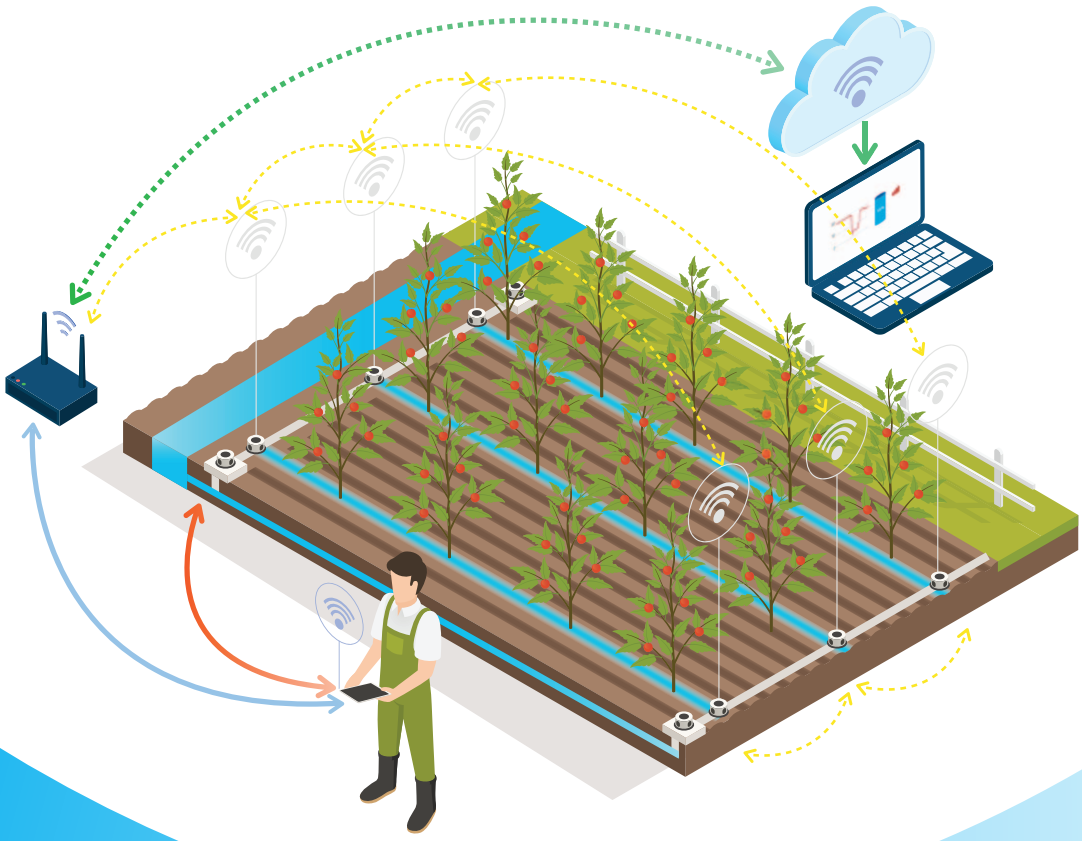
CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

fiaudec
Facultad Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción

DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN **DE RIEGO POR SURCOS**

Eduardo Holzapfel • Camilo Souto • Christian Correa • Nicole Uslar • Ricardo Matta



EDITORIAL UDEC

CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

fiaudec
Facultad Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción

DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN DE RIEGO POR SURCOS

EDITOR:
Eduardo Holzapfel

© Universidad de Concepción

ISBN 978-956-227-552-1 (Versión impresa)
ISBN 978-956-227-553-8 (Versión digital)

Editorial Universidad de Concepción

Primera Edición, agosto de 2023
Concepción, Chile

DISEÑO EDITORIAL
Okey Comunicaciones

IMPRESIÓN
Trama Impresores S.A.

Prohibida la reprodución total o parcial de esta obra, sin el consentimiento de los editores.

AGRADECIMIENTOS AL
Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería (CRHIAM)
ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,
Concepción, Chile
www.crhiam.cl

DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN DE RIEGO POR SURCOS

Eduardo Holzapfel • Camilo Souto • Christian Correa • Nicole Uslar • Ricardo Matta

RIEGO POR SURCOS

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN 8

2. CARACTERÍSTICAS DEL RIEGO POR SURCOS 11
- 2.1 Fases del riego por surco
- 2.1.1 Fase de avance
- 2.1.2 Fase de almacenamiento
- 2.1.3 Fase de vaciado
- 2.1.4 Fase de receso
- 2.2 Factores que influyen en las fases de riego
- 2.2.1 Infiltración
- 2.2.2 Pendiente
- 2.2.3 Caudal
- 2.2.4 Rugosidad
- 2.3 Forma del surco

3. INFILTRACIÓN EN RIEGO POR SURCOS 17
- 3.1 Antecedentes de la infiltración
- 3.1.1 Función de infiltración
- 3.1.1.1 Ecuaciones empíricas
- 3.1.2 Factores que afectan la infiltración
- 3.1.2.1 Características físicas del suelo
- 3.1.2.2 Características del perfil
- 3.1.2.3 Características de humedad del suelo
- 3.1.2.4 Método de riego y manejo del agua
- 3.1.2.5 Otros factores
- 3.2. Métodos para medir la velocidad de infiltración
- 3.2.1 Cilindro infiltrómetro doble
- 3.2.2 Surco infiltrómetro
- 3.2.3 Método del Punto Medio y Final
- 3.2.4 Método del avance

4. NIVELACIÓN DE SUELOS PARA RIEGO POR SURCOS 51
- 4.1 Antecedentes generales
- 4.2 Preparación para la nivelación
- 4.3 Métodos para determinar la nivelación
- 4.3.1 Mínimos cuadrados y Perfiles Promedios
- 4.3.2 Métodos de las áreas bases
- 4.3.3 Método del perfil
- 4.3.4 Métodos de comprobación de proyecto
- 4.3.5 Método de rectificación de las curvas de nivel
- 4.4 Cálculos del movimiento de tierra
- 4.5 Ajuste de corte y relleno

Contenidos

5. HIDRÁULICA DEL RIEGO POR SURCOS 65

5.1 Forma de surco
5.1.1 Obtención del área de flujo en la cabecera del surco
5.2 Hidráulica de la fase de avance
5.2.1 Ecuación de Saint-Venant
5.2.2 Modelo cero inercias.
5.2.3 Modelo Cinemático
5.3 Hidráulica de la fase de receso

6. EFICIENCIA EN RIEGO POR SURCOS .. 77

6.1 Eficiencia de aplicación
6.2 Eficiencia de requerimiento
6.3 Eficiencia de distribución de requerimiento
6.4 Eficiencia de distribución total
6.5 Coeficiente de uniformidad

7. SISTEMAS DE ADUCCIÓN EN RIEGO POR SURCOS 85

7.1 Sifones
7.2 Tubos rectos
7.3 Mangas de polietileno
7.4 Sistema de baja presión o californiano

8. DISEÑO DE RIEGO POR SURCOS 92

8.1 Antecedentes básicos para diseño
8.1.1 Pendiente del terreno
8.1.2 Rugosidad hidráulica
8.1.3 Infiltración del suelo
8.1.4 Superficie del sector
8.1.5 Calidad y disponibilidad de agua
8.1.6 Cultivo
8.2 Variables de diseño de riego por surcos
8.2.1 Caudal
8.2.2 Tiempo de riego
8.2.3 Longitud
8.2.4 Tiempo de corte
8.2.5 Número de surcos por hilera
8.2.6 Modelo de apoyo para diseño
8.2.6.1 Determinación de la forma del surco
8.2.6.2 Determinación de la infiltración en surcos
8.2.6.3 Descripción del avance, receso y tiempo oportunidad
8.2.6.4 Información de la calidad de riego

9. AUTOMATIZACIÓN DE RIEGO POR SURCOS 106

9.1 Operación de riego por surcos
9.2 Plataforma de control de riego
9.3 Válvula inteligente
9.4 Embalse de regulación
9.4.1 Análisis de diagrama de masa
9.4.2 Análisis de máximos secuenciales
9.4.3 Análisis de optimización

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 122

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 01

Introducción

El agua es un recurso natural insustituible que cada vez se hace más escaso, debido a que, a finales del siglo XX, el consumo de agua potable había crecido en una proporción superior al doble de la tasa de crecimiento demográfico mundial (Delgado, 2015). Otro de los factores que implica la escasez de este recurso, es la sobreexplotación de las aguas subterráneas y el uso poco eficaz del riego en la agricultura, esto último asociado a que es el sector que usa mayoritariamente este recurso y que podría ayudar a aminorar los efectos de restricción, que afecta tanto en el presente como en el futuro.

El riego consiste en la aplicación de agua con el objetivo de brindar un suministro suficiente que permita un buen crecimiento de las plantaciones (Guerra, 2009). Es por esto que existen varios sistemas de riego tanto superficiales como presurizados, los cuales tienen aplicaciones específicas que varían según factores como el cultivo, suelo, topografía, disponibilidad y calidad de agua, entre otros. Sin lugar a duda, los sistemas de riego con diseños, manejos y operaciones óptimas tendrán los niveles más altos de eficiencia y distribución de agua (Holzapfel *et al.*, 2009).

Los métodos de riego superficiales son los más utilizados en el mundo, entre los que se encuentran el riego por contornos, por bordes y principalmente el riego por surcos. El riego por surcos se utiliza para regar cultivos en hileras y huertos frutales (Holzapfel *et al.*, 2010). Últimamente el riego por surcos ha tenido gran importancia debido al aumento en los costos de energía para el funcionamiento de los sistemas de riego presurizados y la incorporación de la automatización en su operación.

Para optimizar el uso de agua en riego por surcos, han surgido nuevas tecnologías como: la modelación de las fases del riego por surcos, modernas técni-

cas de determinación de la infiltración, nivelación de suelos con alto grado de precisión, sistemas de apoyo con teledetección, que permiten mejorar y racionalizar las prácticas de aplicación del agua con menores costos energéticos.

En los últimos años el avance vertiginoso que ha experimentado la computación y el conocimiento creciente de la hidráulica del riego por surcos, han posibilitado el desarrollo de modelos fisicomatemáticos que permiten estudiar con mayor precisión muchos de los problemas que afectan a este método de riego.

Los modelos fisicomatemáticos que se han desarrollado para el riego superficial son importantes para los propósitos de evaluación y diseño. Estos modelos se clasifican en cuatro grupos principales: modelo hidrodinámico; modelo de cero inercias; modelo de onda cinemática y modelo de balance de volumen (Ebrahimian and Liaghat, 2011). La implementación de estos modelos permite a los ingenieros contar con un apoyo importante para el diseño y la operación del sistema de riego por surco, que durante muchos años se han basado en pautas empíricas aproximadas.

Los diferentes modelos que simulan el riego superficial se han desarrollado para representar eventos sitio específico, considerando que para cada predio o sitio de estudio no existe variación espacial dentro de ella en los parámetros de campo como infiltración, rugosidad, pendiente y área de la sección transversal (Lima *et al.*, 2014) o al menos no tienen variaciones muy significativas. La infiltración es una de las variables preponderantes en las simulaciones de riego superficial y para su estimación debe utilizar el método más adecuado. Para predecir la infiltración los modelos empíricos como Kostiakov y Kostiakov-Lewis son los más utilizados (Holzapfel *et al.*, 2004). Además, la mayoría de los modelos que predicen las fases de avance y recesión en el riego superficial utilizan estos modelos.

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 02

Características del Riego por Surcos

Este sistema de riego consiste en un set de surcos implementados con el fin de que se distribuyan el agua por el cultivo o frutal desde la fuente hacia todo el terreno. Para lograr esto se deben construir los surcos bajo una óptima condición de pendiente, ya que la gravedad es la encargada de mover en un sentido la trayectoria del agua (Guerra, 2009). De esta forma, el agua en su recorrido se va infiltrando en el suelo, para así alimentar y suplir las necesidades hídricas del cultivo. Es importante recalcar que para el diseño y operación del sistema se considera que la variación en la cantidad de agua aplicada en el proceso de infiltración al final del tiempo de riego (en general de tres a cuatro horas) es muy pequeña entre la cabecera y el final del surco (Holzapfel *et al.*, 2021).

2.1 FASES DEL RIEGO POR SURCO

En el riego por surco se pueden identificar cuatro fases durante el desarrollo de un evento de riego.

2.1.1 Fase de avance

Ocurre desde el inicio del riego hasta que el frente de agua alcanza el extremo final del surco. El tiempo de duración de esta fase se designa como tiempo de avance (Tav).

2.1.2 Fase de almacenamiento

Comienza cuando el frente de agua alcanza el extremo final del surco y termina cuando se corta el caudal de riego, permitiendo que al final del surco se infiltre la cantidad de agua requerida. La duración de esta fase se denomina tiempo de almacenamiento (Tal).

2.1.3 Fase de vaciado

Se produce desde el instante en que se corta el caudal de ingreso al surco hasta que el agua desaparece en la cabecera del surco por efecto de la infiltración y flujo de agua en el surco. El tiempo en que ocurre esta fase se conoce como tiempo de vaciado (Tva).

2.1.4 Fase de receso

Comienza desde el término de la fase de vaciado hasta que el agua desaparece completamente al final del surco. El tiempo transcurrido durante este proceso se conoce como tiempo de receso (Tre).

Las fases y curvas de avance y receso son esenciales para determinar la distribución final del agua infiltrada en el perfil del suelo a lo largo del surco y el volumen de agua que escurre (Figura 2.1). En este punto, conociendo la curva de avance y receso, podemos definir el tiempo oportunidad. El tiempo de oportunidad es el tiempo en que el agua se encuentra en contacto con el suelo punto a punto en el surco y este se puede obtener considerando la diferencia entre el tiempo de la curva de avance y receso.

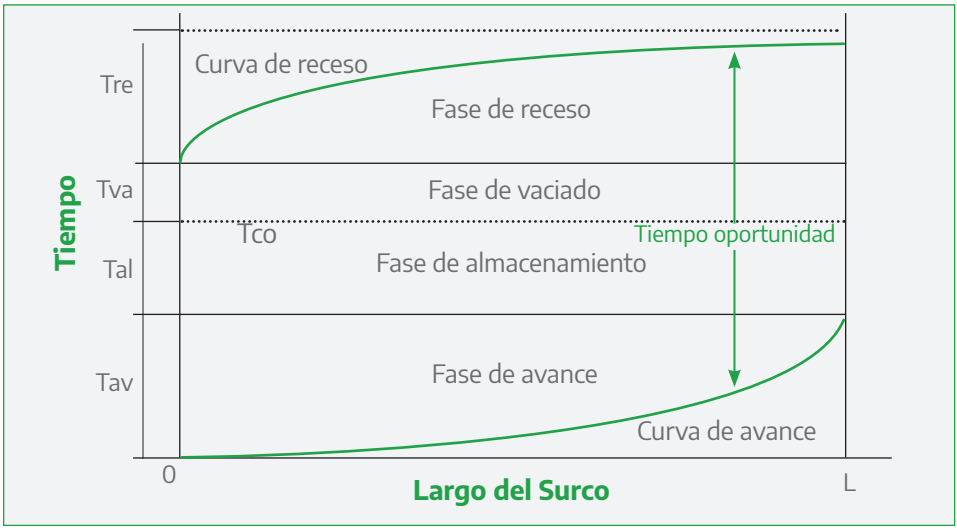


Figura 2.1. Diagrama esquemático de las fases del riego superficial. Tre = Tiempo de receso, Tav = Tiempo de avance, Tal = Tiempo de almacenamiento, Tco = Tiempo de corte, Tva = Tiempo de vaciado.
Fuente: Elaboración propia.

2.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS FASES DE RIEGO

2.2.1 Infiltración

La infiltración se puede definir como la tasa de incorporación del agua en el perfil del suelo cuando la superficie está cubierta de agua. Esto permite deducir que, mientras mayor sea la tasa de infiltración, más lento será la fase de avance y más rápida la fase de receso para riego por surcos (Koech *et al.*, 2010). Por lo que este parámetro se puede considerar de suma importancia en el diseño y evaluación de los sistemas de riego superficiales.

Según Holzapfel *et al.* (1988) y Holzapfel *et al.* (2004) la estimación de la infiltración es un factor importante en los estudios de riego y se debe determinar a través de metodologías adecuadas para obtener los coeficientes de los modelos de infiltración, el uso de modelos empíricos de infiltración y su dependencia de las características del suelo.

Las ecuaciones de infiltración son clasificadas dentro de tres grupos que incluyen: (i) ecuaciones teóricas (ecuación de Richard); (ii) ecuaciones físicas (Green-Ampth y Philip); (iii) ecuaciones empíricas (Kostiakov, Kostiakov Lewis, Horton y Horton-Overton) (Al-Azawi, 1985, Moravejalahkami, 2020). Siendo las más usadas en los modelos de simulación las ecuaciones de Kostiakov (Ecuación 2.1) y Kostiakov-Lewis (Ecuación 2.2).

$$I = A \cdot T^{B} \qquad [2.1]$$

$$I = A \cdot T^{B} + F_0 \cdot T \qquad [2.2]$$

Donde:

- I = Volumen de agua infiltrada ($m^3\ m^{-1}$).
- T = Tiempo que el agua ha estado en contacto con el suelo (min).
- A, B = Parámetros de ajuste empíricos.
- F_0 = Tasa de infiltración básica en ($m^3\ m^{-1}\ min^{-1}$).

Para determinar los parámetros A y B, existen varias metodologías, tales como el método del avance, dos puntos, un punto y el surco infiltrómetro. Según Holzapfel *et al.* (2004) los métodos que obtienen mejores resultados son el método de los dos puntos y el avance.

2.2.2 Pendiente

Cuando describimos la pendiente nos referimos a la inclinación que tiene el terreno. La pendiente es uno de los factores que tiene un efecto importante en la velocidad del agua cuando avanza a lo largo del surco. A mayor pendiente, mayor velocidad de avance del agua, sin embargo menor será el tiempo de avance. En esta situación la probabilidad de que ocurra erosión del suelo es alta, por lo que se recomienda que en riego gravitacional por surcos la pendiente no supere el 1,5%, teniendo como pendiente óptima 0,3% (Schilardi, 2010).

2.2.3 Caudal

El caudal es el volumen de agua transportada por unidad de tiempo y es un factor importante en la velocidad de avance del agua en el surco. Por lo tanto, es necesario controlarlo, ya que al contar con un caudal pequeño el tiempo de avance se prolonga debido a la baja velocidad del agua y el efecto de la infiltración (Guerra, 2009). Mientras que, al tener un caudal elevado, se producirá un efecto contrario, que además puede provocar problemas de erosión del suelo.

Debido a esto es necesario la obtención de un caudal máximo no erosivo por surco (Q_{max}), que dependerá de la pendiente. A continuación se muestra como determinar Q_{max} para un suelo franco (Ecuación 2.3).

$$Q_{max} = \frac{0.0063}{S} \qquad [2.3]$$

Donde:

Q_{max} = Caudal máximo no erosivo (L s^{-1}).

S = Pendiente del surco (m m^{-1}).

El valor de la constante puede ser mayor para un suelo arcilloso (0.007 a 0.0075) y menor para un suelo con alto riesgo de erosión como son los suelos derivados de cenizas volcánicas (0.005 a 0.0055).

Cabe mencionar que el Q_{max} se verá condicionado por la capacidad de flujo que tenga el surco, ya que este puede que no tenga el área suficiente para conducir el caudal estimado, sobre todo en pendientes muy pequeñas.

Al iniciar la fase de almacenamiento, es decir, cuando el agua llega al final del surco, es necesario reducir el caudal a la mitad o un tercio de Q_{max} como primera aproximación o calcular la infiltración media en la fase de

almacenamiento por el largo y estimar el caudal de receso. Esta práctica nos permite disminuir las pérdidas por escorrentía y aprovechar mejor el agua en la zona efectiva de raíces (Maldonado, 2007).

2.2.4 Rugosidad

Este parámetro afecta el flujo de agua en riego por surcos, ya que se producen resistencias al avance debido a la irregularidad en la superficie y por el material existente (vegetación). Todas estas fuerzas actúan en la dirección opuesta al flujo y reducen su velocidad (Sepaskhah and Bondar, 2002). Los efectos de estas resistencias en el surco se combinan para formar un factor de resistencia denominado coeficiente de rugosidad de Manning (n) (Gilley and Finkner, 1991).

El coeficiente "n" depende de diferentes factores, como la vegetación e irregularidad en el surco, la pendiente media del fondo del surco y las tasas de entrada de agua (Sepaskhah and Bondar, 2002; Chow, 1959). Estos factores deben considerarse al estimar el valor de n para diseñar el riego por surcos. Según Sepaskhah and Bondar (2002), Mostafazadefard (1982) y Fernández de Córdova *et al.* (2018) mencionan que este coeficiente varía entre 0.02 y 0.04 para surcos de riego.

Casi todas las descripciones teóricas del proceso de riego superficial utilizan una estimación de flujo uniforme. La más comúnmente utilizada de estas relaciones se llama Ecuación de Manning y se define como:

$$Q = \frac{1}{n} \cdot S^{\frac{1}{2}} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot A \qquad [2.4]$$

Donde:

- Q = Caudal de entrada ($m^3\ s^{-1}$).
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning.
- S = Pendiente del surco ($m\ m^{-1}$).
- A = Área de flujo (m^2).
- R = Radio hidráulico (m).

2.3 FORMA DEL SURCO

La hidráulica de flujo de cualquier fluido se modifica por la forma del surco. Para proporcionar una mejor comprensión de los fenómenos de flujo en el riego por surco, se deben comprender las relaciones entre el caudal, la velocidad del flujo, la pendiente, la forma del surco, las tasas de infiltración, el radio hidráulico y la rugosidad de Manning (Mostafazadefard, 1982).

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 03

Infiltración en riego por surcos

La aplicación del agua en la superficie del suelo y la manera con la que el agua ingresa al espacio poroso del suelo y queda disponible para las plantas, incide directamente en la eficiencia del riego. En estas condiciones, la velocidad con que el agua penetra en el suelo, denominada velocidad de infiltración, reviste gran importancia, particularmente por la variación de las características de suelo tanto temporales como espaciales, durante el proceso dinámico que se produce por la interacción de la fase líquida del agua con la sólida de las partículas de suelo.

La velocidad de infiltración es un parámetro que debe ser estudiado y determinado con detención, pues tiene un rol primordial en el manejo del agua a nivel predial.

En muchos trabajos se han investigado métodos para determinar la velocidad de infiltración de un suelo (Al-Azawi, 1985, Esfandiari *et al*., 1997, Holzapfel *et al.* 2004, Holzapfel *et al.* 1986, Moravejalahkami, 2020). Cada uno de estos, se ha desarrollado para satisfacer necesidades específicas de humedad de los suelos.

Los principales métodos de medición de velocidad de infiltración, bajo condiciones de campo, comprenden: inundación y estancamiento de agua en la superficie, aplicación de agua por aspersión, medida de entrada y salida de agua en surco o platabandas y el avance del frente de agua.

La utilización de un método se debe basar en los objetivos que persigue. Holzapfel *et al.* (1988) determinaron que no son comparables los méto-

dos que utilizan agua que escurre con aquellos en que el agua permanece apozada; de esto podemos deducir que para riego por surcos es recomendable utilizar métodos en que el agua escurre y para aspersión se pueden utilizar métodos en que el agua permanezca apozada.

En todos ellos es necesario realizar varias mediciones en las condiciones de humedad del suelo antes del riego, con el fin de obtener valores adecuados y confiables.

3.1 ANTECEDENTES DE LA INFILTRACIÓN

3.1.1 Función de Infiltración

La velocidad de infiltración (VI) o intensidad de entrada, se puede definir como la velocidad de penetración del agua en el perfil del suelo, cuando la superficie del terreno está cubierta por una capa de agua poco profunda.

La infiltración tiene dimensión de velocidad ($L\ T^{-1}$), como la lámina de agua (L) admitida por el suelo en una unidad de tiempo (T) o como la cantidad de agua absorbida por la unidad de superficie del terreno en la unidad de tiempo ($L^3\ T^{-1}\ L^{-2}$), respectivamente. Si las mismas unidades se usan en ambos casos, las expresiones son dimensionalmente equivalentes ($L\ T^{-1}$). En la primera forma la expresión común de velocidad de entrada es cm h^{-1} o cm min^{-1}. En la segunda forma, generalmente se expresa como m^3 min^{-1} m^{-2}.

Cuando se administra agua a un área de terreno, con el fin de restituir el contenido de agua en el suelo, puede ocurrir que la cantidad de agua absorbida aumente con el tiempo menos que proporcionalmente.

En la Figura 3.1 se representa gráficamente la lámina acumulada del agua infiltrada y la velocidad de infiltración, ambas con respecto el tiempo t. La curva de VI muestra una disminución en el tiempo, a medida que transcurre la infiltración. A la VI se le considera infiltración básica cuando la variación con el tiempo es despreciable.

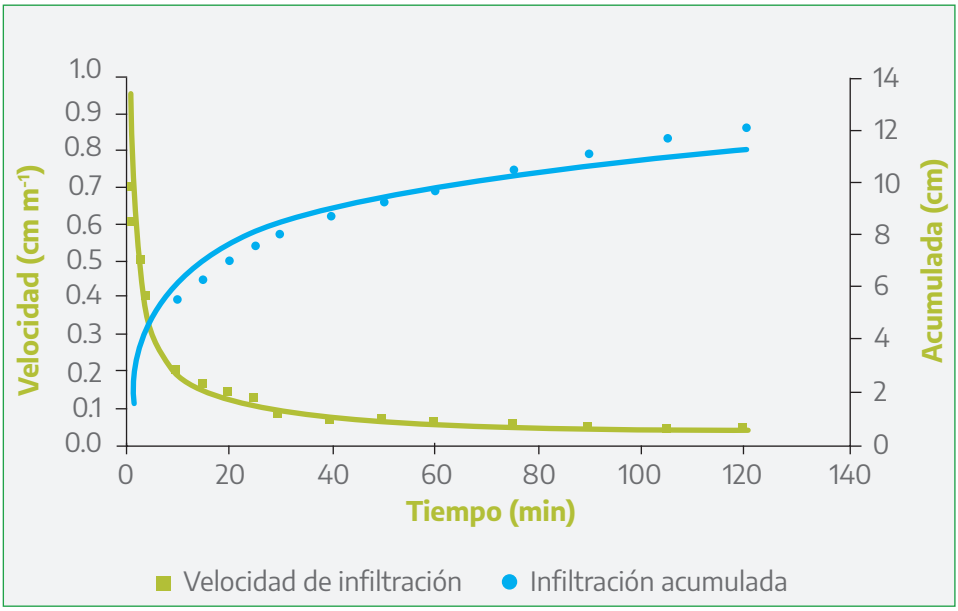


Figura 3.1. Velocidad de infiltración e infiltración acumulada de un suelo, en el tiempo.

Bodman y Coleman (1944) analizaron las relaciones de humedad en el suelo, distinguiendo durante el proceso de infiltración cuatro zonas en la masa de suelo debajo de la superficie del terreno, las cuales fueron:

(i) Una zona próxima a saturación de una profundidad de 1.0 a 1.5 cm.

(ii) Una zona donde el contenido de agua decrece rápidamente con la profundidad.

(iii) Una zona llamada la zona de transmisión, donde el contenido de agua es casi constante y aproximadamente los tres cuartos de saturación.

(iv) Una zona con una gran y violenta disminución del contenido de agua, llamada zona de humedecimiento, la cual termina abruptamente en el frente de humedad.

El análisis de la infiltración está basado en el movimiento del agua en el suelo bajo condiciones de no saturación. Durante la infiltración, la fase líquida y la fase gaseosa coexisten en la masa de suelo, con excepción de la zona de contacto entre el suelo y el agua en la superficie del terreno.

