0,373 | 0,361 | 18 | 0,374 | 0,368 | 0,361 | 0,355 | 0,343 |
| 19 | 0,390 | 0,384 | 0,377 | 0,372 | 0,360 | 19 | 0,374 | 0,367 | 0,361 | 0,355 | 0,343 |
| 20 | 0,389 | 0,382 | 0,376 | 0,370 | 0,359 | 20 | 0,373 | 0,367 | 0,360 | 0,354 | 0,342 |
| 22 | 0,387 | 0,380 | 0,374 | 0,368 | 0,357 | 22 | 0,372 | 0,366 | 0,359 | 0,353 | 0,341 |
| 24 | 0,385 | 0,378 | 0,372 | 0,365 | 0,355 | 24 | 0,372 | 0,365 | 0,359 | 0,352 | 0,341 |
| 26 | 0,383 | 0,376 | 0,370 | 0,364 | 0,353 | 26 | 0,371 | 0,364 | 0,358 | 0,351 | 0,340 |
| 28 | 0,382 | 0,375 | 0,369 | 0,363 | 0,351 | 28 | 0,370 | 0,364 | 0,357 | 0,351 | 0,340 |
| 30 | 0,380 | 0,374 | 0,368 | 0,362 | 0,350 | 30 | 0,370 | 0,363 | 0,357 | 0,350 | 0,339 |
| 35 | 0,378 | 0,371 | 0,366 | 0,359 | 0,347 | 35 | 0,369 | 0,362 | 0,356 | 0,350 | 0,338 |
| 40 | 0,376 | 0,370 | 0,364 | 0,357 | 0,345 | 40 | 0,368 | 0,362 | 0,355 | 0,349 | 0,349 |
| 50 | 0,374 | 0,367 | 0,361 | 0,355 | 0,343 | 50 | 0,367 | 0,361 | 0,354 | 0,348 | 0,337 |
| 60 | 0,372 | 0,366 | 0,359 | 0,353 | 0,342 | 100 | 0,365 | 0,359 | 0,353 | 0,347 | 0,335 |
| 80 | 0,370 | 0,363 | 0,357 | 0,351 | 0,340 | 200 | 0,365 | 0,358 | 0,352 | 0,346 | 0,334 |
| 100 | 0,369 | 0,362 | 0,356 | 0,350 | 0,338 | - | - | - | - | - | - |
| 150 | 0,367 | 0,360 | 0,354 | 0,348 | 0,337 | - | - | - | - | - | - |
| 300 | 0,365 | 0,359 | 0,353 | 0,346 | 0,335 | - | - | - | - | - | - |
| >300 | 0,364 | 0,357 | 0,351 | 0,345 | 0,333 | - | - | - | - | - | - |

n = Número de salidas
 $\beta=1,75$ Blasius, Cruciani-Margaritora
 $\beta=1,786$ Scimemi
 $\beta=1,80$ Iso, Veronese-Daite
 $\beta=1,85$ Hazen-Williams
 $\beta=1,90$ Scobey
 $\beta=2,00$ Manning, Darcy-Weisbach

En la práctica se toma los siguientes valores de β :
 $\beta=1,75$ para tuberías de PE
 $\beta=1,80$ para tubería de PVC
 $\beta=1,85-1,90$ para tubería de aluminio

Anexo 2. Factor de salidas múltiples de Christiansen
Tomado de: Manual Aqua. (Veintimilla, M. 2013)

ACERCA DE LOS AUTORES

MARLON VÍCTOR PAZOS ROLDÁN



Máster en riego y drenaje. Ex Docente de la Universidad Agraria del Ecuador. Docente de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Babahoyo, desde 2016 hasta la actualidad. Ha realizado algunos proyectos de riego por aspersión en Ventanas y Vinces.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acuña, C. Diseño de un sistema integrado de riego superficial (surcos, melgas y cuadros) en el terreno designado como área experimental de la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. Cartago: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2014.
- Antúnez, M. «Riego por pulsos en maíz regando por surcos.» Tierra adentro, 2011a: 25 - 30.
- Arviza, J. y Palau, V. Determinación del punto de alimentación de una subunidad de riego con desnivel. Valencia: Universitat Politècnica de València, 2016.
- Cano, Karen. Murillo, L. Zambrano, E. y Bonfiglioli, M. «Sistema de Riego por melgas.» 3 de 10 de 2013. https://www.academia.edu/15454873/SISTEMA_DE_RIEGO_POR_MELGAS_PONENCIA-riegos (último acceso: julio de 2019).
- Cenicaña. Riego por surcos. 6 de abril de 2015. <https://www.cenicana.org/riego-por-surcos/> (último acceso: 12 de Diciembre de 2019).
- Cisneros, R. Apuntes de la materia de Riego y Drenaje. San Luís Potosí: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE SAN LUIS POTOSI, 2013.
- Comisión Nacional de Riego. Riego por Surco. Santiago de Chile: Gobierno de Chile, 2010.
- Conadi. Como determinar; cuanto y cuando regar. Santiago de Chile: Ministerio de Desarrollo Social, 2017.
- ConGope. Hablemos de Riego. Quito: El Telégrafo, 2017.