Los antecedentes que se presentan a continuación están principalmente relacionados al movimiento descendente del agua, aunque se admite que con algunas adaptaciones, puede ser aplicado a la infiltración horizontal o a la infiltración en cualquier ángulo que va desde lo horizontal a lo vertical.

La teoría capilar y la analogía con el flujo calórico o eléctrico, fueron fundamentales en los primeros intentos de explicar el movimiento del agua en el suelo y la velocidad de infiltración. Muchos científicos, sobre las bases de la teoría capilar, propusieron ecuaciones semi-empíricas que describen el fenómeno. Por ejemplo, Philip (1957) en una serie de trabajos dió bases más sólidas a la teoría de la infiltración, resolviendo la ecuación del flujo para el movimiento vertical hacia abajo sujeta al efecto gravitacional:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[D(\theta)\frac{\partial \theta}{\partial z}\right] - \frac{\partial}{\partial z}k(\theta) \qquad [3.1]$$

Donde:

- θ = Contenido de agua en el suelo expresado como fracción de volumenes ($L^3\ L^{-3}$).
- $D(\theta)$ = Coeficiente de difusividad expresado en función del contenido de humedad ($L^2\ T^{-1}$).
- t = Tiempo (T).
- $k(\theta)$ = Conductividad hidráulica expresada en función del contenido de humedad ($L\ T^{-1}$).
- z = Coordenada espacial positiva vertical hacia abajo (L).

La solución dada por Philip (1957) a la Ecuación 3.1 está basada en series infinitas para la infiltración acumulada. Con fines prácticos se consideran suficientes los dos primeros términos para el movimiento descendente, como se muestra a continuación:

$$I_{ac} = S \cdot t^{\frac{1}{2}} + C \cdot t \qquad [3.2]$$

Los coeficientes de ambos términos (S y C)son funciones de la difusividad del agua en el suelo y el contenido inicial y superficial de agua en el suelo. El coeficiente S tiene un significado especial en el comienzo del período de infiltración, representa la capacidad inicial del suelo para almacenar y liberar agua. El coeficiente C está relacionado con la capacidad del suelo para transmitir agua, y es importante en períodos posteriores del proceso de infiltración. De acuerdo con las recomendaciones de Philip, los valores de S y C pueden ser aproximados por las determinaciones actuales de $Iac\ a\ t = 1000\ s\ y\ t = 10000\ s$, respectivamente.

Por diferenciación de la Ecuación 3.2 con respecto al tiempo puede obtenerse la ecuación de velocidad de infiltración:

Entonces:

$$\frac{dlac}{dt} = VI \qquad [3.3]$$

$$VI = \frac{S}{2} \cdot t^{-\frac{1}{2}} + C$$

3.1.1.1 Ecuaciones empíricas

Se han propuesto varias ecuaciones empíricas para expresar la VI como una función del tiempo, dicha relación puede ser representada por una curva de forma hiperbólica o por una función matemática.

Si la Iac es el volumen de agua infiltrado por una unidad de área y t es el tiempo en que el agua ha estado en contacto con el suelo, entonces Iac puede ser representada por alguna de las siguientes Ecuaciones:

$$I_{ac} = A \cdot T^{B} \qquad \text{(Kostiakov)}$$

$$I_{ac} = A \cdot T^{B} + C \cdot T \qquad \text{(Kostiakov- Lewis)}$$

$$I_{ac} = A \cdot T^{\frac{1}{2}} + C \cdot T \qquad \text{(Philip)}$$

donde A, B y C son constantes asociadas a las condiciones de evaluación.

La ecuación de Kostiakov (1932) expresa la velocidad de infiltración en un punto:

$$VI = K \cdot T^n \text{ o bien } \frac{dh}{dt} = K t^n \qquad [3.4]$$

Donde:

- VI = Velocidad de infiltración (L T^{-1}) en cm min^{-1} o cm h^{-1}.
- $\frac{dh}{dt}$ = Variación de la altura de agua con el tiempo en un cilindro infiltrómetro (Equivalente a diac/dt).
- T = Tiempo de infiltración (t) en min o en h.
- K = Coeficiente el cual representa la velocidad de infiltración a t = 1; expresado en cm min^{-1+b} o cm h^{-1+b}.
- n = Exponente adimensional Negativo con valores que van de 0 y -1.

Integrando la Ecuación 3.4 entre los límites t = 0 y t = t, se obtiene la infiltración acumulada:

$$I_{ac} = \int_0^t VI \, \partial t$$

$$I_{ac} = \int_0^t K \cdot t^n \, \partial t \qquad [3.5]$$

$$I_{ac} = \frac{K}{n+1} \cdot t^{n+1}$$

La Ecuación 3.5 también puede ser representada así:

$$I_{ac} = A \cdot t^B \qquad [3.6]$$

Donde:

$$A = \frac{K}{n+1} \quad \text{y} \quad B = n + 1$$

O bien:

$$\frac{dh}{dh} = K t^n \rightarrow dh = K t^n \, dt$$

Al integrar entre los límites $t = 0$, $h = 0$, $t = T$ y $h = H$ se obtiene H que es la altura total infiltrada en el tiempo.

$$\int_0^H \partial h = \int_0^T K \cdot t^n \, \partial t$$

$$H = \frac{K \cdot T^{n+1}}{n+1} + c \qquad [3.7]$$

Donde c es la velocidad de infiltración constante para un t = ∞ (velocidad de infiltración básica).

Generalmente, las Ecuaciones 3.4 y 3.5 se ajustan muy bien a la mayoría de las condiciones de las prácticas del riego por superficie. Sin embargo hay algunos casos en los cuales la velocidad de entrada alcanza un valor constante dentro del periodo de infiltración; si es así, la Ecuación 3.4 se convierte en:

$$VI = K \cdot T^n + c \qquad [3.8]$$

Donde c es la velocidad de infiltración constante para un t = ∞

La infiltración acumulada I_{ac} será por lo tanto:

$$I_{ac} = \frac{K}{n+1} \cdot t^{n+1} + c \qquad [3.9]$$

La Ecuación 3.9 también puede ser representada así:

$$I_{ac} = A \cdot T^B + c \qquad [3.10]$$

Con B = -0,5, la Ecuación 3.10 es equivalente a la ecuación de Philip [Ecuación 3.1].

La ecuación de Kostiakov ha sido muy usada en las ciencias del suelo y del riego, principalmente por resultar práctica; ambos parámetros pueden obtenerse por simple representación gráfica de los datos experimentales en papel doble logarítmico o la curva de tendencia. En la actualidad, distintas ecuaciones usadas para proyectar los métodos de riego por superficie involucran los parámetros de la ecuación de Kostiakov, especialmente el exponente B.

La velocidad de infiltración promedio es la relación de la infiltración acumulada y el tiempo de entrada.

$$VI_{prom} = \frac{I_{ac}}{t} \; (\mathrm{L\,T^{-1}}) \qquad [3.11]$$

Sustituyendo la Ecuación 3.5 en la Ecuación 3.9 se obtiene la ecuación promedio en un punto:

$$VI_{prom} = \frac{K}{(n+1)} \cdot t^n \qquad [3.12]$$

Entonces VI_{prom} es la velocidad promedio de entrada de agua en el suelo en un periodo t.

La infiltración básica VI_b es otra cantidad que merece consideración debido a su importancia al proyectar el riego por superficie. La velocidad de entrada básica es el valor instantáneo cuando la velocidad de cambio de entrada para un periodo standard, es 10% o menos de su valor.

El tiempo en el cual $VI = VI_b$ se encuentra igualando la primera derivada de la Ecuación 3.4 por 0,01:

$$\frac{dVI}{dt} = -0.01VI$$

Entonces:

$$K \cdot m \cdot t^{n-1} = 0.01 \cdot K \cdot t^n$$

$$t^n = -10 \cdot n \qquad [3.13]$$

Si la Ecuación 3.13 se substituye en la Ecuación 3.14, se obtiene VI_b:

$$VI_b = K(-10 \cdot n)^n \qquad [3.14]$$

Las Ecuaciones 3.13 y 3.14 son generalmente válidas si se emplean unidades consistentes, cm h^{-1} o cm min^{-1}.

3.1.2 Factores que afectan a la infiltración

Según el análisis teórico de Philips la VI de un suelo homogéneo e isotérmico depende de la capacidad del suelo para almacenar y transmitir agua.

En la ecuación de Philips ambos parámetros son funciones de muchos factores. Estos factores son el resultado de una diversidad de valores cuantitativos comúnmente obtenidos en el campo. Desafortunadamente, en razón de que algunos de estos factores son extremadamente dinámicos, cambian con el manejo del agua y del suelo, aún no ha sido posible llegar a una cifra para establecer estándares de VI, perteneciente a una especifica unidad taxonómica de clasificación de suelo, excepto cuando se requiere una estimación aproximada de la VI_b, o cuando se usa una expresión cualitativa, como alta, moderada o baja.

La infiltración puede ser evaluada por la ecuación del flujo, la cual es válida para condiciones de saturación y de no saturación. Los factores que afectan la infiltración pueden agruparse como: (i) factores que afectan el gradiente hidráulico, y (ii) factores que afectan la conductividad hidráulica y el coeficiente de difusión. Para una discusión

más amplia de los factores involucrados, estos se agrupan de acuerdo a las características inherentes del suelo y relacionados con las prácticas de manejo del agua y el suelo, como: (1) características físicas del suelo; (2) características del perfil del suelo; (3) características de humedad del suelo; (4) método de riego y manejo del agua; entre otros factores.

3.1.2.1 Características físicas del suelo

La macro-porosidad del suelo es el primer factor que afecta la conductividad hidráulica en el estado de casi saturación y por lo tanto también la VI. La porosidad depende de la textura y de la estructura. El agua pasa más rápidamente a través del perfil en un suelo grueso con mayor porosidad no capilar, que en un suelo pesado en el cual predominan los poros capílares.

La influencia de la estructura y de la estabilidad estructural, es también importante. Los suelos estables al humedecimiento y desecación y sujetos a una regular secuencia de cultivo y buen manejo tienen mayor oportunidad de mantener una superficie abierta permeable al agua.

El contenido de arcilla, la composición míneralógica de la arcilla y la composición del complejo de intercambio, son otros factores que deben considerarse, esto es, suelos con alto contenido de arcilla montmorillonitica o illítica, se contraen y se hinchan alternadamente con el humedecimiento y desecación.

Los agentes cementantes del suelo, tales como materia orgánica y óxidos inorgánicos, influyen en la formación de agregados y por lo tanto mantienen una alta conductividad. La velocidad de entrada puede ser reducida por el debilitamiento de la estructura de una capa muy delgada de la superficie del suelo. Particularmente, cuando en el riego se usa agua clara, la separación de agregados y la emulsión, produce un sello superficial que reduce la penetración del agua. El impacto de las gotas provenientes del riego por aspersión, pueden producir los mismos resultados. De otra manera, el depósito de sedimento erodado en alguna sección aguas arriba y el asentamiento de sedimentos arrastrados por el agua de otra parte en el terreno regado por superficie, puede ser la causa del sellado superficial.

3.1.2.2 Características del perfil de suelo

En suelos estratificados no homogéneos, como los que se encuentran en muchas regiones áridas, la velocidad de entrada del agua depende de las condiciones físicas inherentes, siendo aproximadamente constante con la profundidad del suelo. Pero con frecuencia, especialmente en climas húmedos, el perfil del suelo muestra estratificación, y la capacidad de infiltración puede variar considerablemente para horizontes de suelos individualmente diferenciados.

En caso de que un horizonte edáfico cerca de la superficie presente la menor capacidad de infiltración, el proceso total está entonces gobernado por la infiltración a través de esta capa. Sin embargo si el estrato limitante yace más profundamente en el perfil del suelo, la velocidad de entrada puede ser inicialmente alta dependiendo de la capacidad de infiltración de los estratos superiores. Cuando el frente de humedad alcanza un estrato menos permeable, la infiltración adicional de agua será gobernada por infiltración de las capas menos permeables.

Sobre una capa limitante puede desarrollarse una capa de agua colgante, debido a que el agua no puede escapar lateralmente en el movimiento unidimensional descendente. Esto podría ocurrir no solo sobre los estratos con un muy bajo valor absoluto de permeabilidad, sino también como una consecuencia de la permeabilidad relativa, cuando ésta es mucho más alta en el estrato superior que en el inferior.

Las características del perfil del suelo juegan un papel importante en la determinación del ancho y del espaciamiento de los surcos. Según lo que Henderson and Haise (1967) señalan, si se ubican en un estrato poco permeable a determinada profundidad en el perfil, la velocidad inicial de infiltración dependerá del área mojada, pero una vez que comienza a desarrollarse la napa freática sobre el estrato limitante, el espaciamiento entre surcos deja de tener importancia.

3.1.2.3 Características de humedad del suelo

Las características de humedad del suelo o relación de retención de agua, es un factor importante en la infiltración. Este factor ha sido analizado teóricamente y probado bajo condiciones de laboratorio y de campo. La relación de retención de agua es ahora considerada como una característica física para cada tipo de suelo. Por lo tanto, el contenido de agua necesita ser incluído como uno de los parámetros en una prueba de infiltración.

Una buena aproximación, es indudablemente realizar la prueba de infiltración cuando el suelo se encuentre aproximadamente en el contenido de humedad al cual se aplicará normalmente el riego; como por ejemplo uno que represente el 50% del total de humedad disponible. Esta regla es válida en especial para suelos pesados que se contraen y se agrietan al secarse, debido a la relación que existe en los suelos arcillosos que se expanden al humedecerse y contraen al secarse.

3.1.2.4 Método de riego y manejo del agua

El método de riego afecta el acceso de agua en el suelo, el espesor que representa el flujo o el agua estancada sobre la superficie del terreno y la uniformidad de aplicación. En riego por superficie, el agua escurre sobre el terreno en espesores diversos a través de canales de diferente tamaño y forma, lo que produce diferentes gradientes hidráulicos y además diferente área efectiva para la infiltración. En cambio, en riego por aspersión, el agua penetra en el suelo inmediatamente al llegar a la superficie del terreno.

Una diferencia importante entre los patrones del flujo de agua entre bordes (platabandas) y surcos, es la que existe en relación al área mojada. En riego por bordes (platabandas) prácticamente se cubre toda el área con una delgada lámina de agua, mientras que el riego por surcos se cubre parcialmente. Debido a que el área mojada es menor en riego por surcos, la cantidad total involucrada en infiltración es también más pequeña que en riego por bordes (platabandas).

Las condiciones hidráulicas del surco, las cuales dependen del caudal, tamaño, pendiente, forma y rugosidad de la superficie, tienen un efecto sobre el perímetro mojado y sobre el área de entrada de agua. Así, la velocidad de infiltración dependerá de las condiciones hidráulicas del surco (Zuñiga, 1997). Una posible unión de los surcos adyacentes, debido al movimiento lateral del frente húmedo, puede en consecuencia afectar también la VI.

3.1.2.5 Otros factores

Factores como la temperatura influye en la VI, ya que ésta afecta la viscosidad y también la tensión superficial. El efecto de la temperatura en la infiltración no ha sido comprobado hasta ahora, de acuerdo al conocimiento de los autores, pero se supone que es prácticamente reducido. Lo que influye

definitivamente es la calidad del agua que debe ser igual a la que se utilizará en los riegos, del mismo contenido de sales y turbidez.

Otro factor importante que debe tenerse en cuenta es el aire atrapado durante la inundación. El aire permanece en el espacio vacío del suelo y no puede escapar bajo inundación extensiva. En riego por surco, en el cual la superficie del terreno está parcialmente cubierta con agua, el aire atrapado es menos importante, en la mayor parte de los suelos.

3.2 MÉTODOS PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

3.2.1 Cilindro infiltrómetro doble

El método más ampliamente usado para determinar la infiltración de un suelo es el del cilindro infiltrómetro, el cual es adecuado para métodos de riego que permiten mojar directamente una gran superficie de suelo.

El flujo radial es minimizado por medio de un área tampón alrededor del cilindro central. El movimiento del agua es en dirección vertical hasta que pasa a la parte inferior de la orilla del cilindro, desde donde puede producirse un flujo bidimensional, gobernado por el potencial matricial del suelo.

La limitación más seria para el uso de cilindros infiltrómetros es que su emplazamiento en el suelo provoca un cierto grado de alteración de sus condiciones naturales (destrucción de la estructura o compactación produciendo cierta variación en la cantidad de agua que penetra en el suelo). Además, la interfase entre el suelo y el lado del cilindro metálico puede causar una entrada anormal de agua, resultando un mayor volumen de agua que se infiltra en un tiempo dado.

Otra de las limitaciones que presenta el uso de cilindros es el problema del aire atrapado al interior de la columna de suelo. La incapacidad del aire para escapar desde el suelo bajo condiciones de flujo saturado, generalmente crea un cojín interno de aire que resulta en un impedimento para el movimiento vertical del agua, resultando velocidades de infiltración menores.

Es importante hacer notar que no es conveniente medir la VI en suelos alterados, como sería un terreno arado por ejemplo.

Procedimiento

Tomar una muestra de suelo para determinar el contenido de humedad del suelo en el que se realizará la prueba de infiltración.

Para proceder a instalar el cilindro previamente se limpia con una pala la vegetación de la superficie, en el lugar donde se instalará, teniendo la precaución de no alterar la estructura del suelo. A continuación, con golpes suaves sobre el trozo de madera, puesto sobre el cilindro, se introduce el cilindro hasta una profundidad aproximada de 10 a 15 cm (Figura 3.2).

Cuando no se cuenta con cilindros infiltrómetros dobles, y con el propósito de evitar el flujo radial del agua, se puede construir en torno al cilindro una poceta y mantenerla permanentemente con agua desde el comienzo hasta el final de la medición.

Una vez instalado el equipo se ubica un trozo plástico en el interior del cilindro y con la ayuda de un balde se vacía un volumen cualquiera de agua.

El plástico impide que el agua golpeé directamente la superficie del suelo, produciendo alteraciones y variando los valores de velocidad de infiltración.

Simultáneamente, se vacía agua en la poceta o en el cilindro exterior que actúan como área tampón.

Figura 3.2. Instalación y medición de cilindros infiltrómetros doble.

Lectura de datos

Una vez retirado el plástico del interior del cilindro, se procede a tomar la primera lectura. Para tal objeto, se ubica una regla sobre una estaquilla previamente instalada, o bien se toma como referencia el borde superior del cilindro y en los intervalos de tiempo que se indican, se procederá a anotar las lecturas de agua observadas en la regla.

Desde el punto de vista de riego, la velocidad de infiltración tiende a hacerse constante alrededor de las 2 horas de iniciada la medición (velocidad de infiltración básica), por esta razón se recomienda realizar las lecturas en los tiempos que se muestran en el ejemplo de la Tabla 3.1.

Relleno del cilindro

Cuando la infiltración es muy alta y se supone que se consumirá toda el agua del cilindro antes de terminar el período de mediciones, éste podrá rellenarse hasta la altura deseada. En la hoja de registro deberá quedar estampado el tiempo en que se hizo el relleno y la altura de agua alcanzada. Puede resultar que al aumentar la altura de agua al interior del cilindro aumente el potencial gravitacional del agua, lo que muchas veces hace variar la VI.

Cálculos y resultados

En la Tabla 3.1 se presenta una hoja de registros de infiltración con datos originales, obtenidos en terreno para un suelo franco, y su consiguiente representación en la Figura 3.3.

Tabla 3.1. Hoja de registro para una medición de Infiltración acumulada (Iac) y Velocidad de Infiltración (VI), utilizando cilindro infiltrómetro doble

Lectura N°	t (min)	Lectura (cm)	Δt (min)	A inf (cm)	Iac (cm)	VI (cm min^{-1})
1	0	21.5	-	-	-	-
2	1	20.8	1	0.7	0.7	0.700
3	2	20.2	1	0.6	1.3	0.600
4	3	19.7	1	0.5	1.8	0.500
5	4	19.3	1	0.4	2.2	0.400
6	5	19.0	1	0.3	2.5	0.300
7	10	18.0	5	1.0	3.5	0.200
8	15	17.2	5	0.8	4.3	0.160
9	20	16.5	5	0.7	5.0	0.140
10	25	15.9	5	0.6	5.6	0.120
11	30	15.5	5	0.4	6.0	0.080
12	40	14.8	10	0.7	6.7	0.070
13	50	14.2	10	0.6	7.3	0.060
14	60	13.7	10	0.5	7.8	0.050
15	75	13.0	15	0.7	8.5	0.047
16	90	12.4 (18.0)	15	0.6	9.1	0.040
17	105	17.5	15	0.5	9.6	0.033
18	120	17.0	15	0.5	10.1	0.033

El intervalo de tiempo (ΔT), se refiere al tiempo transcurrido entre una lectura y otra. La altura de agua infiltrada (Ainf) se obtiene de la diferencia de altura entre una lectura y otra. La infiltración acumulada (Iac) es la suma de las alturas de agua (Ainf) que se han infiltrado desde el comienzo de la medición y la velocidad de infiltración (VI) se obtiene al calcular en dimensiones de velocidad la altura de agua infiltrada (Ainf) en un cierto intervalo de tiempo (ΔT). Por ejemplo, entre las lecturas 2 y 3 ha transcurrido un minuto y la altura de agua en el cilindro ha disminuido 0.6 cm, lo que da una VI = 0.6 cm min^{-1}. Es importante establecer que la VI se debe representar en las mismas unidades, es decir si el tiempo está en minutos la VI debe estar en cm min^{-1}.

Los datos de la Figura 3.3, nos indican que la velocidad de infiltración es alta en los inicios del riego para, posteriormente, disminuir y hacerse constante hacia los 120 min. Por otra parte, la altura de agua que se ha infiltrado desde el comienzo del riego (Infiltración acumulada), siempre aumentará variando solamente la pendiente.

De este modo, sabemos que si el agua está, por ejemplo, 25 min mojando el suelo, se habrán infiltrado 5,6 cm, que equivalen a 56 L m^{-2} ó a 560 m^3 ha^{-1}.

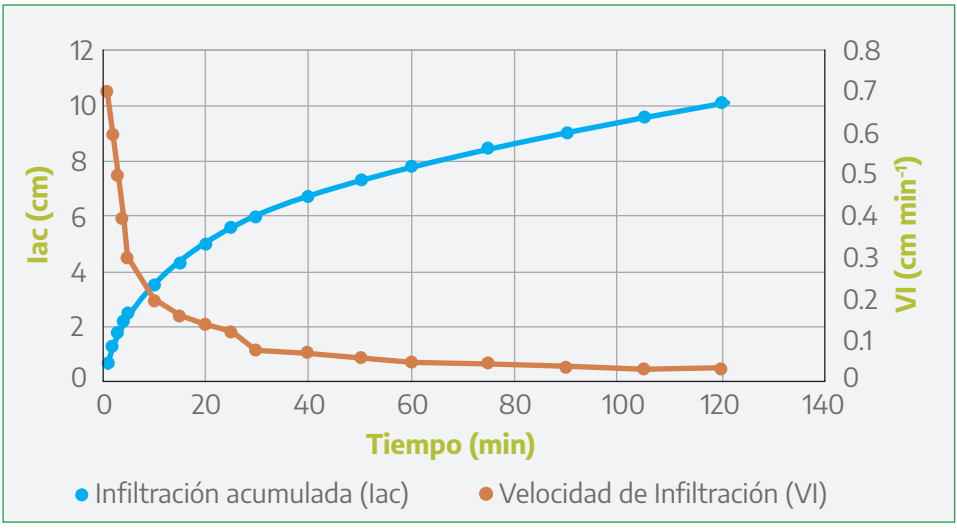


Figura 3.3. Representación de la infiltración acumulada y velocidad de infiltración de agua en un suelo.

Un manejo matemático más rudimentario puede realizarse si se grafican los datos considerando el logaritmo natural de cada coordenada (VI y tiempo) y luego su gráfico debería tener aproximadamente la forma de una recta. La pendiente de esta recta, obtenida del ajuste del tipo lineal, corresponde al exponente b del modelo $y = ax^b$ mientras que su valor al tiempo unitario corresponde al logaritmo natural del factor "a" del mismo modelo ($y = ax^b$). Esto es equivalente a la linearización del modelo potencial $y = ax^b$ (Figura 3.4 a).

Lo mismo se logra graficando en Excel los datos de VI versus el tiempo y agregar una línea de tendencia del tipo potencial para cada curva. Los parámetros a y b (del modelo $y = ax^b$) se observan directamente en la ecuación de la Figura 3.4 b.

Otro manejo más detallado y general de los datos busca calibrar los parámetros a y b del modelo $y = ax^b$ con la técnica de mínimos cuadrados. Esta estrategia conduce a resolver un sistema de ecuaciones cuya solución es:
El valor de los parámetros del modelo $y = ax^b$ es:
$a = e^a$, donde

$$a = \frac{(\sum \ln y_i)(\sum (\ln x_i)^2) - (\sum \ln x_i)(\sum (\ln x_i)(\ln y_i))}{N(\sum (\ln x_i)^2) - (\sum \ln x_i)^2} \quad [3.15]$$

$$b = \frac{N(\sum (\ln x_i)(\ln y_i)) - (\sum \ln x_i)(\sum \ln y_i)}{N(\sum (\ln x_i)^2) \quad (\sum \ln x_i)^2} \quad [3.16]$$

N es el número de datos medidos.

De igual manera, para la ecuación de Kostiakov, que representa la Iac en un cierto tiempo t es también del tipo potencial:

$$I_{ac} = A \cdot t^B \quad [3.17]$$

Los parámetros A y B se obtienen de la misma manera detallada anteriormente para la VI.

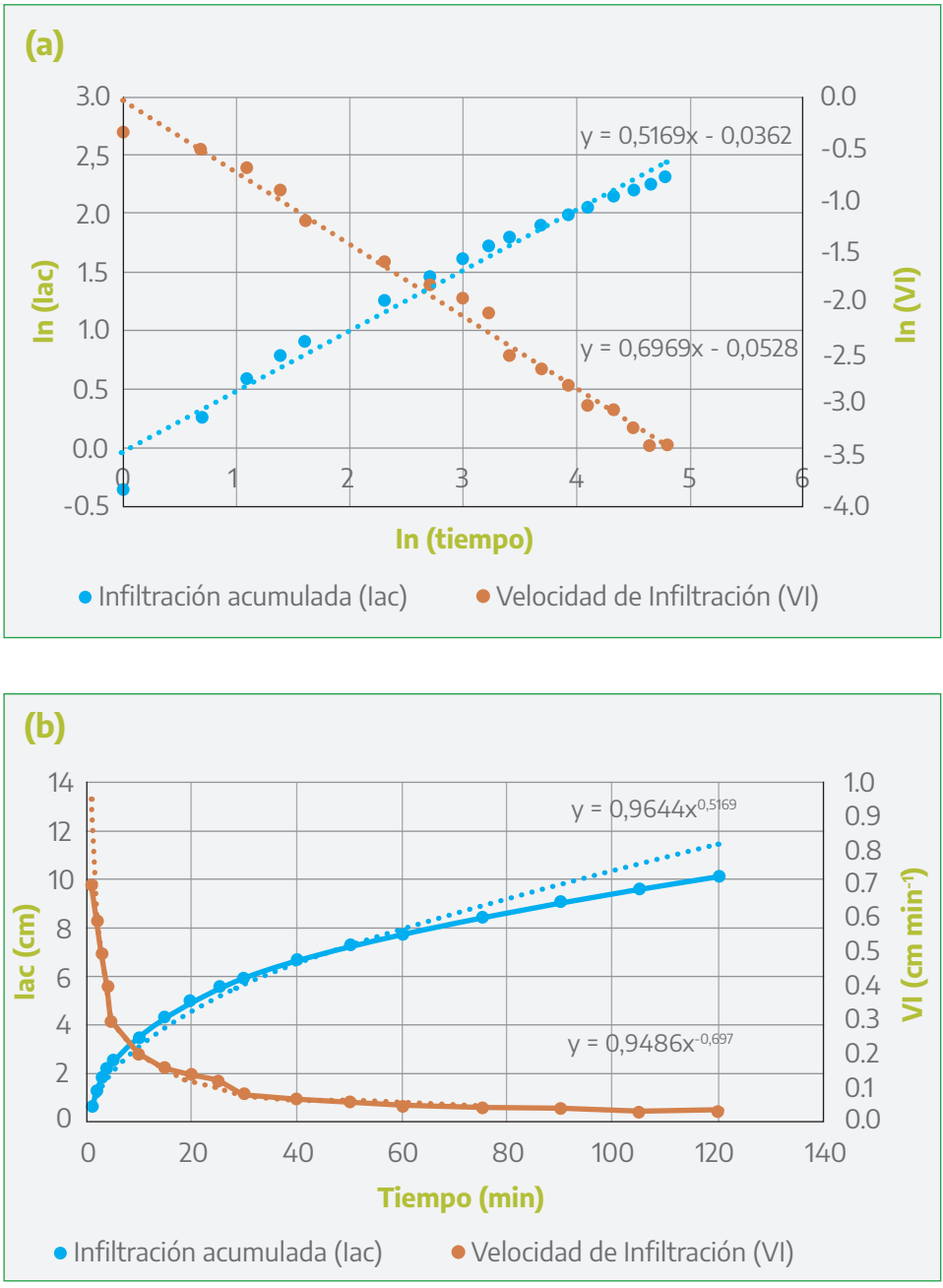


Figura 3.4. (a) Linealización de los modelos potenciales de VI e Iac. (b) Obtención de línea de tendencia y ecuación del tipo potencial en Excel para determinar los parámetros a y b.

3.2.2 Surco infiltrómetro

Dadas las características del riego por surcos, sólo una parte del terreno está en contacto con el agua; así, la infiltración se produce a través del perímetro mojado del surco. Por tanto, la infiltración total de agua en el suelo depende tanto del perímetro mojado, como de las características hidráulicas del surco.

Otros aspectos importantes a considerar son el contenido de humedad del suelo, que hace variar la velocidad de infiltración y el número de riegos dados en el surco. Esto último, porque la rugosidad, forma del surco y otras características hidráulicas cambian conforme aumentan los riegos efectuados.

La forma de medir infiltración en surcos, que se expondrá a continuación, es conocida como el método del surco infiltrómetro o método de entrada salida. Consiste, básicamente, en determinar las diferencias entre el caudal de entrada y salida en un surco, y su variación en el tiempo.

Este método considera la infiltración sobre un segmento relativamente largo del surco.

Materiales

Los materiales utilizados para la determinación son: Huincha de 50 m, cronómetro, nivel topográfico, estructuras de aforo, sifones o tubos rectos de PVC, balde calibrado, barrenos, cápsulas de aluminio, cilindros densidad aparente y hoja de registro “surco infiltrómetro”

Procedimiento

Para realizar la determinación de la infiltración en este método se deberá:

- Seleccionar 3 - 4 surcos contiguos y uniformes .
- Se utilizan tres surcos si el espaciamiento entre ellos es el mismo, y cuatro surcos si estos son pareados.
- Instalar en la cabecera del surco central alguna estructura de aforo: canoa Parshall, canoa fondo plano, sifones o baldes previamente calibrados, con el propósito de medir el caudal de entrada al surco. A su vez, para aforar el caudal de salida, también se debe instalar una estructura de aforo en el extremo final del surco; o en su lugar, hacer una excavación con el fin de introducir un balde de volumen conocido (Figura 3.5).

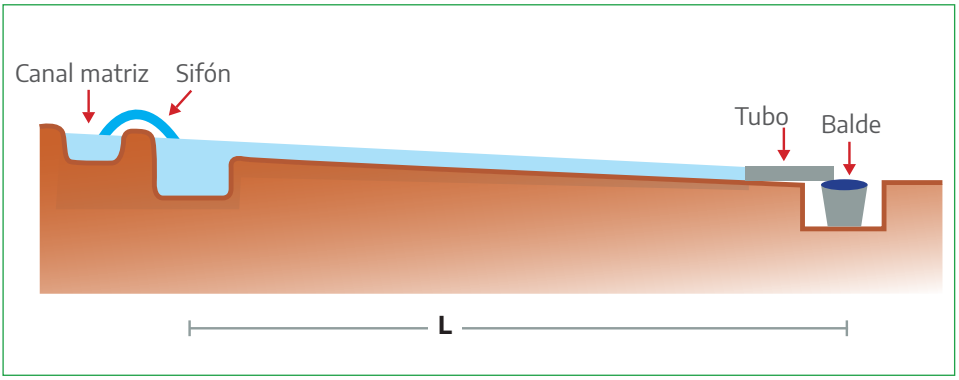


Figura 3.5. Esquema de instalación de un surco infiltrómetro. L: distancia

La distancia (L) entre la cabecera del surco y el extremo inferior varía dependiendo del tipo de suelo. En suelos arenosos, esta distancia no debe ser mayor a 30 m; en cambio, en suelos arcillosos puede variar entre 50 y 80 m.

Lectura de datos

Después de seleccionado el caudal a usar normalmente en el riego, se deriva el agua a los surcos de ensayo. Aquí ocurre el primer inconveniente ó pregunta: ¿Qué caudal utilizar? Puede ser el caudal máximo no erosivo, el caudal reducido, un promedio de ambos, ó el caudal que normalmente utiliza el regador. Esto es importante y se debe recordar que a mayor caudal conducido por el surco, mayor será la infiltración o cantidad de agua que pasa a la zona de raíces, pues aumenta el perímetro mojado.

Al momento de entrar el agua al surco seleccionado, se registra la hora. Además, se debe dejar escurrir el agua en los surcos vecinos con el propósito de uniformar el perfil de humedecimiento. También, es necesario tratar de mantener constante el caudal de entrada, razón por la cual es aconsejable derivar el agua mediante sifones o tubos rectos, manteniendo constante la carga o altura de agua en el canal de aducción.

Se registra el tiempo que demora el agua en llegar al extremo final del surco seleccionado. A partir de ese momento y cada ciertos intervalos de tiempo, se realizan simultáneamente las lecturas de los caudales en ambos extremos del surco, ya sea usando un balde calibrado y cronómetro o alguna estructura de aforo. Se recomienda en los primeros 10 min hacer de 3 a 4

mediciones, para después espaciarlas cada 5 a 10 min hasta completar aproximadamente 2 h de medición.

Otro criterio de término de medición de infiltración, es que se debe realizar hasta el momento en donde el caudal que pasa por el extremo final del surco se haga constante. Esto indicaría que la VI también se ha hecho constante (suponiendo que el caudal en la cabecera del surco no varía durante el período de medición).

Cálculos y resultados

Para proceder a la elaboración de la información obtenida, se propone un cuadro de tabulación (Tabla 3.2), en donde la VI en surco se calcula mediante la siguiente relación:

$$VI = \frac{6 \cdot Q}{L \cdot P} \qquad [3.18]$$

Donde:

VI = Velocidad de infiltración, (cm min^{-1}).

Q = Diferencia entre el caudal de entrada y el de salida, para un tiempo dado. (L s^{-1}).

L = Largo del surco (m).

P = Perímetro mojado (m).

Tabla 3.2. Tabulación de registro de velocidad de infiltración en surcos infiltrómetro. (Longitud surco 30 m y Perímetro mojado 0.3 m).

Hora	t (min)	Δt	Tiempo Promedio* (min)	Caudal entrada (L s^{-1})	Caudal salida (L s^{-1})	Diferencia Caudal (L s^{-1})	VI (cm min^{-1})
8:00 inicio							
8:15	15	0		2.2			
8:16	16	1	8.5	2.2	1.35	0.85	0.57
8:18	18	3	10.5	2.2	1.53	0.67	0.45
8:20	20	5	12.5	2.2	1.78	0.42	0.28
8:25	25	10	17.5	2.2	1.85	0.35	0.23
8:30	30	15	22.5	2.2	1.91	0.29	0.19
8:40	40	25	32.5	2.2	1.95	0.25	0.17
8:50	50	35	42.5	2.2	2.01	0.19	0.13
9:00	60	45	52.5	2.2	2.03	0.17	0.11
9:15	75	60	67.5	2.2	2.06	0.14	0.09
9:30	90	75	82.5	2.2	2.08	0.12	0.08
10:00	120	105	112.5	2.2	2.10	0.1	0.07

* El tiempo promedio se obtiene de la semi suma de los tiempos de entrada y salida e indica el tiempo que ha permanecido el agua en el surco.

Finalmente, para obtener la ecuación de infiltración, se ajustan los datos de VI y tiempo promedio a un modelo de tipo potencial y se obtienen los parámetros a y b (Figura 3.6), en donde el valor de la ecuación de VI así obtenida es:

$$VI = 2.419 \cdot t^{-0.775} \quad VI = \text{cm min}^{-1}, t = \text{min}$$

Finalmente, la ecuación de infiltración acumulada se obtiene integrando velocidad de infiltración:

$$VI = K \cdot t^n \qquad [3.19]$$

$$K \cdot t^n \, dx = K \cdot T^{n+1} + C$$

Donde:

C = Constante de integración. Valor que se utiliza para corregir cuando el ajuste es deficiente.
K = Constante de la ecuación de VI.
n = Exponente de la ecuación de VI.

Reemplanzado los valores obtenidos:

$$I_{ac} = \frac{2.4193}{-0.775 + 1} * T^{-0.775 + 1}$$

$$I_{ac} = 10.752 \cdot T^{0.2214}$$

Donde:

Iac = Infiltración acumulada (cm).
K = Constante de la ecuación de velocidad de infiltración.
n = Exponente de la ecuación de velocidad de infiltración.
T = Tiempo de infiltración transcurrido (min).

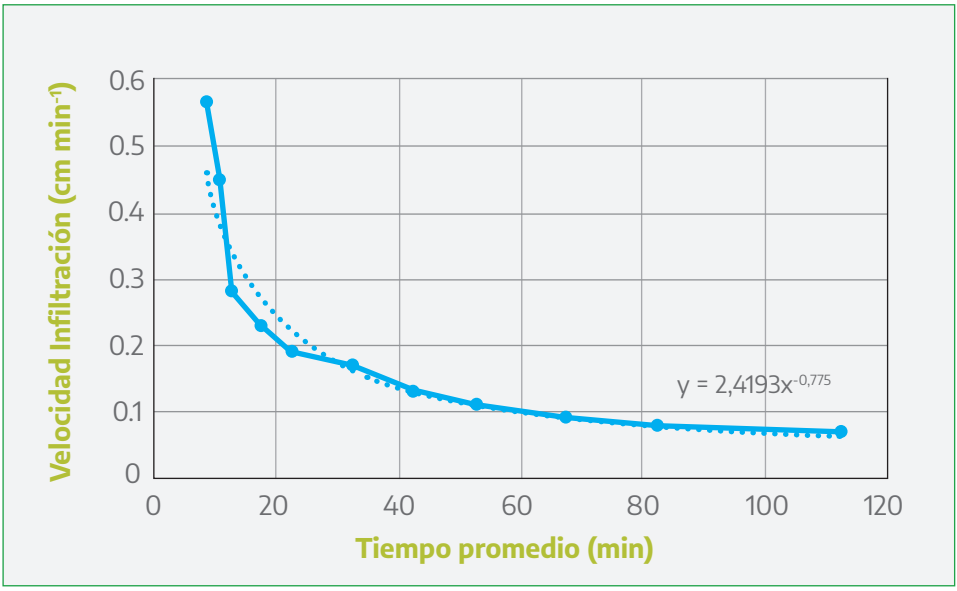


Figura 3.6. Velocidad de infiltración (VI) y su línea de tendencia tipo potencial.

3.2.3 Método de los dos puntos o Punto Medio y Final

Con el propósito de determinar un tiempo de riego adecuado en surcos, utilizando la ecuación de Kostiakov, se presenta una metodología simple de ejecutar, conocida como "dos puntos", la cual fue desarrollada por Elliot y Walker (1982).

También se le conoce como "método del punto medio y final". Es una metodología simple de ejecutar y consiste básicamente en anotar el tiempo en que el agua llega a la mitad y al final del surco y medir el área de conducción a esos tiempos.

Procedimiento

- Seleccionar tres surcos contiguos de largo L (120-100 m) en el terreno previamente seleccionado, cuidando que no haya materiales extraños que obstaculicen el normal escurrimiento del agua.
- Excavar en el extremo superior del surco cavidades donde colocar un balde para medir volumétricamente el caudal de entrada al surco, o bien aforar utilizando algunos de los métodos ya descritos anteriormente.
- Medir la sección del surco al inicio del surco y a la distancia L/2 y L/4, tal como se indica en la Figura 3.7.

De este modo, durante el riego, sólo será necesario medir la profundidad del agua para determinar la sección conductora de agua.

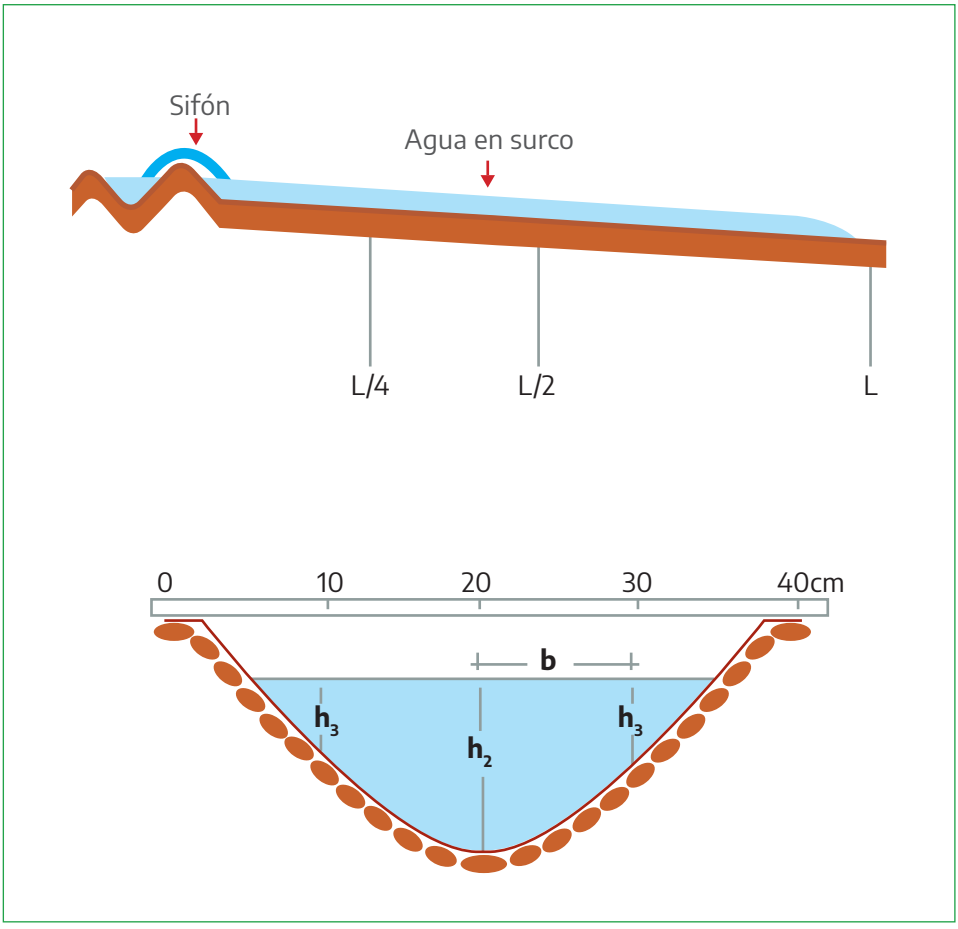


Figura 3.7. Esquema para la medición de tiempos y área en el método de los 2 puntos.

Lectura de datos

Anotar la hora del momento de entrada del agua al surco infiltrómetro. Además, se deberá dejar escurrir el agua en los surcos vecinos al mismo tiempo, con el objeto de uniformar la humedad del perfil. Es importante mantener constante el caudal de entrada.

Cuando el agua haya recorrido la distancia L/2, anotar la hora del suceso y medir la sección del surco que conduce agua, tanto en la cabecera como a la distancia L/4.

Una vez que el agua llegue al final del surco, de largo L, anotar la hora y medir la sección conductora en la cabecera y a la distancia L/2.

Cálculos y resultados

Las ecuaciones a utilizar son la siguientes:

$$Iac = A \cdot T^B \qquad [3.20]$$

Donde:

- Iac = Infiltración de agua en el surco ($m^3\ min^{-1}\ m^{-1}$ de largo de surco).
- A = Constante de infiltración acumulada.
- B = Exponente de infiltración acumulada.
- T = Tiempo que debe permanecer el agua en el surco para que se infiltre un volumen Ia (min).

Para obtener A y B se utiliza:

$$A = \frac{a \cdot (B+1) \cdot (r+1)}{(B + r - r \cdot B + 1) \cdot (T_L)^B} \qquad [3.21]$$

$$B = \frac{ln\left[\frac{\alpha}{\beta}\right]}{ln\left[\frac{T_L}{T_{L/2}}\right]} \qquad [3.22]$$

Donde:

T_L es el tiempo que demora el agua en recorrer la distancia L del surco.

$$\alpha = \frac{V_L}{L} - A_{s.L} - \frac{F_0 \cdot T_L}{r+1} \quad [3.23]$$

$$\beta = \frac{V_{L/2}}{L/2} - A_{s.L/2} - \frac{F_0 \cdot T_{L/2}}{r+1} \quad [3.24]$$

Donde:

VL = Volumen de agua aplicado al surco, cuando ésta ha recorrido la distancia L (m^3).

As = Área promedio conductora de agua, obtenida a partir de la semi-suma del área en la cabecera y área medida a la distancia L/2, cuando el agua ha recorrido una distancia L (m^2).

$V_{L/2}$ = Volumen de agua aplicado al surco, cuando ésta ha recorrido la distancia L/2 (m^3).

As = Área promedio conductora de agua, obtenida a partir de la semi-suma del área en la cabecera y área medida a la distancia L/4, cuando el agua ha recorrido una distancia L/2 (m^2).

$$r = \frac{\ln(0.5)}{\ln\left[\frac{T_{\frac{L}{2}}}{T_L}\right]} \quad [3.25]$$

Donde:

$TL/2$ = Tiempo de demora el agua en recorrer la distancia L/2, (min).

TL = Tiempo que demora el agua en recorrer la distancia L (min).

Mediciones de terreno y ejemplo de cálculo

Para facilitar el uso de esta metodología se entregan a continuación datos de terreno y su manipulación:

• Largo del surco	: 60 m
• Pendiente	: 0.6 %
• Caudal utilizado	: 1.26 L s^{-1}
• Caudal de entrada al surco	: 0.0756m^3 min^{-1}
• Área de la sección conductora en la cabecera	: 0.0014 m^2
• Área de la sección conductora en L/4 cuando el agua llega a L/2	: 0.0011 m^2

- Área de la sección conductora en L/2 cuando el agua llega a L (m^2) : 0.0010 m^2
- Tiempo que demora el agua en llegar a L/2 : 5 min
- Tiempo que demora el agua en llegar a L : 18 min

Dado que la pendiente del terreno es mayor al 0.5%, sólo es necesario medir la sección conductora en la cabecera y multiplicar por 0.8 para obtener con bastante exactitud As, L y As,L/2, es decir:

$$A_{s,L} = A_{s,L/2} = 0.8 * 0.00140\ m^2 = 0.00112\ m^2$$

Cálculos

- Cálculo de α (Ec. 3.23)

VL = 0.0756 $m^3\ min^{-1}$ • 18 min = 1.361 m^3 se han aplicado al surco cuando el agua ha recorrido la distancia L.

$$\alpha = \frac{V_L}{L} - A_{s.L} = \frac{1.3608\ m^3}{60\ m} - 0.00112\ m^2 = 0.022\ m^2$$

- Cálculo de r (Ec. 3.25)

$$r = \frac{\ln[0.5]}{\ln\left[\frac{T_{L/2}}{T_L}\right]} = \frac{\ln[0.5]}{\ln\left[\frac{5}{18}\right]}$$

- Cálculo de β (Ec 3.24)

$V_{L/2}$ = 0.0756 $m^3\ min^{-1}$ • 5 min = 0.378 m^3 se han aplicado al surco cuando el agua ha recorrido la distancia L/2

$$\beta = \frac{V_{L/2}}{L/2} - A_{s.\frac{L}{2}} = \frac{0.378\ m^3}{30\ m} - 0.00112\ m^2 = 0.012\ m^2$$

- Cálculo de B (Ec 3.22)

$$B = \frac{\ln\left[\frac{\alpha}{\beta}\right]}{\ln\left[\frac{T_L}{T_{L/2}}\right]} = \frac{\ln\left[\frac{0.022}{0.012}\right]}{\ln\left[\frac{5}{18}\right]} = 0.47$$

- Cálculo de A (Ec 3.21)

$$A = \frac{\alpha \cdot (B+1) \cdot (r+1)}{(B+r-r \cdot B+1) \cdot T_L^{\,B}} \text{ en } m^3 m^{-1} \text{ y T en min}$$

$$A = \frac{0.022 \cdot (0.47+1) \cdot (0.54+1)}{(0.47+0.54-0.54 \cdot 0.47+1) \cdot (18)^{0.47}} = 0.0073\ \frac{m^3}{m\ min}$$

Finalmente, el volumen de agua infiltrado por metro de largo de surco al tiempo T, puede ser determinado por la la siguiente ecuación:

$$I_a = A \cdot T^B$$

$$I_a = 0.0073\ m^3\ m^{-1}\ min^{-B} \bullet T^{0.47}\ min^B$$

La representación de esta ecuación se entrega en la Figura 3.8. Así, si el agua ha estado en promedio en un punto del surco, un tiempo de 70 min, se ha infiltrado 0.0516 m^3 en un metro de largo.

Para convertir dicho volumen en altura de agua, deberá conocerse el espaciamiento promedio entre los surcos (70 cm).

Así,

$$I_a = H_r \cdot E \qquad [3.26]$$

Donde:

H_r = Altura de agua infiltrada o altura de agua a reponer (mm).

E = Espaciamiento entre surcos (m).

Así para el ejemplo se tendría una altura de agua de:

Hr = 0.0516 m^3 / 0.7 m^2 = 0.074 m.

E = 74 mm de altura de agua infiltrada.

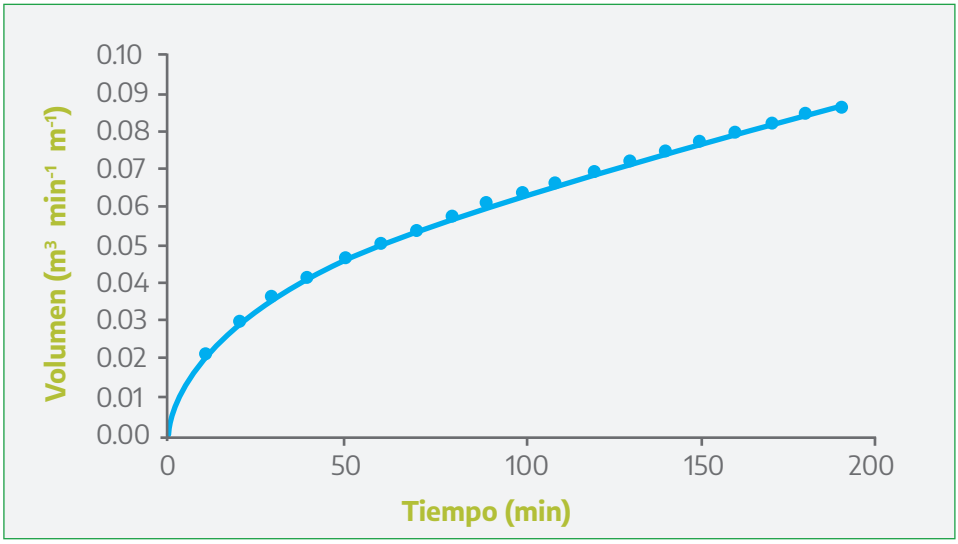


Figura 3.8. Representación gráfica de la Infiltración Acumulada usando el método de los dos puntos.

Dicho de otra manera, si la evapotranspiración entre riegos o la altura de agua necesaria para elevar el contenido de humedad a Capacidad de Campo fuese de 74 mm, es necesario que el agua permanezca en un punto del surco un tiempo mínimo de 70 min.

Este método, que ha sido debidamente probado y validado en el país (Bazán, 1986; Zúñiga, 1997), posee indudables ventajas de manejo y operación en terreno, haciendo mínimas las mediciones en comparación a otros métodos. La experiencia indica que una cuidadosa medición de las secciones, al inicio, a L/2 y L/4 del surco, inciden directamente en la confiabilidad y validez de la ecuación de Iac obtenida.

3.2.4 Método del avance

Este es un método simple y se ha encontrado que la calidad de los resultados obtenidos son adecuados.

Al entregar un flujo constante de agua a un surco, parte del agua que avanza por el surco se infiltra y la otra queda en la superficie del surco.

Así, la velocidad de infiltración puede ser evaluada si se conocen, en cualquier momento, el volúmen de agua aplicada y el volumen almecenado en la superficie del surco.

Materiales

Los materiales utilizados en su determinación son:
Una huincha de 30 m, estacas, cronómetro, nivel topográfico, sifones, balde calibrado, barrenos y cápsulas de aluminio.

Procedimiento

Para determinar los parámetros de riego de esta metodología se requiere:

- Seleccionar 3 surcos en el terreno previamente asignado.
- Cavar al inicio del surco, cercano al canal de aducción una cavidad donde colocar el balde para medir el caudal de entrada que está entregando el sifón.
- Observar los surcos seleccionados cuidando que no haya elementos que obstaculicen el normal escurrimiento del agua.
- Estacar un surco cada 5 m.
- Muestrear el suelo para determinar el contenido de humedad antes del riego y la densidad aparente.
- Aplicar distintos caudales a los surcos, tratar que el caudal se mantenga constante y medirlo a intervalos regulares.
- Anotar el tiempo de inicio del riego y el tiempo en que llega a cada una de las estacas (avance). Una vez que el agua llega al final del surco, cortar el riego, anotar el tiempo de corte y el tiempo en que el agua desaparece frente a cada estaca (recesión).

- Medir el área de conducción al inicio y en la mitad del surco cuando el agua llegue a la mitad y al final del surco respectivamente.
- Muestrear el suelo 24-48 h después de la experiencia para determinar el contenido de humedad después del riego.