- Contrataciones públicas. «ESPECIFICACIONES TECNICAS ESTACIONES DE BOMBEO DE AGUAS RESIDUALES.» abril de 2014. https://www.google.com.ec/l?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&ved=2ahUKEwjD3O7U8Y_oAhVoUd8KHUH-DWwQFjAEegQICBAB&url=https%3A%2F%2Fwww.compraspublicas.gob.FProcesoContratacion%2Fcompras%2FPC%2FbajarArchivo.cpe%3FArchivo%3DxpQ5CozyPJ3SWKZhYf5DCweaY (último acceso: 10 de marzo de 2020).
- Corrazón, R. Manual práctico para el diseño de sistemas de miniriego. Honduras: Programa Especial para la Seguridad Alimentaria, 2007.
- Duarte, O. y Díaz, E. Tecnología de Tierras y Aguas I. Paraná: Facultad de Ciencias Agropecuarias UNER, 2005.
- EcuRed. EcuRed. s.f. https://www.ecured.cu/Eficiencia_del_riego (último acceso: 20 de noviembre de 2019).
- Emaze.com. ahorremos el agua. s.f. emaze.com (último acceso: 19 de mayo de 2019).
- FAO. Evapotranspiración de cultivos (Manual 56). Roma: FAO, 2000.
- Fernández, R. Riego por superficie. Sevilla: Junta de Andalucía, 2010.
- Ferreyra, R. y Sellés, G. «Algunas consideraciones para el manejo de riego en Cítricos.» Tierra adentro, 2009a: 66 - 74.
- Franklin Electric. «Manual de Instrucciones y Montaje.» 15 de marzo de 2017. <https://www.google.com.ec/l?sa=t&rct=j&q=&>

esrc=s&source=web&cd=11&ved=2ahUKEwiPiYGP74_8KHQCWBCcQFjAKegQIAxAB&url=http%3A%2F%2Ffranklin.gua.com%2Fmedia%2F72527%2FManual-Serie-FIT-Bomba-Normalizada.pdf&usg=AOvVaw2b001p66ZMOz4mI2QRiDF (último acceso: 10 de marzo de 2020).

- Fuentes, J. y García, G. Técnicas de Riego. Madrid: Mundi - Prensa, 2000.
- Garcés, R. «Diseño de riego por superficie.» Academia. 10 de diciembre de 2014. https://www.academia.edu/9949165/dise%C3%B1o_de_riego_por_melgas_y_surcos (último acceso: 17 de junio de 2019).
- García, C. Días, A. y Calgaro, M. Selección para bombas. Montevideo: INIA, 2003.
- García, M. et. al. Generación de tecnología para el diseño de riego por melgas, adaptadas a las condiciones de Uruguay. Montevideo: Facultad de agronomía - INIA, 2018.
- Génova, L. et. al. Métodos de riego gravitacionales. Descripción, observación, diseño, operación y evaluación de métodos de riego gravitacionales (surco, amelgas y taipas arroceras). . 2016.
- —. «Relaciones agua-suelo-plantat-atmósfera. Contenidos hídricos referenciales. Medición y estimación de la humedad y la densidad aparente del suelo.» Aulavirtual.agro.unlp.edu.ar. agosto de 2017. https://www.google.com.ec/l?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjCiPePkd_aC44QFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Faulavirtual.agro.unlp.edu.ar%2Fpluginfile.php%2F35376%2Fmod_

Fcontent%2F1%2Funidad%25205%2520TP5%2520RASP.A.pdf&u (último acceso: 21 de diciembre de 2020).