Cálculos y resultados

Con los datos obtenidos en un surco construir Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Registro de datos para el método del avance

Distancia de avance (m)	Tiempo de avance (min)	Volumen aplicado Caudal • t (m^3)	Volumen en surco Área • Distancia (m^3)	Volumen infiltrado (m^3)
0	0.0			
5	2.0	0.156	0.058	0.098
10	4.5	0.351	0.117	0.234
15	8.0	0.624	0.175	0.449
20	11.0	0.858	0.234	0.624
25	17.0	1.326	0.292	1.034
30	22.0	1.716	0.350	1.366
35	25.0	1.950	0.409	1.541
40	30.0	2.340	0.467	1.873
45	34.0	2.652	0.526	2.126
50	40.0	3.120	0.584	2.536
55	43.0	3.354	0.642	2.712
60	48.0	3.744	0.701	3.043
65	56.0	4.368	0.759	3.609
70	65.0	5.070	0.818	4.252
75	68.0	5.304	0.876	4.428
80	73.0	5.694	0.934	4.760
85	76.0	5.928	0.993	4.935
90	83.0	6.474	1.051	5.423
95	88.0	6.864	1.110	5.754
100	99.0	7.722	1.168	6.554

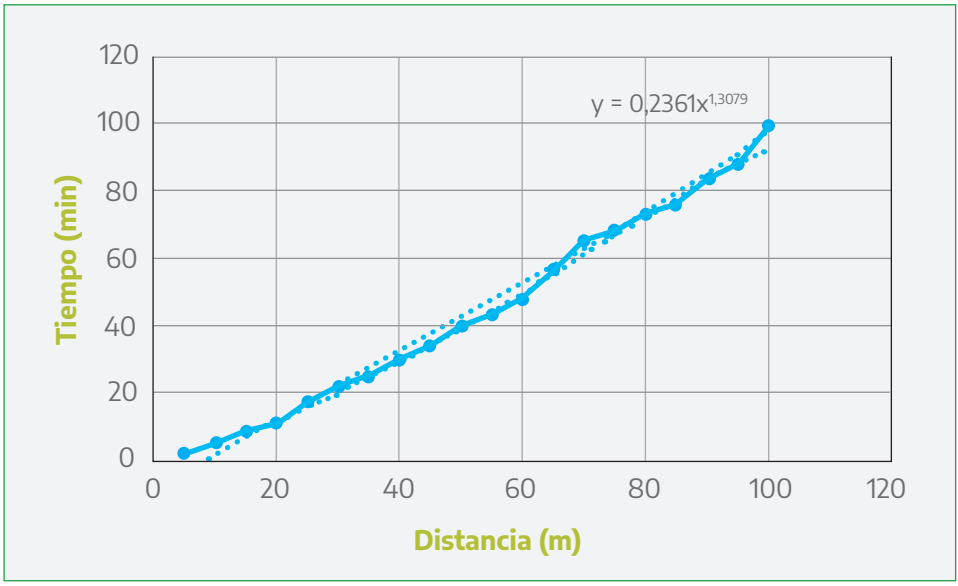


Figura 3.9. Representación de avance de agua en un surco.

Graficar, **el avance o distancia** en eje X y **volumen infiltrado** en eje Y. Ajuste la curva y determine las constantes C y W, que corresponden al valor de volumen infiltrado a distancia unitaria y la pendiente respectivamente (Figura 3.10).

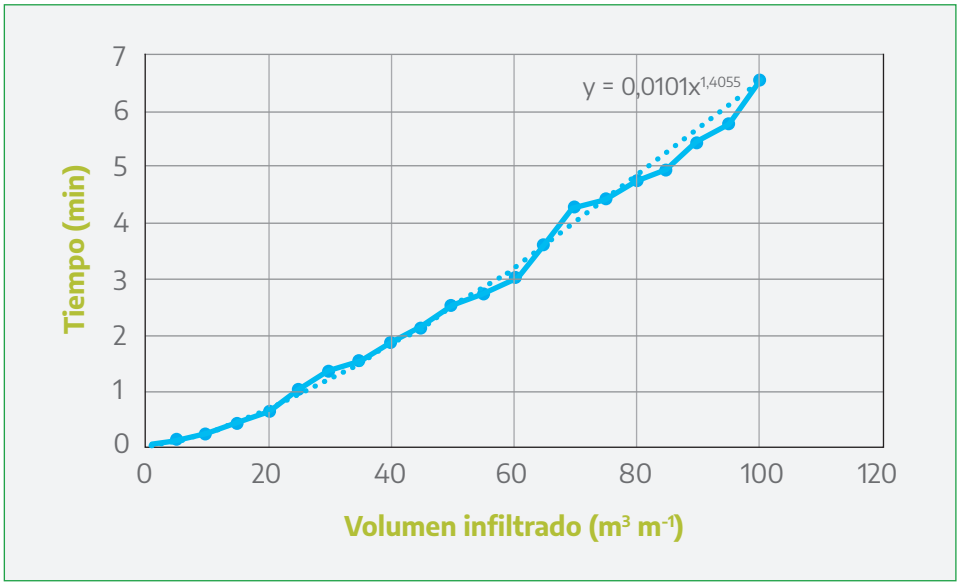


Figura 3.10. Representación de volumen infiltrado en un surco.

De la Figura 3.9 obtenemos que el avance es:

$$t = C \bullet X^{d}$$

Donde:

X = Distancia.

t = Tiempo.

Calcular la pendiente n de la ecuación de Velocidad de Infiltración utilizando la ecuación :

$$n = \left(\frac{(w - 1)}{d}\right) - 1$$

Calcular la constante K de la ecuación de Velocidad de Infiltración mediante la ecuación :

$$K = \frac{(z\left(b+1\left(d(b+1)+1\right)\right))}{w(b+1)}$$

$$VI = K \bullet T^{-n}$$

Integrando, obtener la ecuación de infiltración acumulada.

$$Iac = \frac{K}{(-n+1)} T^{-n+1}$$

$$Iac = A \bullet T^{B}$$

A en m^3/min^{-1} por metro lineal de surco

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 04

Nivelación de suelos para riego por surcos

Los métodos de riego superficiales, como surco y bordes, requieren que el sector a regar sea homogéneo; tenga pendiente constante y adecuada al tipo de suelo, con el fin de permitir un flujo no erosivo y un riego uniforme.

El proceso de modificar la superficie del terreno se describe por la variada terminología. Para situaciones que requieren de movimiento de suelo de gran envergadura se denomina comúnmente nivelación de suelos. El afinamiento menor que corresponde a las irregularidades del terreno se refiere a emparejamiento de suelos.

La nivelación de suelos es una práctica que por lo general implica un costo importante, además, de que un porcentaje significativo del área sufre un deterioro de su estructura y queda en condiciones inadecuadas de fertilidad por un tiempo.

La nivelación de suelos permite al agricultor la capacidad de utilizar los recursos de agua, suelo, energía y mano de obra en forma más efectiva. Este proceso es comparable al requerido para diseñar los laterales en riego presurizado, cuando se selecciona el diámetro; de modo tal, que la variación de presión y descarga estén enmarcados dentro de ciertos límites.

4.1 ANTECEDENTES GENERALES

La nivelación de suelos es una de las operaciones más intensivas y destructivas del suelo que es posible aplicar en un predio. Cambios topográficos de gran envergadura reducen por lo general la producción de los cultivos, si no se considera un plan especial de atención a aquellos sectores de corte, a través de una fertilización diferencial y la incorporación de materia or-

gánica o el almacenamiento momentáneo de los primeros 15 cm de suelo, para reincorporarlos nuevamente al área donde se produjo el corte.

El proceso de nivelación debe prestar una especial atención a los sectores de corte, ya que se produce un deterioro del suelo que afecta los niveles de producción que en ciertas ocasiones no se justifica cosechar por un período de dos o tres años.

La nivelación de suelos no deberá realizarse sin antes establecer: (1) la aptitud del suelo para un riego superficial, (ii) la climatología del área, (iii) los posibles métodos a emplear y (iv) el costo de la nivelación para los diferentes métodos de riego.

Existen indudablemente un sinnúmero de condiciones en las que el riego superficial resulta impracticable. Entre las que tenemos: (i) suelos muy permeables, (ii) suelos muy delgados, (iii) pendientes excesivas, (v) topografía muy irregular, (vi) suelos con problemas de drenaje y (vi) baja disponibilidad de agua.

4.2 PREPARACIÓN PARA LA NIVELACIÓN

Conocida la factibilidad del proyecto, se debe preparar el suelo para la nivelación.
Las etapas recomendables se explican a continuación:

• Limpieza de malezas
Antes de nivelar se debe sacar del terreno basuras, segar el pasto y desmontar arbustos. Es importante mencionar que no es conveniente realizar ninguna operación que suelte el suelo porque dificulta el levantamiento topográfico.

• Estacado
Con el fin de establecer referencias de nivelación y determinar las cotas de proyectos, se realiza un estacado regular. El cuadriculado puede ser de 10 • 10; 20 • 20; 30 • 30 m. Su elección dependerá de la topografía del terreno y de la experiencia del operador de la maquinaria.

• Levantamiento planialtimétrico
Es necesario realizar un levantamiento topográfico con el fin de sentar las bases para poder hacer la planeación del sistema de riego y el trazado de las curvas de nivel. Para ello se usa

el estacado anterior. Actualmente, se puede extraer información topográfica mediante imágenes obtenidas desde drones (apoyados en sistemas RTK) que, una vez georeferenciadas y procesadas se puede obtener un plano a curvas de nivel en formato digital.

• Plano a curva de nivel

Tomando como base el levantamiento topográfico se confecciona un plano a curvas de nivel que nos permitirá tener una visión preliminar del área a nivelar.

• Sectorización por área

En base al plano de curvas de nivel es factible dividir el área del proyecto de acuerdo a su pendiente, como se aprecia en la Figura 4.1. esto reducirá en gran medida un movimiento de tierra excesivo.

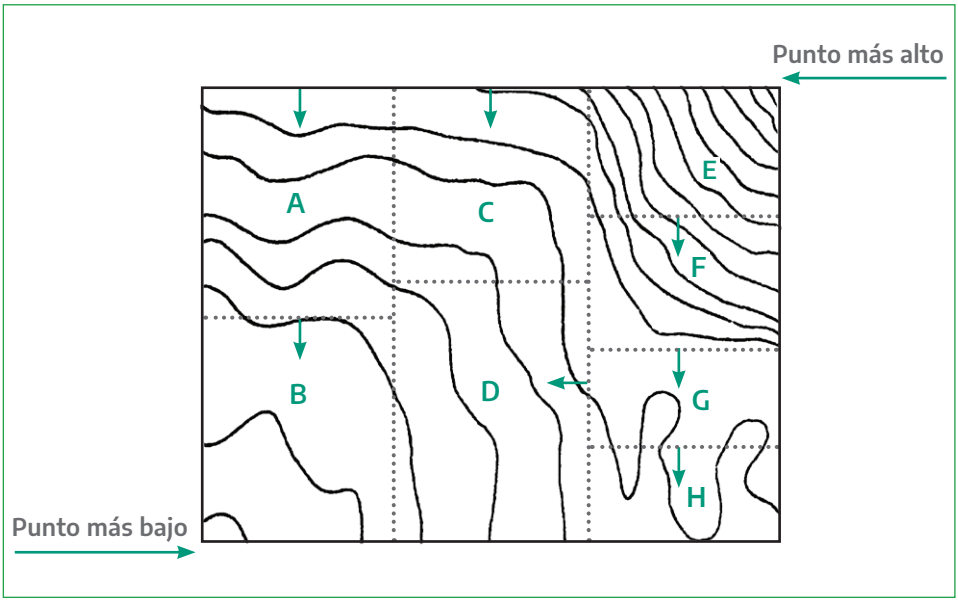


Figura 4.1. División de un campo en parcelas de acuerdo con las irregularidades de la topografía.

4.3 MÉTODOS PARA DETERMINAR LA NIVELACIÓN

4.3.1 Mínimos cuadrados y Perfiles Promedios

El método de los mínimos cuadrados es un procedimiento estadístico que permite obtener el mejor ajuste para un número de puntos. A través de los mínimos cuadrados y los perfiles promedios, es posible determinar el perfil promedio en el sentido de ambas coordenadas (x e y) y no un ajuste a las elevaciones del plano. El procedimiento es fácil de realizar, es práctico y probablemente el método más ampliamente utilizando en nivelación de suelos.

Para utilizar el método de los mínimos cuadrados y perfiles promedios, es necesario, una vez que ya se ha realizado la fase de preparación, efectuar una serie de etapas que se describen a continuación:

a) Suma de elevaciones. Sumar las elevaciones a través de cada línea y cada columna.

b) Localización de (Ce) y determinar su elevación. La localización del "Ce" es el promedio de las distancias desde el punto de referencia (P.R.) sobre las coordenadas x e y.

$$X_{ce} = \frac{1 + 2 + 3 + \ldots + n}{n} \quad [4.1]$$

$$Y_{ce} = \frac{1 + 2 + 3 + \ldots + n}{n} \quad [4.2]$$

En terrenos rectangulares se localizan en la intersección de sus diagonales; en uno triangular estará en las líneas que se trazan desde sus vértices hasta la mitad de sus lados opuestos a cada uno. Cuando un terreno es irregular, puede dividirse en triángulos y rectángulos (Figura 4.2 o como se muestra en la Figura 4.3).

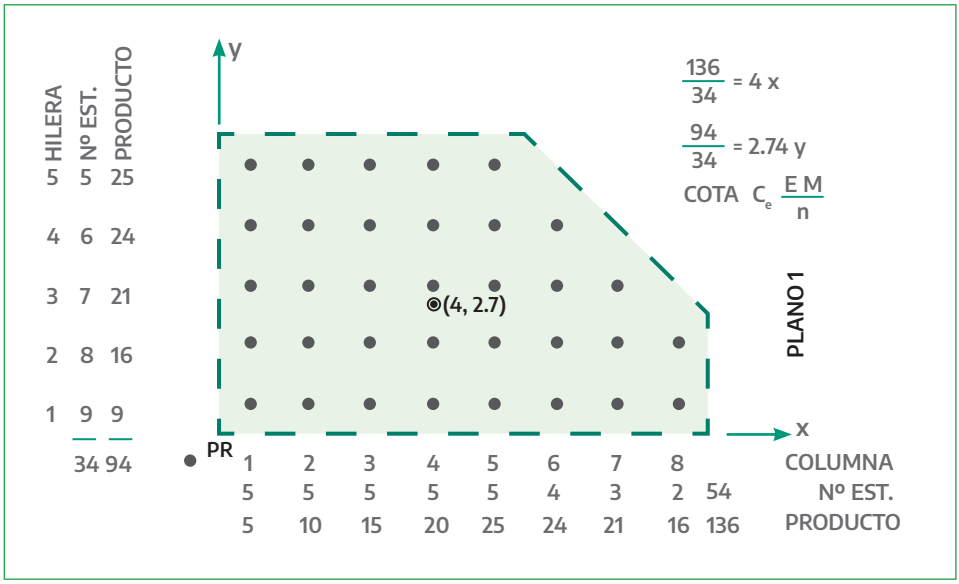


Figura 4.2. Ubicación del centroide.

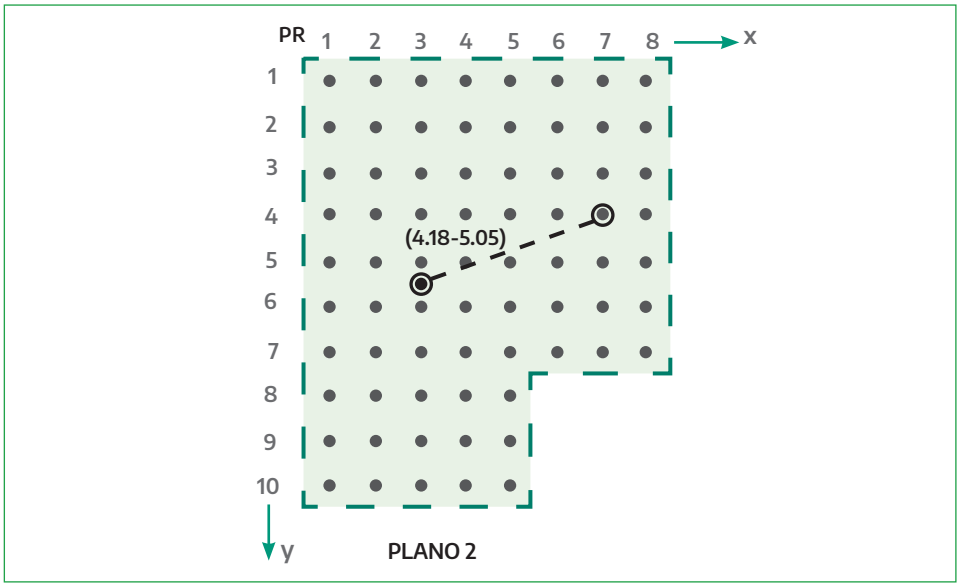


Figura 4.3. Ubicación del centroide.

Análisis para la determinación del centroide en el área de la Figura 4.3

Coordenadas centroide de ambas áreas

$$XC_1 = \frac{1 + 2 + 3 + 4 + 5}{5} = 3 \qquad YC_1 = \frac{1 + 2 + 3 + \ldots + 10}{10} = 5.5$$

$$XC_2 = \frac{1 + 2 + 3}{3} = 2 \qquad YC_2 = \frac{1 + 2 + 3 + \ldots + 7}{7} = 4$$

Ubicación centroide general del área total a nivelar

$$C_{ct} = \frac{(Dist\ del\ PR\ al\ Centr \cdot A1) + (Dist\ del\ PR\ al\ Centr \cdot A2)}{Area\ total}$$

$$C_{ct} = \frac{(5.5 \cdot 200) + (4 \cdot 84)}{284} = 5.05\ en\ Y \qquad C_{ct} = \frac{(3 \cdot 200) + (7 \cdot 84)}{284} = 4.18\ en\ X$$

La elevación del centroide se determina sumando todas las cotas y dividiéndola por el número de puntos.

Cota centroide donde *Ci* es la cota de cada punto i.

$$Centroide = \frac{\sum_{i-1}^{n} Ci}{N} \qquad [4.3]$$

c) Determinar gradientes. Determinar las inclinaciones de las líneas que tiene mejor ajuste a los perfiles promedios en las direcciones de las dos coordenadas.

De acuerdo con el método de los mínimos cuadrados, la inclinación de la línea que mejor se ajusta a los puntos en cada uno de estos dos perfiles:

$$G = \frac{(\sum S_i H_i) - \frac{(\sum S_i)(\sum H_i)}{n}}{\sum S_i^2 - \frac{(\sum S_i)^2}{n}} \quad [4.4]$$

Donde:

G = Pendiente del terreno (m m^{-1}).
Hi = Elevación del punto (m).
Si = Distancia de las estaciones (m).
i = Punto.

En la Tabla 4.1 se entregan algunos valores para facilitar el cálculo.

Tabla 4.1. Valores de parámetros de elevación.

n	$\frac{\sum S}{n}$		n	$\frac{\sum S}{n}$	
2	1.5	0.5	15	8.0	280.0
3	2.0	2.0	16	8.5	340.0
4	2.5	5.0	17	9.0	408.0
5	3.0	10.0	18	9.5	484.5
6	3.5	17.5	19	10.0	570.0
7	4.0	28.0	20	10.5	665.0
8	4.5	42.0	21	11.0	770.0
9	5.0	60.0	22	11.5	885.5
10	5.5	82.5	23	12.0	1012.0
11	6.0	110.0	24	12.5	1150.0
12	6.5	143.0	25	13.0	1300.0
13	7.0	182.0	26	13.5	1462.5
14	7.5	227.5			

También se puede hacer notar que las gradientes "G" pueden ser determinadas por mínimos cuadrados, ajustando las líneas tanto como se pueda por simple inspección a cada uno de los perfiles promedios como los de las figuras 4.4 y 4.5.

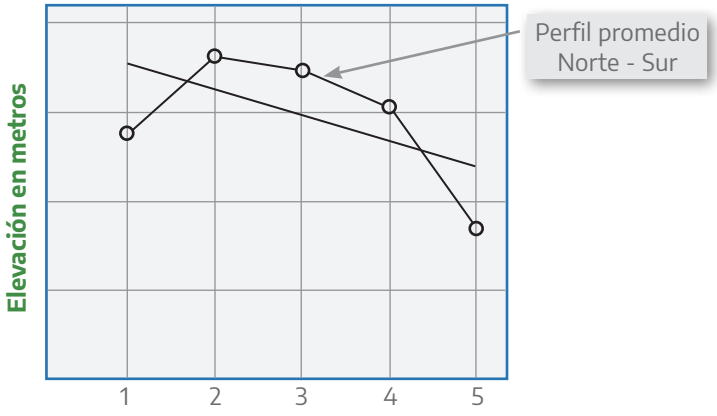


Figura 4.4. Distancia en estaciones desde el punto de origen.

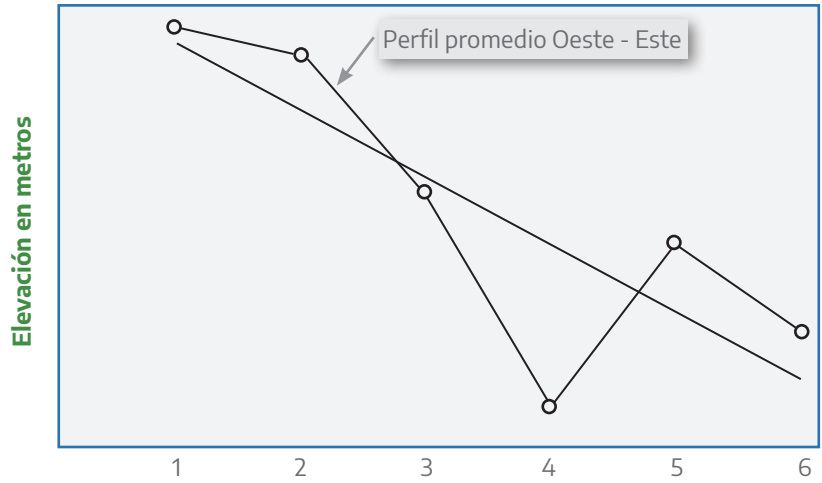


Figura 4.5. Perfil promedio de 0 a E y de N a S.

d) Cota punto de referencia. Usando las gradientes "G" y la elevación del centroide podemos conocer la cota de punto de referencia a través de la relación:

$$Ce = PR + (G_x)\ (X_{ce}) + (G_y)\ (Y_{ce}) \quad [4.5]$$

e) Cotas de proyecto. Finalmente, la nueva altura de cada punto se puede obtener desde la relación:

$$H_i = PR + (G_x)\ (X) + (G_y)\ (Y) \quad [4.6]$$

Si los cálculos se realizan con una precisión de tres cifras decimales, el plano resultante requerirá exactamente la misma cantidad de cortes que de rellenos y la cantidad de tierra removida será la mínima.

4.3.2 Métodos de las áreas bases

Este método se basa, al igual que el anterior, en el criterio del mínimo movimiento de suelo, a través de un procedimiento estadístico, dando una ponderación al área de acción de cada punto.

En esta técnica la elevación de un punto determinado, cuyas coordenadas básicas x e y, se determina con la relación siguiente:

$$EL\ (X, Y) = AX + BY + C \quad [4.7]$$

Donde:

EL = Elevación del punto con coordenadas X e Y.
A y B = Coeficientes de regresión.
C = Elevación del punto de origen.

La determinación de *A*, *B* y *C* se establece a través de cuatro etapas:

a) Elevación promedio ponderada. La determinación de la elevación promedio ponderado en ambas direcciones del área a nivelar, permite ajustar aquellos puntos ubicados en los sectores límites que pueden representar áreas mayores o menores que aquellas establecidas para el cuadriculado estándar, debido a las irregularidades en la forma del potrero. El factor de ponderación se define como la relación entre el área del punto y el área estándar.

$$P_{ij} = \frac{A_{ij}}{A_s} \qquad [4.8]$$

Donde:

P_{ij} = Factor de ponderación de un punto identificado por *i* y *j*.
A_{ij} = Área del punto *i* y *j*.
As = Área estándar.

Utilizando dicha ecuación, la elevación promedio de la línea i, EL_i, será:

$$EL_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_{ij}\, EL_{ij}}{\sum_{j=1}^{n} P_{ij}} \qquad [4.9]$$

Donde:

n = Número de columnas en la hilera.
EL_{ij} = Elevación del punto *ij* establecida desde los datos de terreno.

Una expresión similar se puede obtener para determinar la elevación promedio de las columnas *j*, EL_j:

$$EL_i = \frac{\sum_{i=1}^{m} P_{ij}\, EL_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} P_{ij}} \qquad [4.10]$$

Donde:

m = Número de hileras en la columna.

b) Localización del Centroide. Para localizar el centroide debemos establecer el origen en forma imaginaria a una distancia estándar desde la primera estaca en ambas direcciones (Como se muestran los PR en las figuras 4.2 y 4.3). La distancia desde el origen al centroide en la dirección *X* se determina que:

$$X = \frac{\sum_{j=1}^{n} P_j\, X_j}{\sum_{j=1}^{n} P_j} \qquad [4.11]$$

Donde:

X = Distancia desde el origen al centroide en el sentido *X*.
X_j = Distancia desde el origen a la línea *J*, y.

$$P_j = \sum_{i=1}^{m} P_{ij} \qquad [4.12]$$

en forma similar:

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^{m} P_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} P_i} \qquad [4.13]$$

Donde:

Y = Distancia desde el origen al centroide en el sentido *Y*.
Y_i = Distancia desde el origen a la columna *i*.

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} P_{ij} \qquad [4.14]$$

c) Gradiente en ambas direcciones. La pendiente o gradiente de la línea que permite un mejor ajuste para las elevaciones promedios ponderadas en la dirección X (EL_j) es A y para Y (EL_i) es B determinado por:

$$A = \frac{\sum_{j=1}^{n} X_j \, EL_j \left[\frac{(\sum_{j=1}^{n} X_j)(\sum_{j=1}^{n} EL_j)}{n} \right]}{\sum_{j=1}^{n} X_j^2 - \frac{(\sum_{j=1}^{n} X_j)^2}{n}} \qquad [4.15]$$

$$B = \frac{\sum_{j=1}^{m} Y_i \, EL_i \left[\frac{(\sum_{i=1}^{m} Y_i)(\sum_{i=1}^{m} EL_i)}{m} \right]}{\sum_{i=1}^{m} Y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^{m} Y_i)^2}{m}} \qquad [4.16]$$

c) Determinación de la elevación de proyecto del punto de origen C y de los puntos del plano.

La elevación promedio del área que será la del centroide, se puede determinar sumando EL_i o EL_j, dividiéndola por su correspondiente número de hileras o columnas; de esta manera el valor de la elevación de proyecto del punto de origen será:

$$C = EL_c - AX_c - BY_c \qquad [4.17]$$

Donde:

EL_c = Elevación del centroide.

La determinación de la cota de proyecto de cada punto se determina entonces por la relación que describimos al inicio:

$$EL\ (X, Y) = AX + BY + C \qquad [4.18]$$

4.3.3 Método del perfil

Tiene ese nombre debido a que el proyectista trabaja con perfiles de las líneas de la cuadrícula en lugar de hacerlo con cotas marcadas en un plano.

Existen muchas variaciones en el método del perfil, pero esencialmente es un método de tanteos para ajustar grados de pendiente sobre perfiles trazados, hasta encontrar el criterio de riego obteniendo la compensación del movimiento de tierras.

4.3.4 Métodos de comprobación de proyecto

Es un método similar al de perfil en lo que se refiere a que está basado en tanteo.
Es un método que se adapta bastante bien a suelos de topografía ondulada.

Los datos del levantamiento se trazan en cuadrículas y se analizan las limitaciones en ambas direcciones. Por tanto, se seleccionan las cotas del proyecto, las cuales deben quedar dentro de las limitaciones impuestas. Al seleccionar las cotas, el ingeniero debe considerar simultáneamente las pendientes longitudinal y transversal, la compensación en el movimiento de tierras y la distancia de acarreo.

4.3.5 Método de rectificación de las curvas de nivel

Este método básicamente consiste en un ajuste, por tanteo de las curvas de nivel sobre el plano de proyecto. Las excavaciones y rellenos de determinan comparando las curvas de nivel original y las de proyecto.

Esta metodología se hace conveniente en aquellos suelos de pendientes transversal uniforme y para condiciones en que la nivelación se lleva a cabo en plazo determinado y las estacas no pueden conservarse en terreno.

Es también bastante útil para nivelar terrenos que se regarán por el método de “regueras a curvas de nivel”.

La necesidad básica en este sistema es contar con un plano acotado del área que se desea nivelar. Esto no necesariamente tiene que haber sido hecho por medio de un levantamiento en cuadrículas, pero sí cada punto debe ser fácilmente localizable en el plano.

4.4 CÁLCULOS DEL MOVIMIENTO DE TIERRA

Un método preciso para calcular el volumen de movimiento de tierra se basa en la fórmula del prisma:

$$V = \frac{L}{6}\ (A_1 + A_m + A_2) \quad [4.19]$$

Donde:

V = Volumen (m^3).
L = Distancia perpendicular entre las bases (m).
A_1 = Superficie de una de las bases (m^2).
A_2 = Superficie de la otra base (m^2).
A_m = Superficie en la sección media (m^2).

Un método menos preciso, pero a la vez menos laborioso, es el de los cuatro vértices:

$$V_c = \frac{L^2 \cdot H_c^2}{4(H_c + H_r)} \qquad [4.20]$$

$$V_r = \frac{L^2 \cdot H_r^2}{4(H_c + H_r)} \qquad [4.21]$$

Donde:

V_c = Volumen de corte (m^2).
V_r = Volumen de relleno (m^3).
L = Espaciamiento de la cuadrícula (m).
H_c = Suma de corte en los cuatro vértices (m).
H_r = Suma de relleno en los cuatro vértices (m).

4.5 AJUSTE DE CORTE Y RELLENO

En el proyecto de nivelación de suelos, es esencial hacer los cortes necesarios, con el fin de compensar los rellenos proyectados. Cuando la excavación suple las necesidades de relleno y no se requiere de préstamos o sobrantes, se dice que existe una compensación en el trabajo de movimiento de tierra.

Es necesario, en la mayoría de las operaciones de nivelación, tener una relación de corte y relleno mayor que la unidad. Razones específicas no están bien identificadas, pero la compactación provocada en las áreas de relleno por la maquinaria es citada como un factor importante. Sin embargo, los sistemas más modernos de nivelación (Sistema Láser), donde la compactación es mínima, se requiere de una relación de corte y relleno mayor que la unidad. Consecuente con lo anterior, se podría concluir que el proceso de disturbar el suelo reduce su densidad, contrariamente a lo que uno podría esperar.

La selección de la relación (R) corte/relleno es una decisión que debe tomarse en base al tipo de suelo. Por lo general, se dice que el volumen de corte debe ser un 30% mayor al de relleno (R = 1.3).

En la Tabla 4.2 se entregan algunos valores recomendados en función de la textura y el espesor del relleno.

Tabla 4.2. Valores de la relación (R) corte/relleno según textura y espesor de relleno

Espesor relleno (cm)	Textura		
	Arenoso	Franco	Arcilloso
0-50	1.15 – 1.20	1.20 – 1.25	1.30 – 1.40
50-100	1.20 – 1.30	1.25 – 1.35	1.40 – 1.50

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 05

Hidráulica del riego por surcos

5.1 FORMA DE SURCO

La hidráulica de flujo de cualquier fluido se modifica por la forma del canal, en este caso del surco. Para proporcionar una mejor comprensión de los fenómenos de flujo en el riego por surco, se deben comprender las relaciones entre el caudal, la velocidad del flujo, la pendiente, la forma del surco, las tasas de infiltración, el radio hidráulico y la rugosidad de Manning (Mostafazadefard, 1982).

Las ecuaciones de geometría del surco que relacionan la profundidad con el área de la sección transversal, el perímetro mojado, el ancho superior y el radio hidráulico, se puede expresar como funciones de tipo potencial (Mostafazadefar, 1982; Brown-Manrique *et al.*, 2019).

Para poder determinar la geometría del surco se pueden utilizar diferentes técnicas como pintar el contorno del surco (Figura 5.1), utilizar un perfilómetro (Figura 5.2) o utilizar un travesaño de referencia (Figura 5.3).

Figura 5.1. Técnica para determinar la geometría del surco pintando el contorno de surco. Fuente: Holzapfel (2020b).

Figura 5.2. Técnica del perfilómetro para determinar la geometría del surco. Fuente: Holzapfel (2020b).

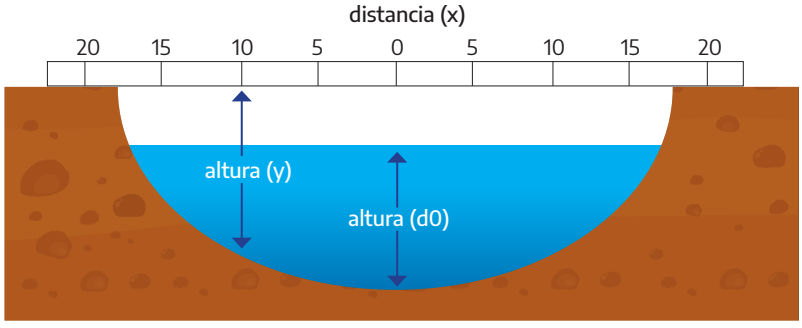


Figura 5.3. Técnica del travesaño de referencia para determinar la geometría del surco. Fuente: Holzapfel (2020b).

Para obtener los parámetros hidráulicos de la forma de surco, es necesario conocer la geometría de éste, los cuales al graficarlos por lo general tienen una forma parabólica. Si bien pueden existir algunos puntos que no sigan esta forma, es posible que se deban a imperfecciones en la sección medida. Se graficaron los puntos obtenidos considerando como referencia o distancia cero el centro del surco, las dos medidas hacia ambos lados fueron graficadas en un solo sentido tal como se muestra en la Figura 5.4.

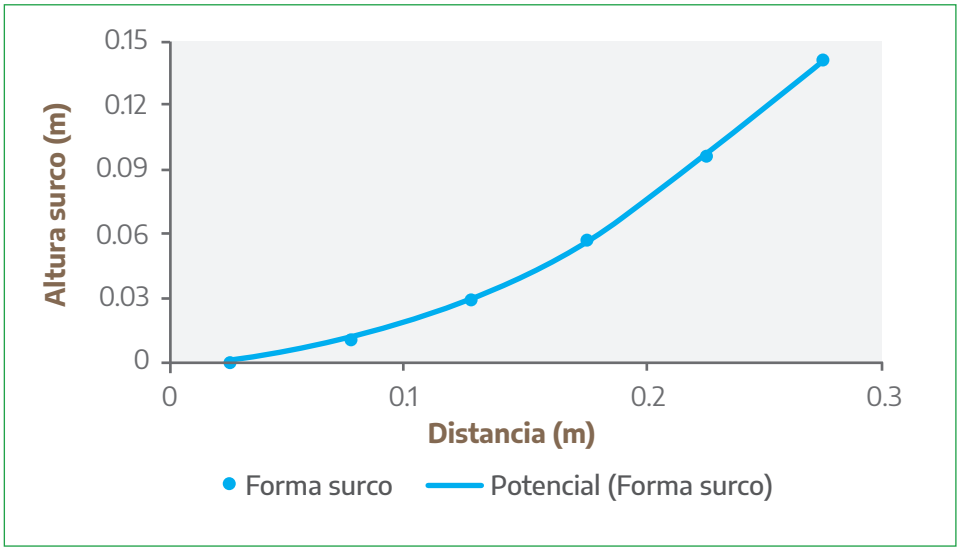


Figura 5.4. Ejemplo de la forma del surco considerando los antecedentes de ambos lados desde el centro. Fuente: Holzapfel (2020b).

De esta forma se pudo establecer una representación de tipo potencial, tal como lo menciona Brown-Manriquez *et al.* (2019), Mostafazadefard (1982), Karmeli (1978). Este procedimiento fue desarrollado por Holzapfel (2020b), el cual se muestra a continuación:

$$y = a\,x^{b} \qquad [5.1]$$

Pero para integrar el área bajo la curva y obtener el área de flujo la variable dependiente debe ser *x*, de esta manera se tiene:

$$x = \left[\frac{1}{a}\right]^{\frac{1}{b}} y^{\frac{1}{b}} \qquad [5.2]$$

De la Ecuación 5.2 se puede decir que:

$$c = \left[\frac{1}{a}\right]^{\frac{1}{b}} \qquad [5.3]$$

$$d = \frac{1}{b} \qquad [5.4]$$

Entonces la ecuación resultante queda expresada como:

$$x = c\, y^{d} \qquad [5.5]$$

Donde:

x = Distancia desde el punto de referencia (m).
a, b, c, d = Constantes empíricas.
y = Altura del surco (m).

Al considerar ambos lados del surco se obtiene que:

$$B = 2c\, y^{d} \qquad [5.6]$$

Por lo tanto, el área bajo la curva será:

$$A = 2\int_0^y x\,dy = 2\int_0^y c y^{d}\,dy \qquad [5.7]$$

Resolviendo la integral, la ecuación resultante que representa al área de la sección transversal del surco es:

$$A = \frac{2c}{d+1}\, y^{d+1} \qquad [5.8]$$

Al considerar que:

$$E_1 = \frac{2c}{d+1} \qquad [5.9]$$

$$E_2 = d+1 \qquad [5.10]$$

Entonces la Ecuación 5.8 que expresa el área de la sección transversal del surco puede ser descrita como:

$$A = E_1\, y^{E_2} \qquad [5.11]$$

Donde:

E_1 y E_2 factores de forma del surco (adimensionales).

Por otro lado, el perímetro mojado (WP) tiene la misma tendencia de tipo potencial y se puede expresar como:

$$WP = G_1\, y^{G_2} \qquad [5.12]$$

Donde:

WP = Perímetro mojado (m).
G1, G2 = Constantes empíricas.

Además, se ha establecido que el perímetro mojado se puede determinar como

$$WP = \sqrt{(2c\, y^{d})^{2} + y^{2}} \qquad [5.13]$$

Usando la relación hidráulica de canales de la ecuación de Manning, separando sus términos geométricos y elevando al cuadrado se obtiene la siguiente relación hidráulica de forma:

$$\frac{Q^2\, n^2}{S} = A^2\, R^{4/3} \qquad [5.14]$$

Donde:

- Q = Caudal de entrada ($m^3\ s^{-1}$).
- n = Coeficiente de rugosidad de Manning.
- S = Pendiente del surco ($m\ m^{-1}$).
- A = Área de flujo (m^2).
- R = Radio hidráulico (m).

De esta manera el factor de forma de surco queda representado como:

$$A^2\, R^{4/3} = F_1\, A^{F_2} \qquad [5.15]$$

Donde:

- F1 y F2 = Parámetros hidráulicos de forma de surco (adimensionales).

Los valores de F1 y F2 se obtienen mediante las siguientes Ecuaciones:

$$F_1 = \frac{E_1 \frac{10}{3} - F_2}{G_1 \frac{4}{3}} \qquad [5.16]$$

$$F_2 = \frac{2E_2 + \frac{4}{3} E_2 - \frac{4}{3} G_2}{E_2} \qquad [5.17]$$

5.1.1 Obtención del área de flujo en la cabecera del surco

En cuanto a este punto se calculó el área de flujo a partir de la relación caudal-área presente en el desarrollo de la ecuación de Manning. Al reemplazar la Ecuación 5.15 en Ecuación 5.14, se obtiene la relación entre el flujo y el área por medio de los parámetros hidráulicos de forma de surco, tal como lo presenta Schilardi (2010), para posteriormente despejar el área (Ecuación 5.18).

$$A_o = \left(\frac{Q^2\, n^2}{S\, F_1}\right)^{\frac{1}{F_2}} \qquad [5.18]$$

Donde:

- A_o = Área de la sección transversal en la cabecera del surco (m^2).

5.2 HIDRÁULICA DE LA FASE DE AVANCE

El flujo a través de la superficie del suelo es espacialmente variado e inestable o no uniforme. El caudal a un punto específico cambia con el tiempo debido a que el proceso de infiltración del suelo varía con el tiempo. En el punto del frente de avance del agua, la profundidad cambia con tiempo y espacio. Las ecuaciones que describen la continuidad de la masa, el momento y/o la energía para las condiciones de flujo descritas ha sido ampliamente desarrollada en la literatura (Chow, 1959; Cunge and Woolhiser, 1975). Dicha ecuación es la de Saint-Venant en la que se asume que el canal es prismático y que la pendiente es muy pequeña; condiciones que se tiene en el riego por surcos.

5.2.1 Ecuación de Saint-Venant

La ecuación de Saint-Venant se compone de dos principios físicos: de la ecuación de conservación de la masa,

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} + Ix = 0 \qquad [5.19]$$

y la ecuación de energía, que se basa en la segunda ley de Newton donde fuerza igual a masa por aceleración. Considera la fuerza de peso, fuerzas de presión, fuerzas de roce y el momento inestable dando la ecuación

$$\frac{\partial V}{g\partial t} + \frac{V\partial V}{g\partial x} + \frac{\partial y}{\partial x} = So - Sy + \frac{IxV}{2gA} \qquad [5.20]$$

Donde:

x = Distancia (L).
t = Tiempo (T).
Q = Descarga ($L^3\ T^{-1}$).
A = Área de la sección de flujo (L^2).
Ix = Velocidad de infiltración por unidad de surco ($L\ T^{-1}$).
g = Aceleración de gravedad ($L\ T^{-2}$).
V = Velocidad promedio en la sección de flujo ($L\ T^{-1}$).
y = Profundidad de flujo (L).
So = Pendiente del surco ($m\ m^{-1}$).
Sy = Gradiente de fricción (adimensional).

El análisis de ambas ecuaciones ha sido desarrollado sucintamente por Strelkoff (1969, 1970) y Walker y Skogerboe (1987). Los modelos hidrodinámicos consideran ambas ecuaciones en su implementación.

En general los parámetros inerciales no son importante o no tienen casi efecto en la fase de avance en surcos con pendiente inferior a 2% que es lo normal en riego por surco. Esto entrega Número de Froude con valores inferiores a 0.3, es decir un flujo Subcrítico, y las fuerzas inerciales son insignificantes.

$$Fr = \frac{Fuerzas\ de\ Inercia}{Fuerzas\ de\ Gravedad} \quad [5.21]$$

$$F_R = \frac{v}{\sqrt{g\,D_H}} \quad [5.22]$$

Al analizar el flujo tenemos para Fr >1 el régimen de flujo es supercrítico, para Fr = 1 Crítico y para Fr < 1 Subcrítico. En la Figura 5.5 se puede visualizar la energía específica de una sección de un canal con pendiente pequeña (θ≈0) y asociada al régimen de flujo el régimen de flujo y al Número de Freud y que puede ser expresada como:

$$E = y + \frac{V^2\,\alpha}{2 \bullet g} \quad [5.23]$$

donde, α = coeficiente que compensa la diferencia de velocidad de cada una de las líneas de flujo también conocido como el coeficiente de Coriolis.

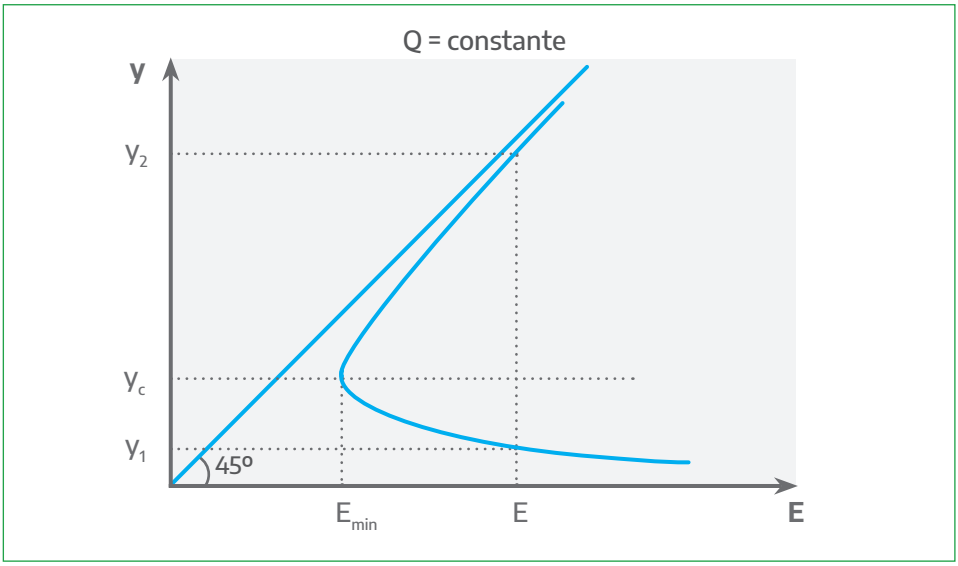


Figura 5.5. Energía especifica de un canal.

Esto permite desarrollar modelos más simples que entregan una adecuada precisión como el Cero Inercia y el Cinemático.

5.2.2 Modelo cero inercias

Bajo condiciones de muy baja velocidad normal en riego superficial, los cambios de velocidad son muy pequeños, al compararlo con las fuerzas, por ello todos los términos inerciales (aceleración) los podemos eliminar, considerando un número de Froude pequeño (Liu *et al.*, 1999). Los términos inerciales descritos son:

$$\frac{\partial V}{g\partial t}, \quad \frac{V\partial V}{g\partial x}, \quad \frac{IxV}{2gA}$$

De esta manera la Ecuación 5.20 quedaría como

$$\frac{\partial y}{\partial x} = So - Sy \qquad [5.24]$$

5.2.3 Modelo Cinemático

Variados estudios que analizan el riego superficial han descartado del todo la ecuación de momento y se asume que la sección transversal de flujo es casi constante a lo largo del surco por lo que el modelo cinemático considera que la descarga es función de la profundidad de flujo "y" y se describe como profundidad normal de flujo; así tenemos que la ecuación de Saint Venant quedaría como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \qquad [5.25]$$

$$So = Sy \qquad [5.26]$$

5.3 HIDRÁULICA DE LA FASE DE RECESO

La fase de receso comienza cuando en un sector cualquiera ha desaparecido el agua desde el surco. Desde el punto de vista hidráulico, y para una superficie relativamente lisa y de pendiente homogénea, el receso comienza por la cabecera. Además, vamos a asumir que el agua drena libremente al final del surco.

La altura de agua en la cabecera y_o o d_o es una profundidad normal al momento del corte del flujo t_{co}, esto es posible ya que un análisis hidrodinámico indica que el número de Froude es muy bajo y no hay propagación de la onda hacia abajo.

La descarga que escurre al pie del surco q_1 es menor que el caudal de entrada q_o debido al caudal que infiltra q_{in}.

Basado en lo expuesto anteriormente podemos asumir para el desarrollo del modelo de receso, y en lo expuesto por Bassett y Strelkoff (1980), vamos a establecer que:

1. La profundidad de agua al pie y_1 es constante durante el tiempo de vaciado y es función de q_1. Es decir, tendrá ese valor desde t_{co} hasta el tiempo t_R, y posteriormente comienza el receso.

2. Caudal inicial q_o y la infiltración se mantienen hasta t_R por lo que:

$$q_1 = q_0 - q_{in} \qquad [5.27]$$

$$q_{in} = I_p \cdot L \qquad [5.28]$$

3. El perfil de la superficie del agua al t_R como al t_{co} son una línea recta, asumiendo un factor de forma igual a 0.5 debido a que Froude es pequeñísimo.

Estas asunciones permiten establecer la forma de estimar el tiempo t_R en el cual la altura en la cabecera se reduce a cero y comienza el receso en el surco.

$$t_R = t_{co} + \frac{A_0 \cdot 0.8 \cdot L}{2 \cdot q_0} \qquad [5.29]$$

En la fase de receso vamos a considerar que

$$S_f = \frac{y_1}{L} \qquad [5.30]$$

Donde

y1 = Altura de agua al pie y se calcula en función de q1.

$$q_1 = q_0 - \bar{I}_P \cdot L \qquad [5.31]$$

Donde

Ip = Velocidad de infiltración promedio a lo largo del surco.

Así, $\bar{I}_p$ será:

$$\bar{I}_p = \frac{I(t_R) + I(t_R - t_f)}{2} \qquad [5.32]$$

Donde

tf = Tiempo en que el agua llega al pie del surco, o es el tiempo en que termina la fase de avance.

Ahora debemos asumir y establecer que S_f se mantiene constante durante la fase de receso y que provoca una disminución gradual de la profundi-

dad de flujo (y_1) al pie del surco. Además, asumiremos que la pendiente del suelo S_0 es lo suficientemente grande para evitar que la superficie del agua nunca se aproxime a una horizontal.

$$S_0 - S_f \geq 0 \qquad [5.33]$$

Ahora, en términos de infiltración promedio en el área inundada del sector del surco, descrita por Bassett y Strelkoff (1985), tenemos que:

$$\frac{d\left(\frac{t^2 S_f}{2}\right)}{dt} = -\bar{I}l - \frac{C\alpha}{n} S_0^{1/2} (S_f)^{5/3} \qquad [5.34]$$

El segundo término de la Ecuación 5.34 es el escurrimiento al pie del surco, bajo la idea que $y_1(t)=S_f l(t)$ es variable con el tiempo debido a la escorrentía y sin flujo de entrada, pero siempre es profundidad normal. Como se ve en la ecuación se utilizó la ecuación de Manning y debemos recordar que utiliza metros cúbicos y segundo en su cálculo por lo que todos los elementos de esa ecuación deben estar con esas dimensiones. Con el uso de Manning y los cambios es difícil la solución de la ecuación diferencial.

Ahora, simplificando y dividiendo la ecuación por $S_f l$ nos produce la siguiente ecuación diferencial ordinaria.

$$\frac{dl}{dt} = -\frac{\bar{I}}{S_f}(1 + Cl^{2/3}) \qquad [5.35]$$

donde,

$$C = \frac{C_u S_0^{1/2} S_f^{5/3}}{n\bar{I}} \qquad [5.36]$$

Si $\bar{I}$ promedio es considerada constante durante el receso asumiendo que el cambio de infiltración con el tiempo es prácticamente despreciable la Ecuación 5.35 anterior toma la forma siguiente con separación de variables, y la integración aparece como:

$$-\frac{S_f}{\bar{I}} \int_L^l \frac{dl}{1 + Cl^{2/3}} = \int_{t_R}^t dt \qquad [5.37]$$

Si introducimos una nueva variable:

$$p = C^{3/2} l \qquad [5.38]$$

La ecuación queda como:

$$t = t_g + \frac{S_f}{\bar{I} C^{3/2}} \left[R_{rec}(C^{3/2} L) - R_{rec}(C^{3/2} l) \right] \qquad [5.39]$$

donde el argumento:

$$S_{rec}(u) = \int_0^u \frac{d\rho}{1+\rho^{2/3}} \qquad [5.40]$$

Esta ecuación se le ha dado una solución numérica y gráfica. Sin embargo, tiene una solución racional como la que se presenta a continuación:

$$u^2 = \rho^{2/3}, \qquad u = \rho^{1/3}$$

$$u^{-1} = \rho^{1/3}$$

por tanto:

$$2udu = 2\rho^{1/3} \bullet \frac{1}{3}\rho^{-2/3}\,\partial\rho = \frac{2}{3}\rho^{-1/3}\delta\rho \qquad [5.41]$$

al considerar que:

$$u = \rho^{-1/3} \qquad du = \frac{1}{3}\rho^{-2/3}\delta\rho$$

por otro lado:

$$2u^2du = 2\rho^{2/3} \bullet \frac{1}{3}\rho^{-2/3}\partial\rho = \frac{2}{3}\delta\rho \qquad [5.42]$$

porque

$$u^2 = \rho^{2/3} \quad \text{y} \quad du = \frac{1}{3}\rho^{-2/3}\delta\rho$$

ahora

$$3u^2du = 3\rho^{2/3} \bullet \frac{1}{3}\rho^{-2/3}\,\delta\rho = \delta\rho \qquad [5.43]$$

Reemplacemos ahora los términos en la ecuación 5.40 y obtendremos

$$\int \frac{3u^2du}{1+u^2} = 3\int \frac{u^2du}{1+u^2} \qquad [5.44]$$

pero el término

$$\int \frac{u^2du}{1+u^2} = u - \int \frac{u^2du}{1+u^2} \qquad [5.45]$$

pero

$$\int \frac{du}{1+u^2} = tan^{-1}(u) \qquad [5.46]$$

reemplazamos Ecuación 5.46 en Ecuación 5.45 y tenemos que:

$$\int \frac{3u^2du}{1+u^2} = u - tan^{-1}(u) \qquad [5.47]$$

si, reemplazamos nuevamente la Ecuación 5.47 en la 5.40 tenemos finalmente que:

$$R_{rec}u = \int_0^u \frac{\delta\rho}{1+\rho^{-2/3}} = 3\rho^{1/3} - 3tan^{-1}(\rho^{-2/3}) \qquad [5.48]$$

el argumento de la tangente en radianes.

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 06

Eficiencia en riego por surcos

La calidad del riego es una medida de su desempeño. El agua aplicada durante el riego debe cumplir, entre otros, los siguientes requisitos (Holzapfel, 1984):

- Suministrar a la planta el agua requerida.
- Estar distribuida uniformemente sobre el área de riego.
- No exceder la capacidad de almacenamiento de agua del perfil del suelo para impedir la percolación profunda.
- Evitar la lixiviación del suelo más de lo requerido para prevenir la salinización
- Minimizar la erosión y el deterioro de la estructura del suelo.

En general se puede establecer que la calidad del riego es afectada por (Holzapfel, 1984):

- La velocidad de avance del frente de agua en riego superficial.
- La velocidad de infiltración del agua en el suelo.
- El caudal de entrada.
- El tiempo de riego.
- El tiempo de recesión del agua desde la superficie del suelo.
- La humedad del suelo antes del riego.
- La variabilidad estructural del suelo (distintos tipos).
- Las condiciones climáticas, especialmente en riego por aspersión.
- Presión y espaciamiento entre los aspersores o emisores en sistemas de riego presurizado.

Los parámetros seleccionados para determinar el comportamiento de un riego deben ser capaces de estimar la calidad del riego (Holzapfel, 1984). Varios parámetros que describen la calidad de aplicación del agua de los métodos de riego han sido analizados por numerosos investigadores (Karmeli *et al.,* 1978; Pushpalatha *et al.,*

2012). Sin embargo, se han encontrado problemas para evaluar efectivamente la calidad de un riego, debido a las dificultades para identificar fallas en la operación o diseño (Merriam and Keller, 1978). La calidad del riego sólo puede ser determinada usando varios modelos, pues uno solo no es capaz de entregar un análisis total de un riego (Holzapfel, 1984). Para el presente estudio analizaremos sólo algunos modelos para medir la calidad de un riego: eficiencia de aplicación del agua (EA), eficiencia de requerimiento o eficiencia de almacenamiento de agua (ER), eficiencia de distribución de requerimiento (EDR), eficiencia de distribución total (EDT), coeficiente de uniformidad de Christensen (CUC) y la eficiencia de distribución del cuarto menor (CUCM).

$$EA = \frac{\int_0^L Xdl - \int_0^{L_{ov}} Xdl + XrL_{ov}}{Fu \int_0^{t_{co}} Q_o dt} \qquad [6.1]$$

Donde:

- L = Longitud del sector a regar.
- L_{OV} = Longitud del área o sector en la cual la altura de agua infiltrada es mayor a la altura o cantidad de agua requerida previa al riego.
- Fu = Factor de conversión de unidades.
- Q_0 = Caudal de entrada.
- Xr = Altura de agua requerida.
- t_{co} = Tiempo de corte del riego.
- X = Altura o cantidad de agua infiltrada en el punto o sector.