- González, F. et. al. «Productividad del agua en algunos cultivos agrícolas en Cuba.» Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2014: 21 - 27.
- González, P. y Castel, J. «Riego deficitario controlado en “Clementina de nules” y Efectos sobre la producción y calidad de la fruta.» Spanish Journal of Agricultural Research, 2003: 81 - 92.
- Grassi, C. Fundamentos del Riego. Mérida, Venezuela: CIDIAT, 1998.
- Heras, Salvador. Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2011.
- Hurtado, L. «Fundamentos de riego.» En Suelos, Riego, de Universidad de La Molina, 417 - 483. Universidad de La Molina, 2010.
- IICA. «El Riego.» Curso teórico práctico de fertirriego. San Salvador: IICA, 21 de diciembre de 2016.
- Ingeniería civil.com. Diseño de Sistema de Riego por Aspersión. Lircay: Ingeniería Civil, 2008.
- Entrevista realizada por AtlixcoMexico. Irrigating melgas of alfalfa (26 de Febrero de 2010).
- ITT Goulds Pumps. «Manual de instalación, funcionamiento y Mantenimiento.» enero de 2018. https://www.google.com.ec/l?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjD3O7U8Y_oAhVoUd8KHUH-DWwQF

jAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fwww.gouldspumps.website%2FLiterature%2FInstruction%2520and%2520Oper (último acceso: 10 de marzo de 2020).

- Jiménez, A. Mejora de una finca en el término municipal de Daimiel. La Mancha: Universidad de Castilla, La Mancha, 2002.
- Junta de Andalucía. Riego por aspersión, módulo 3. Sevilla: Consejería de agricultura y pesca, 2010.
- Maldonado, T. Manual de riego parcelario. Santiago de Chile: FAO, 2001.
- Martin, E. Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego. enero de 2017. https://extension.arizona.edu/sites/extension.arizona.edu/files/.../az1220s-2017_0.pdf (último acceso: 25 de mayo de 2019).
- Martín, G. Manual para el diseño de una red hidráulica de climatización. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2012.
- Mendieta, M. «SECCIÓN 1: CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE BOMBAS.» En Impulsión de Aguas Residuales: Bombas para la Impulsión de Aguas Residuales, 1 - 14. 2003.
- Monge, M. Qué es y cómo se calcula el NPSHdisp de una bomba centrífuga. 17 de marzo de 2017. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/que-es-y-como-se-calcula-npsdisp-bomba-centrifuga> (último acceso: 1 de junio de 2020).
- Netafim. Aspersores, microaspersores y emisores. 2019. <https://www.netafim.com.mx/products-and-solutions/product-offering/aspersores/meganet/> (último acceso: 19 de octubre de 2019).

- Palacios, Ivan. Diseño de riego por melgas. México D.F., 2012.
- Paoli, H. Mejorar el riego por superficie ¿Es posible? INTA, 2008.
- Paz, M. Riego superficial. La Paz: INTA, 2015.
- Peña, E. El Riego por aspersión, Enfoques agronómico, estadístico, hidráulico y económico. Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2012.
- RAESA. RAESA. s.f. <https://www.riegosagricolasporspersion.com/> (último acceso: 12 de octubre de 2019).
- Romanella, C. Mecanización de suelos. Babahoyo: Universidad Técnica de Babahoyo, 2008.
- Ruíz, N, Lozano, D. y Gavilán, P. Evaluación de la Uniformidad de Cintas de Riego en Condiciones de Campo. Elección del Tiempo de Riego más adecuado. Córdoba: Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2014.
- SAGARPA. El riego por gravedad. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2010.
- Santos, L. et. al. El Riego y sus Tecnologías. Lisboa: CREA-UCLM, 2010.
- Saucedo, H. et. al. «DISEÑO DE RIEGO POR GRAVEDAD BASADO EN EL USO DE LAS ECUACIONES DE SAINT-VENANT Y GREEN Y AMPT.» Tecnología y Ciencias del Agua (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2015: 103 - 112.
- Singular Green. Riego en las cubiertas vegetales, como calcularlo. enero de 2016. <http://www.singulargreen.com/riego-en-las-cubiertas-vegetales/> (último acceso: 23 de junio de 2019).

- Trocel, D. Análisis de vibraciones en bombas centrífugas. 18 de septiembre de 2019. <https://power-mi.com/es/content/an%C3%A1lisis-de-vibraciones-en-bombas-centr%C3%ADfugas> (último acceso: 1 de junio de 2020).
- Veintimilla, M. Manual Aqua. Guayaquil , 2013.
- Veizaga, E. «Simulación 1D del flujo no saturado en suelo loésico.» Ihlla, 2015.
- Zendejas, A. y Serrano, M. Bombas e instalaciones de bombeo. 2005.

ISBN: 978-9942-823-72-4



9 789942 823724