6.1 EFICIENCIA DE APLICACIÓN

El On-Farm Irrigation Commitee of Irrigation and Drainage Division ASCE (1978) definió la eficiencia de aplicación del agua (EA) como la razón entre el volumen de agua retenida en la zona radical después del riego y el volumen total de agua aplicada en un riego (ver Figura 6.1). Su expresión matemática es:

También lo podemos expresar conceptualmente como:

$$EA = \frac{\text{Volumen de agua almacenada en la zona radical}}{\text{Volumen de agua aplicada al campo irrigado}} \cdot 100 \qquad [6.2]$$

La EA del agua describe sólo la fracción de agua aplicada almacenada dentro de la zona radical que es potencialmente accesible para el proceso de evapotranspiración. Este coeficiente no es adecuado para describir la calidad global de un riego debido a que no especifica la uniformidad de un riego, como tampoco si éste cumplió con las necesidades de la planta o cultivo.

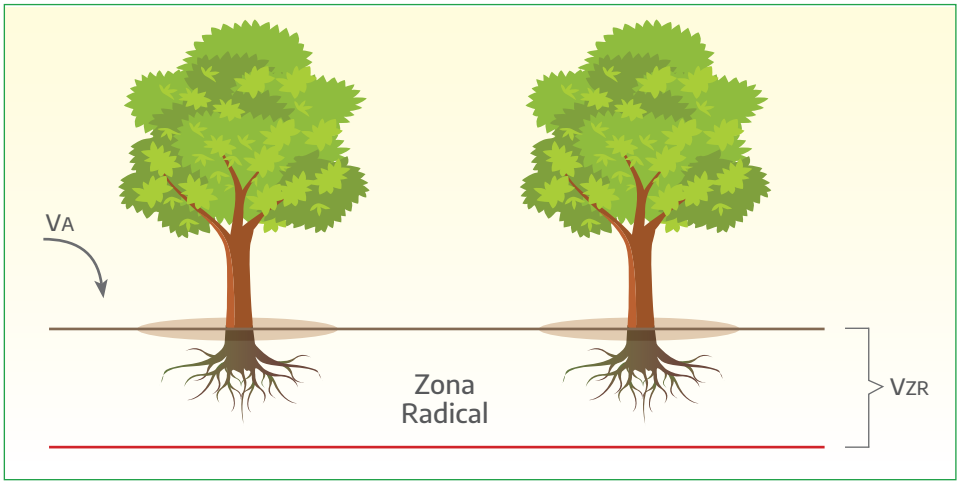


Figura 6.1. Esquema explicativo de Eficiencia de Aplicación. VA: Volumen aplicado y VZR: Volumen almacenado en la zona radical. Fuente: Holzapfel (1984).

6.2 EFICIENCIA DE REQUERIMIENTO

Hansen (1960) desarrolló tres conceptos de eficiencia para describir más adecuadamente la calidad de un riego : (1) eficiencia de requerimiento o eficiencia de almacenamiento de agua (ER), el cual está hecho para describir si el riego fue adecuado; (2) la eficiencia de distribución del agua (Ed) la cual es idéntica al concepto de coeficiente de uniformidad de Christiansen (1942), que mide la uniformidad en la distribución del agua; y (3) eficiencia de uso-consumo (Eu) el cual establece la habilidad de la planta para usar el agua almacenada. La eficiencia de requerimiento puede ser definida como:

$$ER = \frac{\int_0^L Xdl - \int_0^{L_{ov}} Xdl + XrL_{ov}}{XrL} \quad [6.3]$$

Donde:

L = Longitud del sector a regar.
L_{OV} = Longitud del área o sector en la cual la altura de agua infiltrada es mayor a la altura o cantidad de agua requerida previa al riego.
Fu = Factor de conversión de unidades.
Q_0 = Caudal de entrada.
Xr = Altura de agua requerida.
t_{co} = Tiempo de corte del riego.
X = Altura o cantidad de agua infiltrada en el punto o sector.

También lo podemos expresar conceptualmente como:

$$ER = \frac{\textit{Volumen de agua almacenada en la zona radical}}{\textit{Volumen de agua requerido}} \quad [6.4]$$

El ER es importante cuando el agua almacenada en la zona radical es insuficiente para cubrir los requerimientos del cultivo (ver Figura 6.2). Valores bajos de ER pueden deberse a situaciones de alto costo del agua, escasez de agua, conocimientos inadecuados de los requerimientos de agua del cultivo, mala distribución del agua infiltrada y factores de diseño u operación.

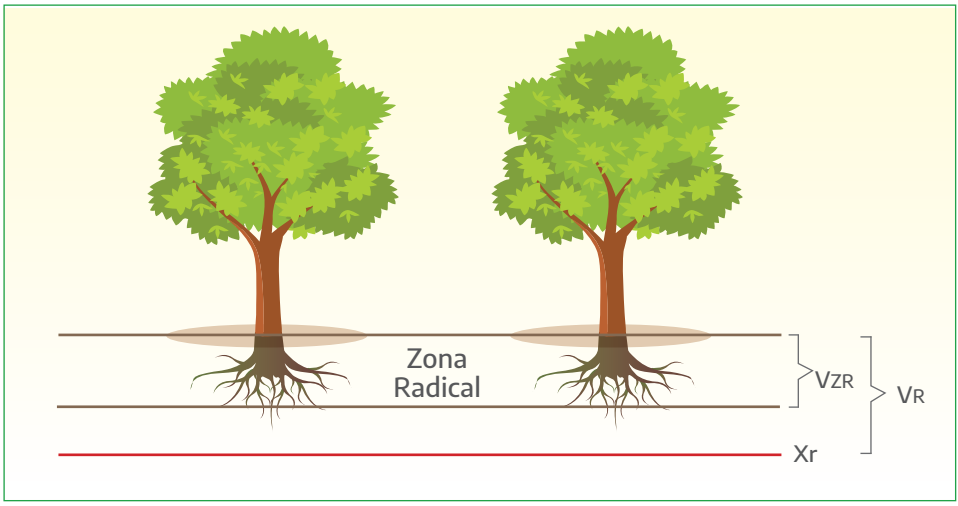


Figura 6.2. Esquema explicativo de la Eficiencia del Requerimiento. VZR: Volumen almacenado en la zona radical, VR: Volumen requerido y Xr: profundidad requerida. Fuente: Holzapfel (1984).

6.3 EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN DE REQUERIMIENTO

Holzapfel (1984), propuso los conceptos de eficiencia de distribución del déficit (EDD), eficiencia de distribución del requerimiento (EDR), que miden los efectos de la distribución del agua aplicada en relación al requerimiento de los cultivos. En el caso de EDD y EDR se asume que la producción del cultivo no es afectada seriamente por la percolación profunda.

La EDR se define como (Holzapfel 1984) :

$$EDR = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{m} \left| X_i - X_r \right|}{n \cdot X_r}\right] \cdot 100 \quad X_i \leq X_r \qquad [6.5]$$

Donde:

X_i = Altura de agua infiltrada en el punto i (mm o m).
X_r = Altura de agua requerida por el cultivo (mm o m).
m = Número de observaciones donde Xi fue menor o igual a Xr.
n = Número total de observaciones.

La EDR muestra como ha sido la distribución del agua en los puntos con déficit respecto al agua requerida (ver Figura 6.3). Su valor nos indica el porcentaje del área o superficie irrigada que ha recibido la cantidad de agua requerida por el cultivo.

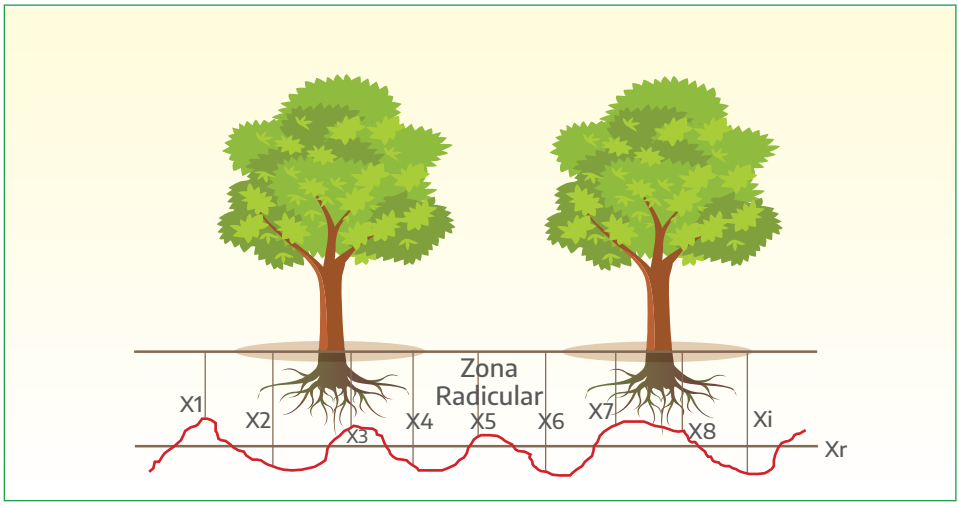


Figura 6.3. Esquema explicativo de la Eficiencia de Distribución del Requerimiento. Xr: Profundidad de agua requerida y Xi: Profundidad de agua observada en cada punto i, tal que Xi ≤ Xr. Fuente: Holzapfel (1984).

6.4 EFICIENCIA DE DISTRIBUCIÓN TOTAL

La Eficiencia de Distribución Total (EDT) describe la distribución del agua en relación al requerimiento, incorporando tanto los puntos con déficit como con exceso (Holzapfel, 1984). La eficiencia de distribución total se define como:

$$EDT = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left| X_i - X_r \right|}{n \cdot X_r}\right] \cdot 100 \qquad [6.6]$$

Donde:

X_i = Altura de agua infiltrada en el punto i (mm).
X_r = Altura de agua requerida por el cultivo (mm).
n = Número total de observaciones.

La EDT muestra como ha sido la distribución del agua en el total de los puntos respecto al agua requerida (ver Figura 6.4). Analiza la variación de la altura de agua infiltrada respecto a la altura requerida. De esta manera, cuando el riego es adecuado y se registran pequeñas variaciones de altura de agua infiltrada, el valor de EDT es alto. Por el contrario, cuando el riego es de mala calidad y se observan grandes variaciones de altura de agua infiltrada, el valor de EDT es bajo.

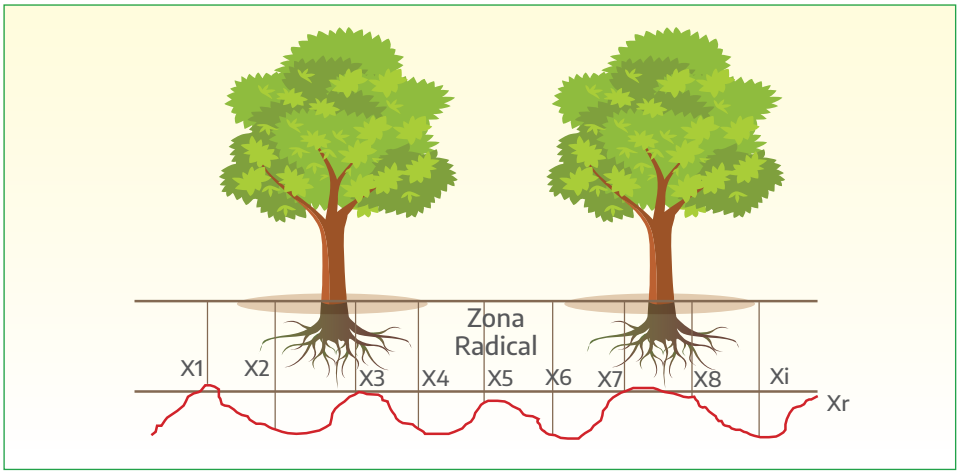


Figura 6.4. Esquema explicativo de la Eficiencia de Distribución Total. Xr: Lámina de agua requerida y Xi: Lámina de agua observada en el punto i. Fuente: Holzapfel (1984).

6.5 COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD

Los coeficientes de uniformidad (CUC) utilizados en el presente estudio fueron el coeficiente de uniformidad de Christiansen y el del Cuarto Menor.

El CUC es una representación estadística de la uniformidad del riego en relación con la media y está definida de la siguiente forma:

$$CUC(\%) = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{m} \left| X_i - \bar{X} \right|}{n \cdot \bar{X}}\right] \cdot 100 \quad [6.7]$$

Donde:

x_i = Volumen de agua infiltrado en el punto i.

$\bar{X}$ = Volumen promedio aplicado a todos los puntos evaluados.

n = Número total de puntos evaluados.

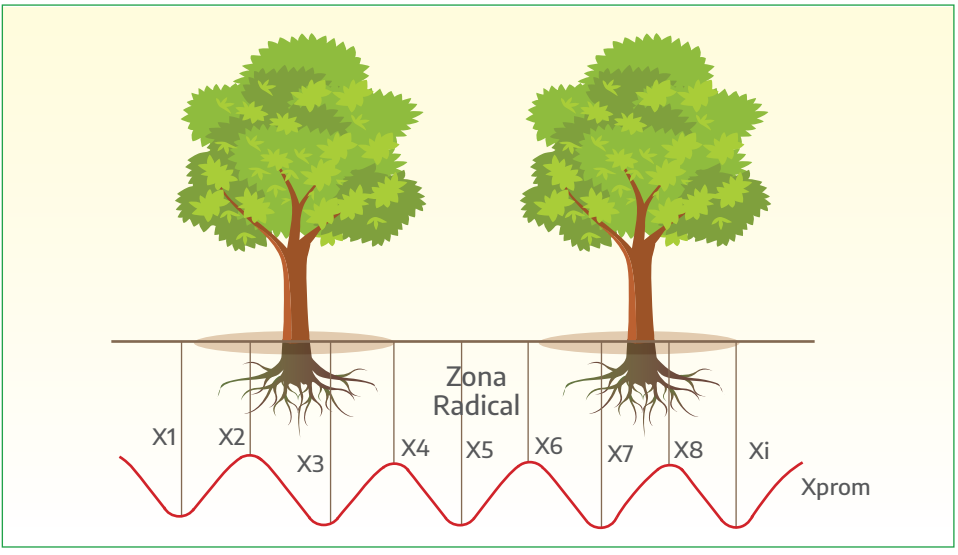


Figura 6.5. Esquema explicativo del Coeficiente de Uniformidad de Christiansen. Xi: Lámina de agua observada en el punto i y Xprom: Lámina de agua promedio. Fuente: Holzapfel (1984).

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 07

Sistemas de Aducción en riego por surcos

En riego superficial se requiere la utilización de estructuras de aducción que permitan derivar el agua a los surcos. Dichas estructuras permiten un adecuado control del caudal, uniformidad en los caudales aplicados al surco y una mejor utilización de los recursos humanos.

Entre las estructuras de aducción tenemos: (i) sifones, (ii) tubos rectos, (iii) mangas plásticas, (iv) sistema de baja presión o californiano. Todas estas aducciones requieren de cierta carga hidráulica para derivar una cierta cantidad de agua, siendo el caudal función de dicha carga y del área de flujo por donde escurrirá el agua.

7.1 SIFONES

El sifón es un tubo con una longitud que varía entre 1.0 y 2.0 m, de forma semicircular que permiten derivar el agua desde los canales a los surcos por sobre el borde del canal (Figura 7.1).

Figura 7.1. Sistema de aducción con sifones en riego por surcos.

El caudal para el caso de sifones se calcula:

$$Q = C * A * \sqrt{2\,g} \qquad [7.1]$$

Donde:

Q = Caudal ($m^3\ s^{-1}$).
A = Área del tubo (m^2).
g = Aceleración de gravedad ($m\ s^{-2}$).
h = Altura efectiva de agua (m).
C = Coeficiente de descarga (0.65 para sifones).

En la Figura 7.2, se entregan las curvas de descarga para sifones de diferentes diámetros, en función de la altura efectiva. Dicha altura efectiva se obtiene con retenciones en el canal.

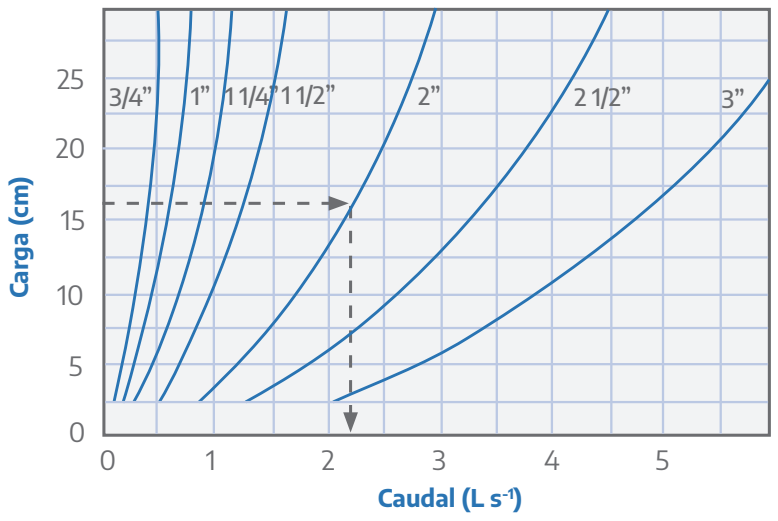


Figura 7.2. Flujo del agua a través de sifones.

7.2 TUBOS RECTOS

El tubo recto es una estructura que se emplaza en el borde del canal o reguera en forma permanente (Figura 7.3). Cada sector de tubos que funcionan a la vez tiene una retención y su número está relacionado con la disponibilidad de agua y la pendiente transversal del terreno (pendiente en el sentido de la reguera).

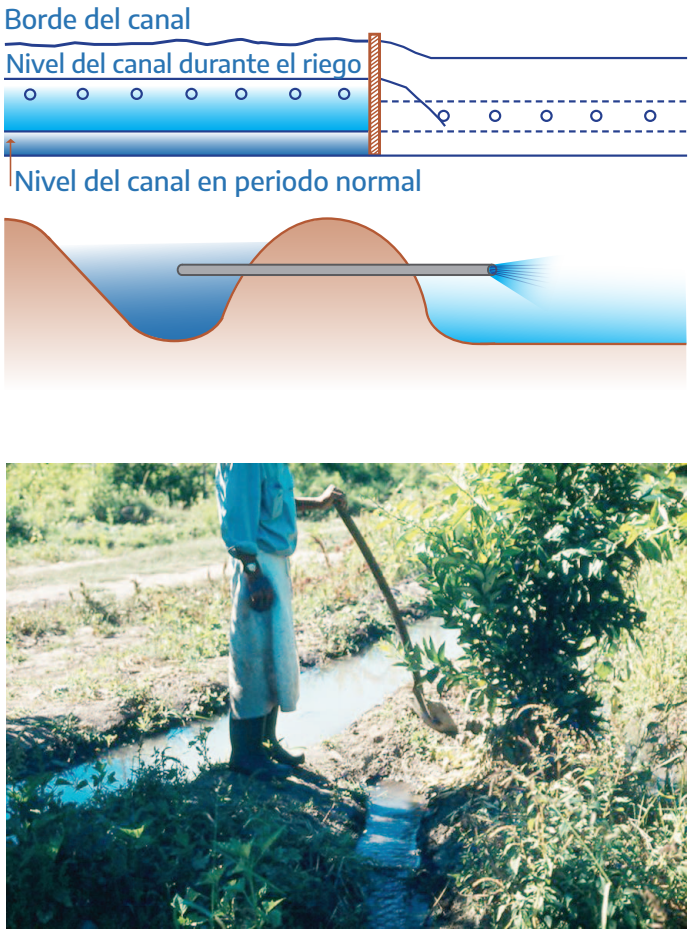


Figura 7.3. Sistema de aducción por tubos rectos.

El caudal se calcula con la misma ecuación que para sifones, variando el valor del coeficiente C = 0.78. En la Figura 7.4 se entregan las curvas de descarga versus altura efectiva.

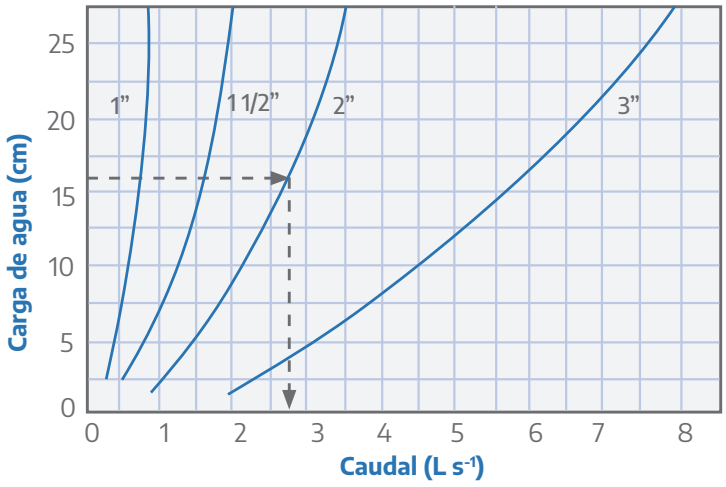


Figura 7.4. Flujo del agua a través de tubos.

7.3 MANGAS DE POLIETILENO

La manga de polietileno es una estructura a la cual se le confeccionan perforaciones, y se deriva el agua desde un canal principal o alimentador. Esta estructura para que funcione debe tener carga hidráulica en todo su recorrido, lo que obliga a que el canal alimentador esté a una cota superior al sector a regar con la manga, como se muestra en la Figura 7.5. La descarga se calcula con la ecuación:

$$Q = 0.78A\sqrt{2gh} \qquad [7.2]$$

Donde:

h = Altura efectiva de agua con el nivel del canal (m) o la estructura de compensación (Figura 7.5).

A = Área de abertura del orificio en la manga (m^2).

Las ventajas que presenta este tipo de estructuras es la mejor utilización del terreno y una menor interferencia en las labores culturales.

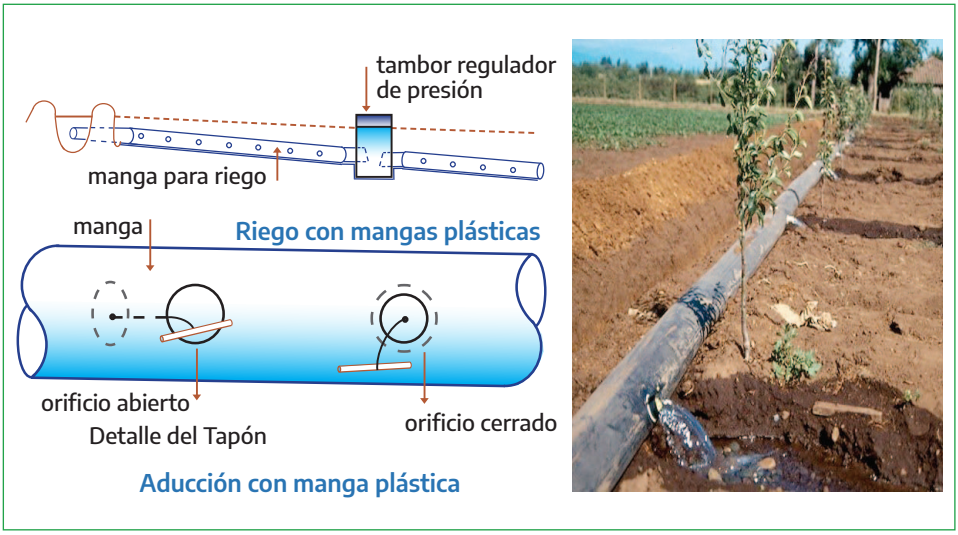


Figura 7.5. Sistema de aducción con mangas plásticas.

7.4 SISTEMA DE BAJA PRESIÓN O CALIFORNIANO

El sistema de aducción de baja presión o californiano está conformado por un set de tuberías enterradas que se localizan en la cabecera de la plantación. Por dichas tuberías se conduce el agua, la que aduce a los surcos a través de tubos elevadores que deben tener una altura tal que, permita un caudal homogéneo en cada posición de riego, tomando en cuenta pérdidas de carga en tuberías y topografía del terreno. En la Figura 7.6 se muestra este sistema de aducción.

El sistema de baja presión permite una buena utilización del terreno y una gran facilidad de manejo. Es importante antes de implementarlo estudiar la cantidad de sedimentos del agua, para aumentar su vida útil.

Figura 7.6. Sistema de aducción de baja presión o californiano.

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 08

Diseño de riego por surcos

El diseño de riego por surco debe considerar los componentes asociados caudal, longitud del surco, tiempo de corte, y número de surcos por hilera, como también aquellos antecedentes relacionados como: pendiente, suelo, superficie del sector, calidad del agua y tipo de cultivo. Los antecedentes del área en estudio influyen de manera directa en las variables de diseño.

La eficiencia de aplicación en riego por surcos, en términos generales muestra en la actualidad por manejo y diseño inadecuado, valores valores cercanos al 40%, a pesar de que está ampliamente descrito en la literatura científica, el hecho de que es posible alcanzar eficiencias superiores al 85%, cuando estos sistemas de riego son diseñados y operados correctamente (Smith *et al.*, 2005).

Un adecuado diseño de riego surco busca que los volúmenes infiltrados durante el riego sean tan homogéneos como sea posible, para de este modo, reducir los volúmenes perdidos por percolación profunda y por escorrentía (flujo en exceso al final del surco). En la cabecera se infiltra un mayor volumen comparado con el de la cola del surco. En efecto, este fenómeno se debe a que el agua tiene más tiempo para infiltrarse en la cabecera, sobre todo cuando los tiempos de riego son reducidos. De ahí que se obtengan bajas eficiencias si se corta el flujo cuando el agua alcanza el final del surco.

8.1 ANTECEDENTES BÁSICOS PARA DISEÑO

8.1.1 Pendiente del terreno

La pendiente del terreno es un parámetro relevante en el establecimiento de riego superficial ya que limita su incorporación a valores no mayores a 1.5% en casos excepcionales a un 2%. Además, tiene un marcado efecto en la determinación de los caudales a aplicar por surcos para evitar problemas de erosión.

8.1.2 Rugosidad hidráulica

La rugosidad de los surcos tiene estrecha relación con la preparación, y el tipo de suelo, ya que de ella dependerá qué tan mullido está el suelo como también la presencia de malezas; lo que determinará el valor de la rugosidad hidráulica, que en general varía entre valores de 0.020 a 0.035. Este parámetro tiene una directa relación con el avance del agua en surco y el tirante asociado a un determinado caudal, restringiendo así la capacidad del surco.

8.1.3 Infiltración del suelo

La velocidad de infiltración es un parámetro que debe ser determinado con bastante precisión como se ha descrito en el capítulo pertinente, pues tiene un rol primordial en el manejo y diseño del riego por surcos y del agua a nivel predial. Es a su vez una condicionante en la incorporación del riego por surco, ya que valores muy elevados no permiten incorporar riego superficial.

8.1.4 Superficie del sector

Las características de la superficie del área a regar como longitud o ancho condicionan la longitud de los surcos que deben ser múltiplo del ancho o largo dependiendo de la dirección de estos. Además, determina el área mínima a regar en asociación con la disponibilidad de agua, frecuencia y tiempos de riego.

8.1.5 Calidad y disponibilidad de agua

La calidad y disponibilidad de agua tendrán un efecto importante en la superficie a regar y las necesidades de prevenir la salinidad del área respectivamente.

8.1.6 Cultivo

El cultivo es obviamente un componente primordial para el riego asociándolo con la demanda y la zona de aplicación de agua. Por ello se requiere un afinado conocimiento del marco de plantación, tipo de crecimiento y fundamentalmente el tipo de distribución radical

8.2 VARIABLES DE DISEÑO DE RIEGO POR SURCOS

Los valores de las variables de diseño de riego por surcos tienen una importante relación con las condiciones topográficas, tipo de suelo, cultivo, área a regar y la disponibilidad de agua.

8.2.1 Caudal

El caudal para la fase de avance se obtiene considerando la susceptibilidad a la erosión y la capacidad del surco. El criterio de selección es el valor más restrictivo considerando ambos factores mencionados anteriormente.

El caudal máximo no erosivo se determina desde las siguientes ecuaciones:

$$Q_{max} = 0.0063 \cdot S_o^{-1} \quad [8.1]$$

$$Q_{max} = 0.025 \cdot S_o^{-0.75} \quad [8.2]$$

Donde:

Q_{max} = Caudal máximo no erosivo(L s^{-1}).
So = Pendiente (m m^{-1}).

El caudal máximo asociado a la capacidad del surco se debe determinar, dadas situaciones de caudales muy grandes bajo condiciones de muy baja pendiente que no sean erosivos, puede que sea mayor a su capacidad de flujo. El caudal máximo para la capacidad del surco se puede determinar desde la siguiente ecuación:

$$\frac{Q^2 \cdot n^2}{S} = F_1 \cdot A^{F2} \quad [8.3]$$

Donde:

Q = Caudal máximo (m^3 s^{-1}).
n = Rugosidad de Manning (adimensional).
S = Pendiente (m m-1),
A = Área (m^2)
F_1 y F_2 = Factores de hidráulica de forma obtenidos desde las Ecuaciones 5.16 y 5.17 respectivamente.

El caudal máximo seleccionado para la fase de avance será el más restrictivo desde ambos criterios: erosivo y capacidad de flujo.

El caudal para la fase de almacenamiento debe tener un valor menor al de la fase de avance para evitar pérdidas por escorrentía al pie del surco y se establece con un criterio práctico desde la siguiente relación:

$$Q_{red} = \frac{Q_{max}}{2} \quad [8.4]$$

El otro criterio es realizar su valor tomando como base la velocidad de infiltración promedio durante la fase de almacenamiento que considera el tiempo entre la finalización del avance y el tiempo de riego, así el caudal reducido será:

$$Q_{red} = VI_p \bullet L \qquad [8.5]$$

donde,

$$VI_p = \frac{VI_{Tr} + VI_{Tf}}{2} \qquad [8.6]$$

si consideramos que Q_{red} es el caudal reducido en m^3/min, VI_p es la velocidad de infiltración promedio para el tiempo de riego y el tiempo de avance y L la longitud del surco.

8.2.2 Tiempo de riego

El tiempo de riego en riego por surcos se determina por lo general desde la ecuación de infiltración de Kostiakov desde:

$$T_R = \left[\frac{H_A}{A}\right]^{1/B} \qquad [8.7]$$

Donde:

T_R = Tiempo de riego en min.
H_A = Volumen requerido a aplicar en el riego m^3/m.
A = Constante de infiltración acumulada en m^3/min^B.
B = Constante del exponente de la ecuación de infiltración.

8.2.3 Longitud

La longitud del surco se determina considerando el criterio de variación de percolación entre la cabecera y el pie del surco (Hoffman *et al.*, 2007). Es importante mencionar que la variación del nivel de agua aplicado entre la cabecera y el pie del surco se determina para valores de variación de infiltración entre el tiempo de riego y el tiempo de riego más el tiempo de avance periodo en el cuál la variación es muy pequeña como se muestra en el ejemplo de la Tabla 8.1. Un análisis preliminar de largo de surco se puede obtener al evaluar el tiempo de avance para diferentes largos de surco y establecer su variación de agua aplicada entre la cabecera y el pie.

En la Tabla 8.1 se muestra un ejemplo de cálculo que permite una primera aproximación y que se puede comparar con los porcentajes de percolación previamente descritos.

Tabla 8.1. Análisis para establecer una primera aproximación de largo de surco asociado a tiempo de riego, tiempo de avance y percolación

Distancia entre hilera (m)	Distancia entre árboles en hilera (m)	Evapo-transpira-ción (mm día^{-1})	Frecuencia de riego (días)	Volumen por planta (m^3)	Volumen por metro de surco (m^3 m^{-1})	Coeficien-te A infiltración (m^3 min^B m^{-1})	Expo-nente B infiltra-ción	Tiempo riego (min)	Tiempo avance (min)
4	4	5	7	0.56	0.07	0.0051	0.451	332.8	30
4	4	5	5	0.4	0.05	0.0051	0.451	157.8	30
6	5	5	7	1.05	0.105	0.0051	0.451	817.9	30
6	5	5	5	0.75	0.075	0.0051	0.451	387.9	30
4	2	5	7	0.28	0.07	0.0051	0.451	332.8	30
4	2	5	5	0.2	0.05	0.0051	0.451	157.8	30

Tiempo de corte al tiempo de riego + tiempo de avance (min)	Tiempo de corte al tiempo de riego (min)	Infiltración al tiempo de riego (m^3)	Infiltración al tiempo de riego + tiempo de avance (m^3)	Diferencia de infiltración entre cabecera y final de surco (m^3)	Diferencia de infiltración entre cabecera y final de surco (L m^{-1})	Máxima variación en litros por planta (L)	Porcentaje variación con respecto al volúmen total aplicar (%)
362.84	332.84	0.07	0.07278	0.00278	2.78	22.23	3.97
187.84	157.84	0.05	0.05408	0.00408	4.08	32.66	8.16
847.86	817.86	0.105	0.10672	0.00172	1.72	17.20	1.64
417.86	387.86	0.075	0.07756	0.00256	2.56	25.63	3.42
362.84	332.84	0.07	0.07278	0.00278	2.78	11.11	3.97
187.84	157.84	0.05	0.05408	0.00408	4.08	16.33	8.16

Tomando como base un criterio de percolación permisible para determinar el largo de surco podemos utilizar antecedentes de la infiltración del suelo como es el exponente de la ecuación de infiltración, los modelos de avance de agua y la relación de tiempo entre el tiempo de avance y el tiempo de riego para establecer de esa manera la longitud del surco.

$$P = \left[\frac{B}{2R + 1}\right] \qquad [8.8]$$

De esta manera P es el criterio de percolación permisible en porcentaje que determina el diseñador, B el exponente de la ecuación de infiltración, R es la relación de tiempo que se obtiene desde la Ecuación 8.9.

$$R = \frac{T_R}{T_f} \qquad [8.9]$$

Si conoces los valores de R y tiempo de riego puedes determinar desde la Ecuación 8.10 el tiempo en que el agua debe llegar al final del surco, utilizando el modelo de avance obtienes la longitud del surco.

$$T_f = \frac{T_R}{R} \qquad [8.10]$$

Finalmente, para establecer el valor de diseño de la longitud del surco se debe considerar que dicho valor sea múltiplo de la longitud del sector a regar.

8.2.4 Tiempo de corte

El tiempo de corte del caudal de ingreso al surco se establecerá considerando el tiempo de riego y el tiempo de avance como se muestra en la Ecuación 8.11.

$$T_R \leq T_{CO} \leq T_R + T_f \qquad [8.11]$$

De esta manera el caudal que ingreso al surco este asociado al tiempo de avance por el caudal máximo establecido y caudal reducido entre el tiempo de corte menos el tiempo de avance.

8.2.5 Número de surcos por hilera

El número de surcos por hilera está en función del tipo de suelo, su profundidad, el tipo de distribución radical de extracción del frutal o cultivo, y el

sistema de plantación. En general para suelos poco profundo y con un sistema radical de gran expansión horizontal, como también en frutales que presentan una baja profundidad con buena expansión horizontal, es necesario incorporar una mayor cantidad de surcos por hilera para cubrir de mejor forma la demanda.

8.2.6 Modelo de apoyo para diseño

Como apoyo para establecer el diseño de riego por surcos podemos utilizar el software AQUASURCO desarrollado en el Departamento de Recursos Hídricos de la Universidad de Concepción cuya pantalla de inicio se muestra en la Figura 8.1.

En la Figura 8.1 se muestran todos los parámetros asociados a infiltración del suelo, forma de surco y rugosidad, caudal de avance y receso, pendiente, tiempo de corte, volumen de agua requerido y longitud. Además, muestra los volúmenes asociados al riego en cuestión y las eficiencias, con algunas sugerencias básicas.

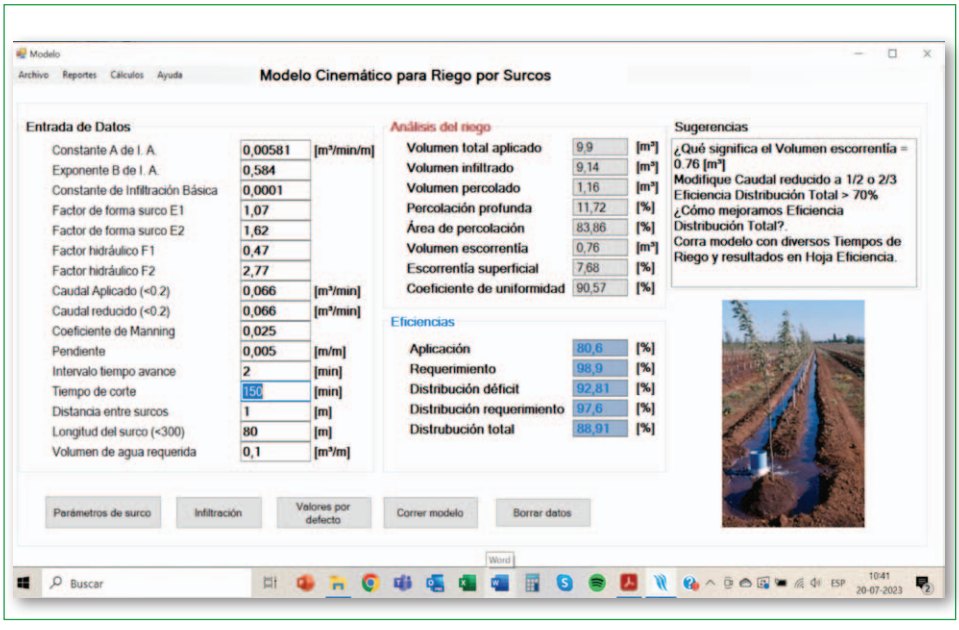


Figura 8.1. Muestra de la composición del software AQUASURCO.

El software AQUASURCO se compone de tres sub-modelos que se describen a continuación:

- **Cálculo de los parámetros geométricos e hidráulicos del surco**
  Como se ha descrito en parámetros anteriores se requiere conocer el área de la sección de flujo como función de la altura de escurrimiento, la que a su vez depende del caudal aplicado. Por tanto, este módulo busca una función del tipo potencial que genere una relación entre caudal aplicado y área de flujo, véase Ecuación 8.3. Para ello se requiere conocer los parámetros hidráulicos de forma F1 y F2 obtenidos desde las ecuaciones 5.16 y 5.17, respectivamente.

- **Cálculo de los parámetros de la velocidad de infiltración a través del modelo de Kostiakov y Lewis**
  Para determinar los parámetros de la velocidad de infiltración se implementa el Metodo del Punto medio y Final descrito en el Capítulo 3. Para ello se require introducir el tiempo que le toma el agua en llegar a la mitad y al final del surco, el caudal aplicado y conocer el largo y geometría del surco.

- **Cálculo de eficiencias de riego.**
  Los cálculos de las eficiencias se calculan siguiendo la metodología del Capítulo 6, en la que se calculan los volúmenes infiltrados, percolados y escurridos a lo largo del surco. En específico, se calcula la eficiencia de aplicación, la eficiencia de requerimientos, la distribución del déficit, la Eficiencia de Distribución del Déficit y la Eficiencia de Distribución Total.

8.2.6.1 Determinación de la forma del surco

La determinación de la forma del surco requiere incorporar los datos de forma del surco obtenidos en terreno utilizando las técnicas descritas en el Capítulo 5. Es importante tener en consideración los ajustes mencionados en el Capítulo 5 para tener una mejor aproximación de los valores de las constantes de forma que se utilizarán tanto en el avance como la infiltración.

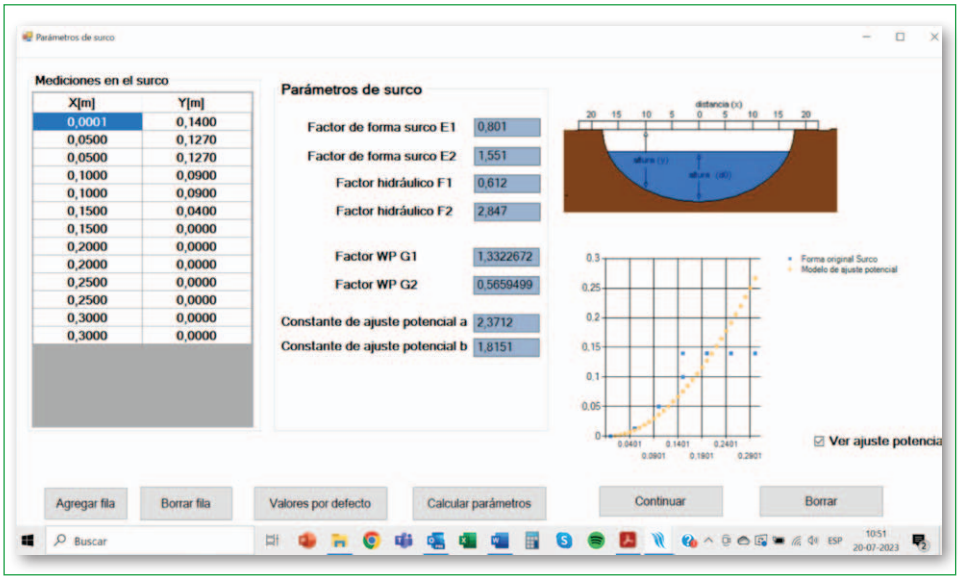


Figura 8.2. Parámetros hidráulicos y geométricos del surco ingresados en el software AQUASURCO.

Esta pantalla usa como entrada de datos las coordenadas de la geometría del surco, considerando como referencia la parte superior del surco como se muestra en la imagen de superior derecha (Figura 8.2). Permite, a partir del caudal aplicado, determinar el área de la sección de flujo y los factores hidráulicos.

8.2.6.2 Determinación de la infiltración en surcos

La velocidad de infiltración es un parámetro que debe ser determinado con la mejor presición posible, pues tiene un rol primordial en el manejo del agua a nivel predial y es particularmente importante en todo el proceso de diseño manejo y operación del riego por surcos. En este caso se utiliza el método de los dos puntos.

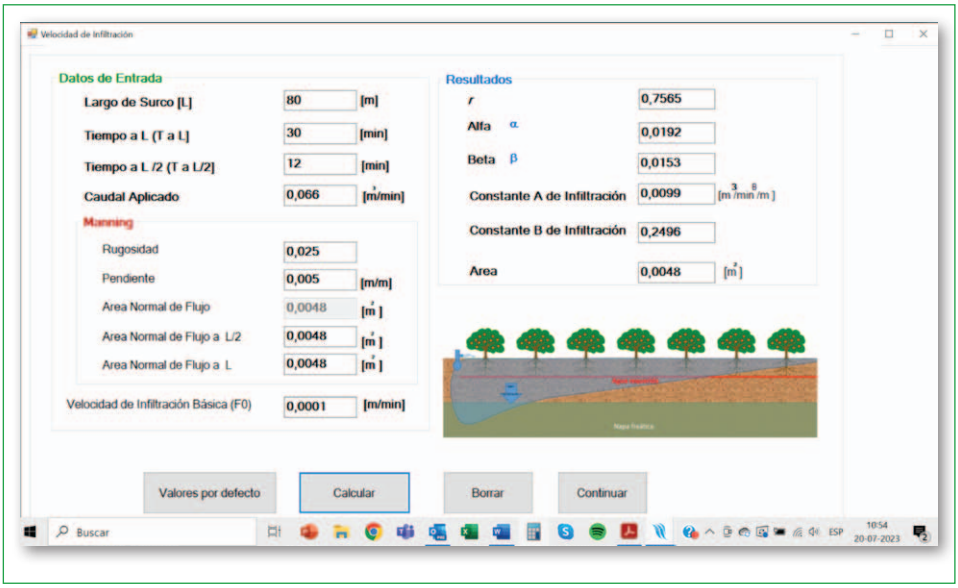


Figura 8.3. Determinación de los parámetros de infiltración en el software AQUASURCO.

La pantalla a la izquierda (Figura 8.3) muestra los datos de entrada necesarios para determinar las constantes del modelo de Kostiakov y Lewis. Para ello se requiere el largo del surco, el caudal aplicado, el tiempo medido, en los instantes en que el agua alcanza la mitad (T a L/2) y el final del surco (T a L). El área normal de flujo puede ser calculada en la pantalla de la Figura 8.2.

8.2.6.3 Descripción del avance, receso y tiempo oportunidad de riego

El avance y el receso se determinan con el procedimiento descritos en el Capítulo 5. Para el caso del avance si utilizó el modelo cinemático. El receso en base al proceso descrito previamente. Es importante visualizar estas dos fases, ya que permiten describir esquemáticamente el riego realizado.

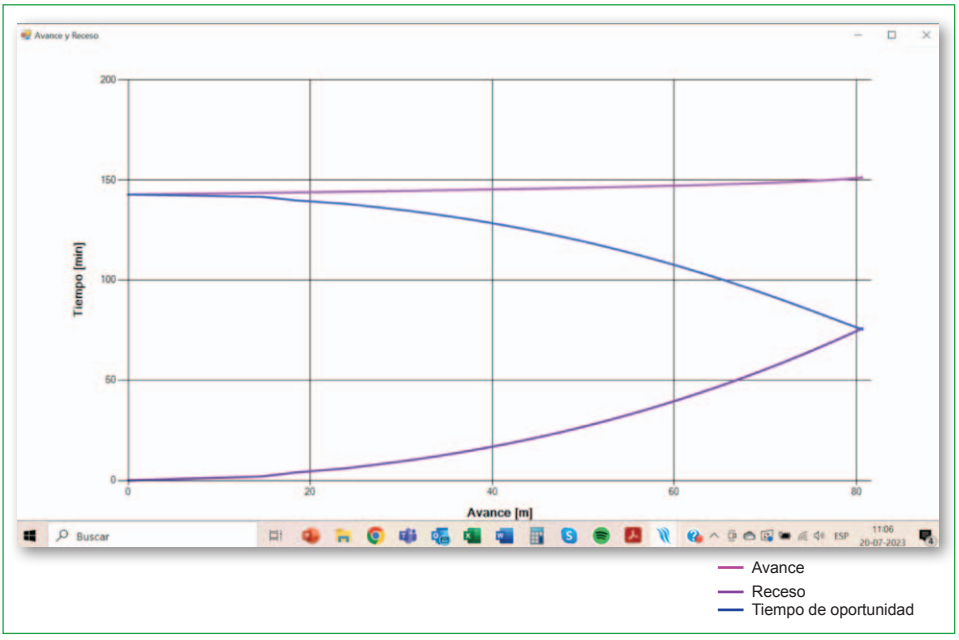


Figura 8.4. Ejemplo de curvas de avance, receso y tiempo de oportunidad de riego.

Símil a la Figura 2.1, la línea de color azul muestra cuanto tiempo le toma al agua avanzar en el surco. La línea de color amarillo muestra el momento en el tiempo en el que el agua desaparece del surco a lo largo del surco. La línea de color rojo muestra el tiempo que tuvo el agua para infiltrase a lo largo del surco y se obtiene al restar de las curvas de receso y la de avance.

8.2.6.4 Información de la calidad de riego

El comportamiento del riego se debe verificar con diferentes parámetros como los que se describieron en el Capítulo 6. Desde un punto de vista de diseño y operación el EDT muestra una mejor representación del riego que se está diseñado y operando. Sin embargo, si consideramos un enfoque asociado a problemas de contaminación es la EA.

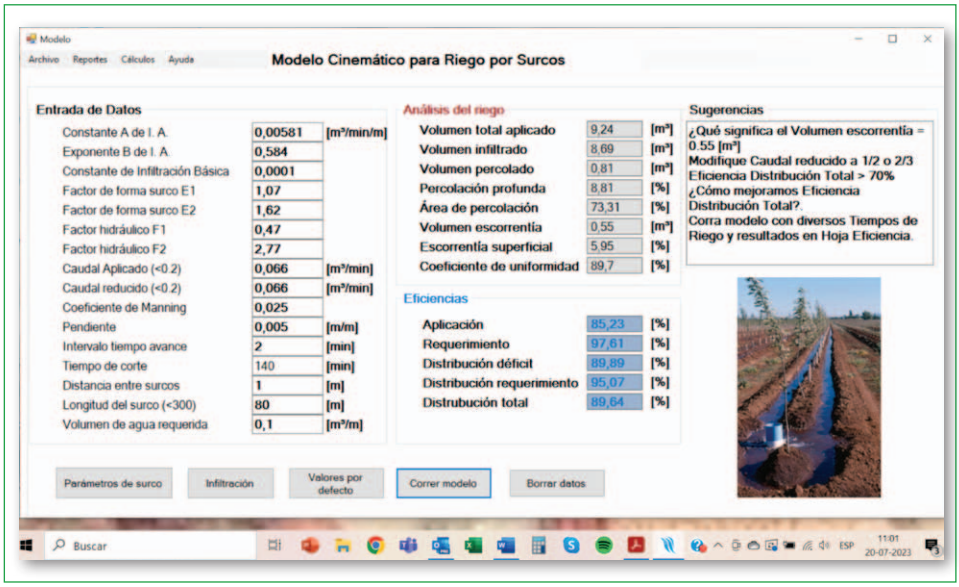


Figura 8.5. Resultados de la calidad del riego para una set de datos obtenido por el software AQUASURCO.

Enmarcada en la parte superior central, se encuentran los resultados de la calidad del riego expresado en términos de Volumen aplicado, Volumen infiltrado, Volumen percolado, escorrentía y uniformidad. En la parte inferior central se muestran las eficiencias como medida de la calidad del riego. A la derecha arriba se puede observar un conjunto de sugerencia para mejorar las eficiencias de riego.

En la Figura 8.6 se muestra un resumen de las proporciones en que se distribuyó el volumen de agua aplicado. Es decir, que volumen se percoló, se infiltró o se escurrió al final del surco.

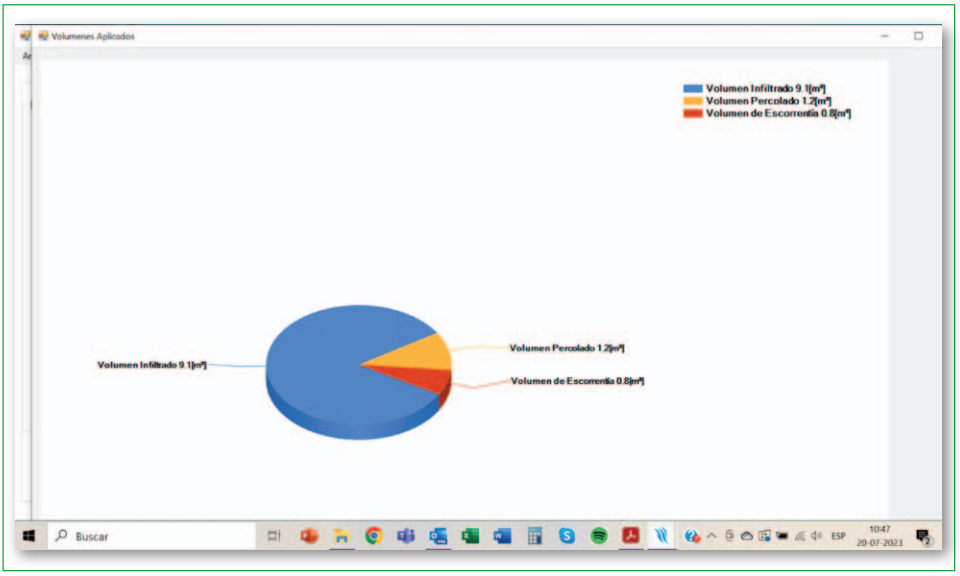


Figura 8.6. Distribución de los volúmenes aplicados.

Finalmente es importante poner de relieve que, el uso de los sub-modelos forma de surco e infiltración pueden no ser necesario utilizarlos en la medida que los datos estén previamente determinados.

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 09

Automatización de riego por surcos

La automatización del riego superficial, aunque ha tardado en implementarse, se ha podido establecer, ya que hoy es factible técnicamente considerar todos los parámetros de diseño descritos en el capítulo anterior y también asociado al desarrollo de sensores, sistemas de control de caudal y a la incorporación de embalses de regulación para así lograr un alto grado de eficacia en el riego. Esto, bajo los supuestos de que el caudal inicial debe ser el máximo permitido entendiendo que la premisa es llegar, con el agua, tan pronto como sea posible al final del surco, para luego reducir el caudal a uno que sea igual al caudal que el suelo es capaz de infiltrar. Debe considerar además que los tiempos de riego estén directamente asociados con la demanda del frutal. En efecto, un sistema de riego ideal sería aquel en el que el agua apareciera en un instante sobre todo el surco, para así, infiltrarse en el suelo como una lámina homogénea, cuestión que no es posible. No obstante, si es posible lograr altas eficiencias considerando los métodos y criterios descritos en el Capítulo 8. El diseño y operación, considera que la variación en la cantidad de agua aplicada entre la cabecera y el final del surco, en el proceso de infiltración al final del tiempo de riego, es muy pequeña, situación que se produce en la fase de avance (Holzapfel *et al.,* 2022) (Ver Tabla 8.1).

De ahí la importancia de disponer de sistemas de control automático que permitan modular el caudal, de acuerdo a la velocidad de infiltración del suelo, detectar cuando el agua ha llegado al final del surco, para reducir el caudal aplicado y distribuir el caudal entrante en varios surcos de forma simultánea, cuestión que el riego por surcos convencional no ofrece.

De esta forma, los sistemas de riego por surco automatizados permiten infiltrar el agua en el suelo de un modo más homogéneo, lo que redunda en una mejor eficiencia de uso del agua, como se representa en la Figura 9.1.

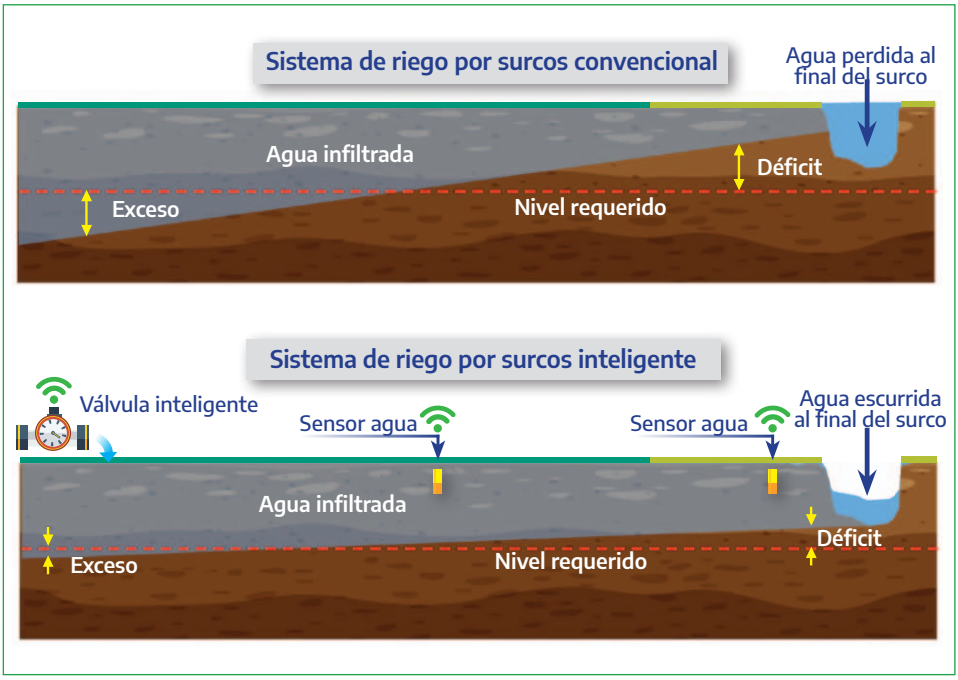


Figura 9.1. Representación del mayor grado de homogeneidad, en los volúmenes infiltrados a lo largo del surco, producto de reducir el caudal cuando el agua ha alcanzado el final del surco.

En la Figura 9.2 se entrega un esquema de la automatización de riego por surcos para su comprensión general.

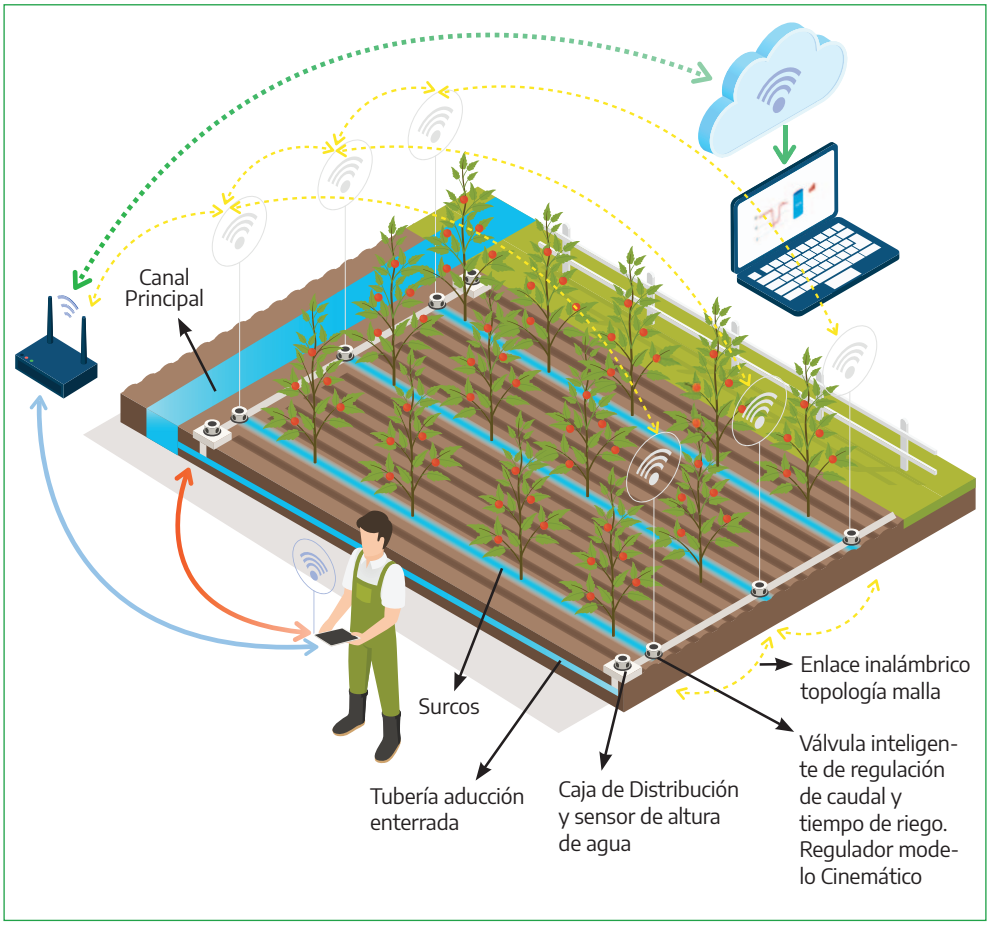


Figura 9.2. Esquema de automatización del riego por surcos.

9.1 OPERACIÓN DE RIEGO POR SURCOS

Generalmente, el riego por surcos se efectúa a través de lo que se denomina posturas, es decir, una cierta cantidad de surcos que se riegan simultáneamente.

De modo que las acciones de control se efectúan en simultáneo para todos los surcos de esa postura. Para realizar este control, se requiere de una estructura de control o regulación del flujo entrante (Camacho *et al.*, 1997).

Entre las estructuras más comunes de regulación como se ha mencionado, se encuentran las compuertas, asociadas a cámaras de distribución como se muestra en la Figura 9.3.

Por otra parte, los mecanismos de distribución como canales, sifones y tubos rectos tienen dificultades prácticas a la hora de su implementación, ya que requieren canales perfectamente nivelados y por otra parte restringen la movilidad de la maquinaria agrícola.

Como una respuesta a estos problemas nacen los sistemas de aducción de baja presión denominados en forma vulgar "californiano". Estos últimos, merecen especial atención debido a que son aquellos que ofrecen un mejor control de los parámetros de operación del riego.

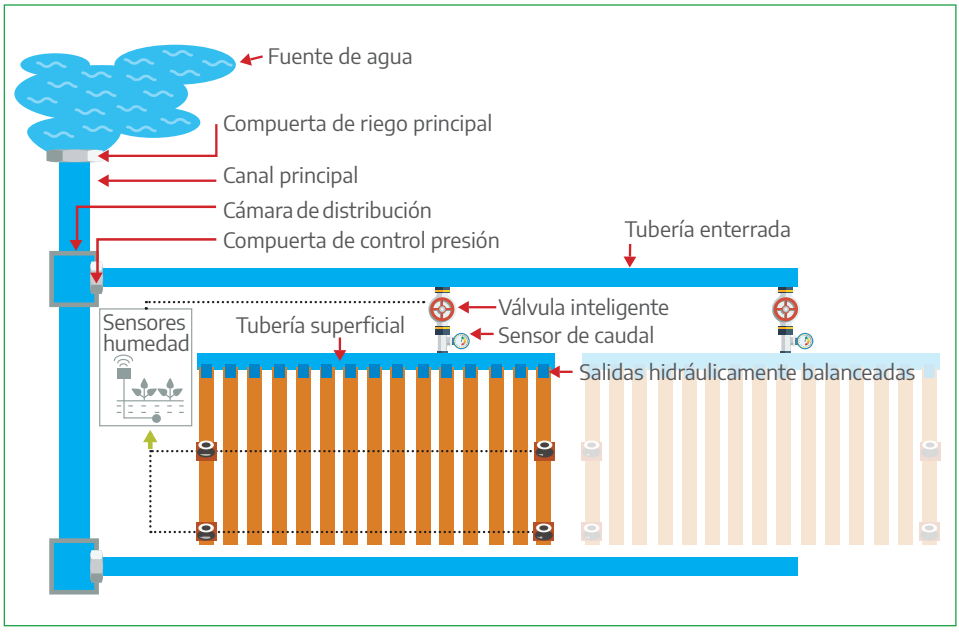


Figura 9.3. Esquema de distribución y control de la aplicación del agua en un sistema de control de riego de baja presión.

En ella se puede apreciar la fuente de agua o acumulador, que permite ecualizar los caudales instantáneos disponibles desde el canal de alimentación del predio. Se muestra además, los sistemas de regulación de caudal y la distribución de los sensores que permiten, calcular la Velocidad de infiltración y detectar cuando el agua ha alcanzado el final del surco.

Sin embargo, debido a su complejidad de manejo su aplicación no se ha difundido.

Sin embargo, como una respuesta al problema de manejo de los sistemas como el californiano, nacen los sistemas de control automático de riego por surcos, que permiten mantener las bondades de estos sistemas y superar sus problemas de manejo.

Los sistemas automáticos de riego por surcos operan siguiendo el esquema de la Figura 9.3 y Figura 9.4. En este tipo de sistemas, una vez conocida la demanda de agua, se mide el volumen de agua disponible para determinar qué superficie es posible de regar. Luego el sistema envía una orden para que una compuerta de regulación, típicamente de guillotina, se abra para dejar pasar el caudal requerido para regar la superficie objetivo.

A continuación, se determina cuantas válvulas se pueden abrir de forma simultánea, con lo que se calcula el número de surcos a regar. La siguiente etapa se caracteriza por regular la altura de carga en las cámaras de distribución dispuestas para este efecto (véase Figura 9.3).

Una vez determinada la altura de carga, se abren las válvulas de modo de dejar pasar un caudal equivalente a la sumatoria del número de surcos, multiplicada por el caudal máximo no erosivo. Las válvulas se mantienen abiertas a caudal máximo no erosivo hasta que el agua alcanza el final del surco. En el momento en que el agua llega al final del surco el caudal se reduce a un caudal igual a la velocidad de infiltración promedio, véase Ecuación 8.6, el que en términos generales puede ser asumido como un tercio del caudal inicial. Este caudal reducido se mantiene hasta que se alcanza el tiempo de riego, instante en el que se cierran las válvulas.

Nótese que la detección del momento en el que el agua llega al final del surco se hace por medio de sensores de humedad o presencia de agua, que envían una alerta al sistema de control para que reduzca el caudal, cerrando la válvula hasta alcanzar el valor deseado.

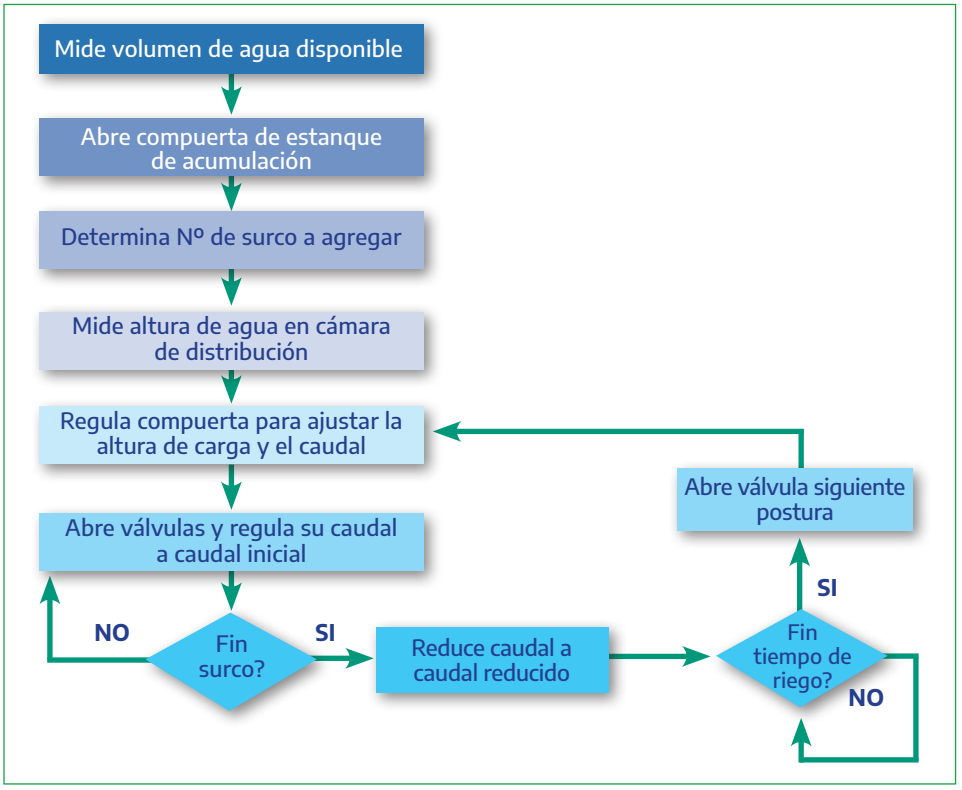


Figura 9.4. Diagrama de flujo del manejo automatizado del riego por surcos.

Por otra parte, desde la perspectiva del control automático del sistema, este es un sistema de lazo cerrado en el que se mide el caudal para modularlo de modo de cumplir con los caudales objetivos de cada etapa i.e., avance, llenado y receso. Estos sistemas de control automático pueden ser descritos a partir del algoritmo descrito en la Figura 9.5.

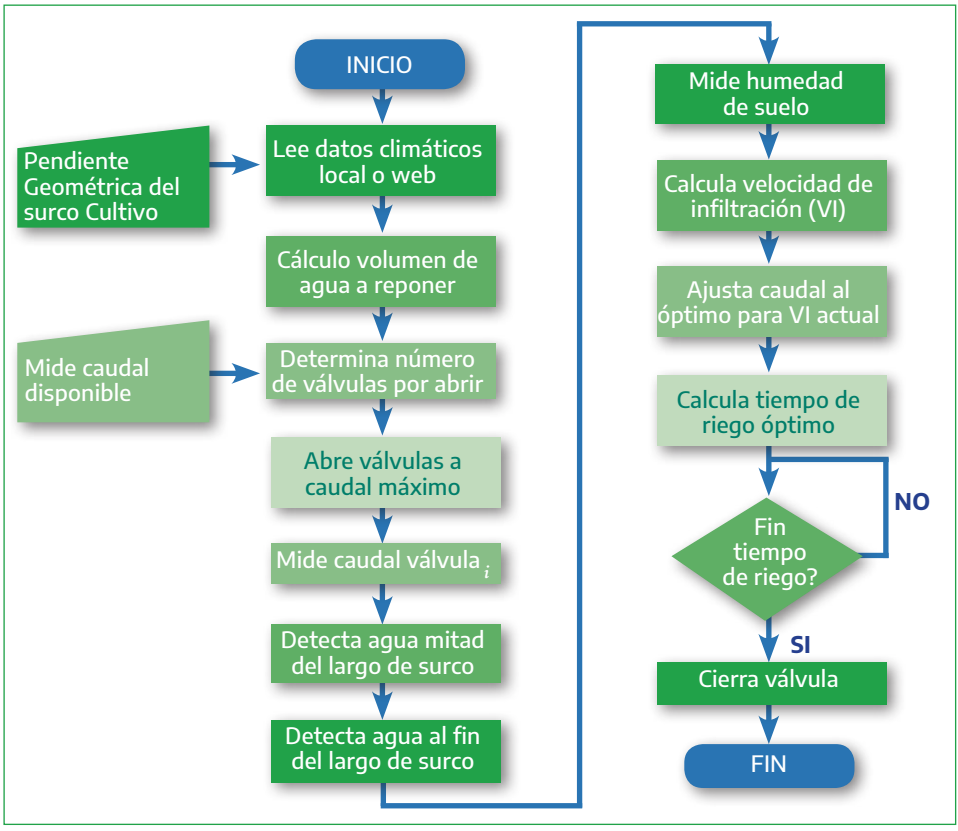


Figura 9.5. Diagrama de flujo del algoritmo de control automático de riego, en el que se calcula de forma automática la velocidad de infiltración de modo de ajustar los caudales a esta condición de terreno.

De esta forma, los sistemas de control automático permiten homogeneizar los volúmenes infiltrados a lo largo del surco, factor determinante en la mejora de las eficiencias, en particular las eficiencias de distribución y de aplicación.

En consecuencia, con la implementación de estos sistemas se consiguen altas eficiencias de aplicación, cercanas a 85%. Eficiencias más altas han sido reportadas en suelos en los que se ha realizado micro nivelación. Esto consigue que el agua se distribuya y avance de forma homogénea, lo que no solo aumenta las eficiencias, sino que además reduce la variabilidad de la distribución y de las eficiencias entre surcos.

9.2 PLATAFORMA DE CONTROL DE RIEGO

Finalmente, como una forma de controlar el sistema de riego por surcos del mismo modo que se haría en un sistema de riego presurizado, se han desarrollado sistemas basados en el concepto de Internet de las Cosas (IoT), que permiten el control remoto y programación del riego, como se muestra en el ejemplo de la Figura 9.6. Este tipo de sistemas, además de controlar individualmente las válvulas, habilitar la posibilidad de implementar los sistemas de ferti-irrigación, como los implementados por Abbasi *et al.* (2021).

Esta interfaz permite seleccionar la fuente de agua y el sector que se desea regar, de modo de controlar inalámbricamente las válvulas correspondientes a cada sector de riego.

La programación es diaria, semanal y posee diversos programas de riego que permiten realizar más de un riego por día al igual que en los sistemas presurizados.

9.3 VÁLVULA INTELIGENTE

Se debe recordar que el objetivo de control automático de riego por surcos requiere recolectar datos de operación de cada riego, de modo de calcular la velocidad de infiltración y así optimizar el caudal a aplicar. Estas mediciones se efectúan mediante redes de sensores inalámbricos, que emplean protocolos de comunicaciones de largo alcance como Lora ®. En Figura 9.6 se muestra un esquema de cómo opera la válvula inteligente, mientras que en la Figura 9.7 se muestra un esquema de cómo opera el sistema en su conjunto. De este modo la válvula inteligente debe disponer de un transmisor y un microcontrolador que permite la gestión y procesamiento de los datos a través del modelo del Volumen Balance, para así determinar, caudal objetivo, tiempo de riego y grado de apertura de la válvula.

La válvula inteligente, está compuesta por una válvula de compuerta, un motor paso a paso que controla la posición de la compuerta de la válvula, un controlador del motor paso a paso con capacidad de control de posición PID, un paquete de baterías, un controlador de carga y gestión de energía, con capacidad de recarga y un panel solar. Un esquema de los componentes del sistema y su interconexión se muestra en la imagen de la Figura 9.6. Además, se muestra la forma de conexión mecánica del motor paso a paso con el bastado de la compuerta de la válvula.

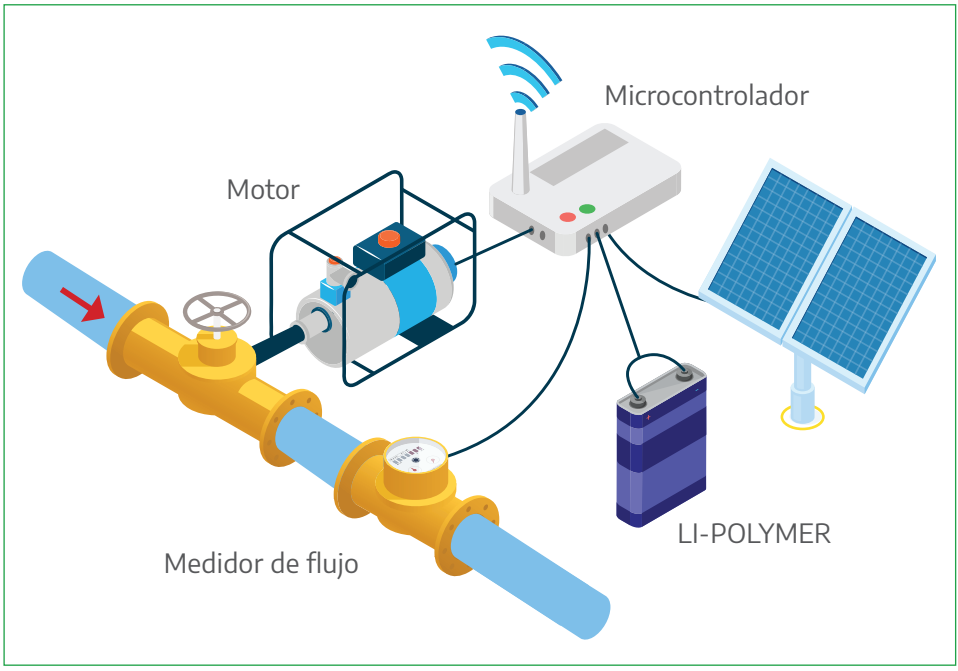


Figura 9.6. Esquema de los componentes e interacción de estos en la válvula inteligente.

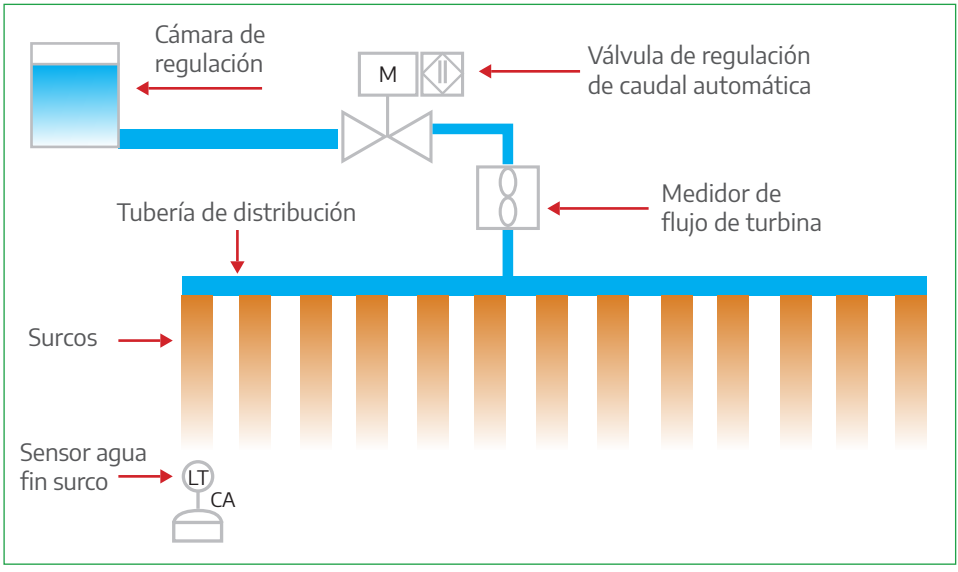


Figura 9.7. Esquema del circuido hidráulico requerido para distribuir el agua de modo homogéneo y de los elementos de control necesario para regular el caudal.

La Figura 9.7 muestra el circuito hidráulico de distribución del agua de riego y de las estructuras y elementos de control y regulación del caudal. En la esquina superior derecha se muestra la cámara de regulación de altura de carga hidráulica. La altura de carga en esa cámara permite regular el caudal máximo que se puede entregar a las válvulas de distribución, esto ya que el caudal es función de la altura de carga.

Además, la Figura 9.7 muestra una válvula de regulación de flujo, que debe tener la capacidad de modular el caudal en función de los requerimientos impuestos por la etapa de riego, esto es avance, almacenamiento o receso. Entendiendo que la fase de avance usa el caudal máximo determinado para dicha fase y para la fase de almacenamiento el caudal de receso.

Como parte integral del sistema, se debe incorporar un medidor de flujo de modo de ajustar el caudal en función de la etapa de riego. Luego, el sistema cuenta con una tubería de distribución que permite entregar el agua a cada surco, mediante salidas, con hidrantes y campanas de riego.

Al calcular el gradiente hidráulico es posible dimensionar la altura de cada hidrante (Figura 9.8) de modo que el caudal de salida sea el mismo para cada uno de ellos. De esta forma los surcos reciben el mismo caudal a pesar de las pérdidas de carga producto de las múltiples salidas de la tubería.

Por otra parte, para garantizar la homogeneidad de caudales en cada salida, se suele calcular las pérdidas de carga a lo largo de la tubería, de modo de compensar, las pérdidas de carga, dados que el caudal a lo largo de la tubería cambia debido las salidas en cada hidrante.

Si, el punto de instalación de la válvula esta al medio, las pérdidas de carga deberían ser iguales en ambos lados de la tubería.

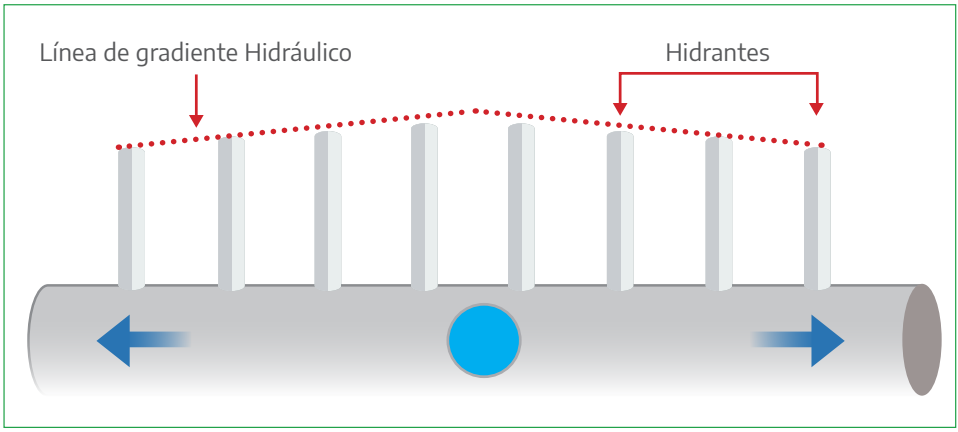


Figura 9.8. Esquema de la disposición de la tubería de distribución y de los tubos elevadores o hidrantes.

9.4 EMBALSE DE REGULACIÓN

Loucks *et al.* (1985) explica que los modelos determinísticos tienen un valor explícito en una situación particular y se pueden entender mejor sus efectos al prescindir de la incertidumbre. Por lo anterior Palma (2022), utilizó la metodología de modelos determinísticos de ríos para el manejo de riego por surcos automatizado, con un caudal de acceso continuo y así establecer el volumen que debe tener un embalse de regulación.

El propósito principal de un embalse en riego por surcos es proveer de un flujo regulado constante a una superficie anteriormente ya estudiada. Si es que no existe un tipo de embalse para este tipo de riego, es muy difícil efectuarlo de una manera que tenga altas eficiencias en el uso de agua, debido a que, en el riego por surco se necesita un caudal de avance (caudal máximo no erosivo) y luego, un caudal reducido (caudal durante la fase de almacenamiento). El caudal de avance es mucho mayor que el caudal reducido, lo que hace difícil mantenerlo sin que no existiese un embalse de regulación. La capacidad del embalse, además de las reglas de operación, determina el volumen que debe ser almacenado para su posterior entrega regulada.

9.4.1 Análisis de diagrama de masa

Consiste en encontrar el máximo volumen a almacenar en una secuencia de caudales de entrega con un flujo de aporte históricamente conocido.

Se establece que d_t representa la diferencia entre R_t y Q_t, es decir, entre las necesidades y el caudal de entrada al embalse en un periodo t. La máxima diferencia (d_t^*) entre la entrada y salida para un tiempo t a un tiempo T es:

$$d_t^* = maximun \left(\sum_{\tau=1}^{j} d\tau \right), \; para \; t \leq j \leq T \qquad [9.1]$$

Así, la capacidad máxima del embalse K_a será:

$$K_a = maximun \left(\sum_{t=i}^{j} R_t - Q_t \right), \; para \; 1 \leq i \leq j \leq T \qquad [9.2]$$

El procedimiento anterior sirve solo sí, la suma de las salidas (R_t) del embalse no excedan la suma de las entradas al embalse. A continuación, se muestra la Ecuación 9.2, gráficamente:

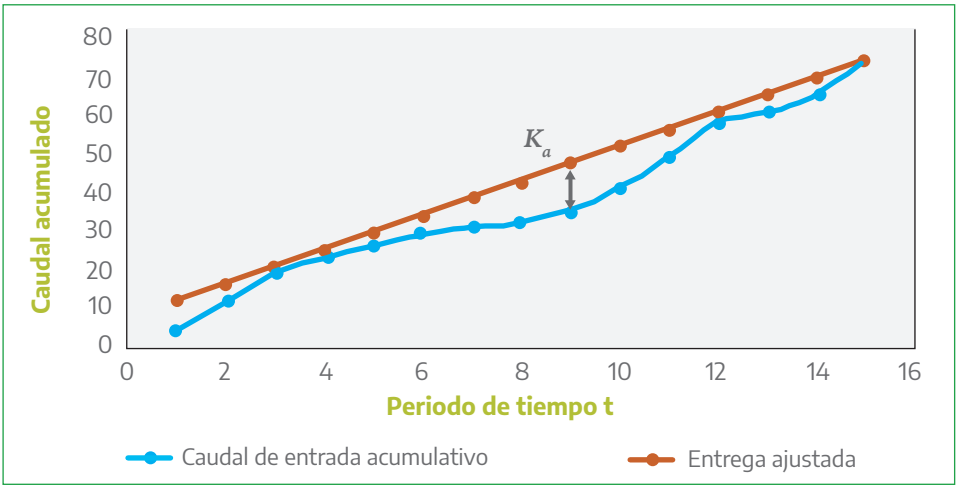


Figura 9.9. Análisis por diagrama de masas para estimar la capacidad requerida activa de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.

9.4.2 Análisis de máximos secuenciales

Para este método se establece que K_t es la capacidad requerida al comienzo del periodo t y Q_t es el flujo de entrada en el período t. Tenemos que:

$$K_t = \left\{ \begin{array}{l} \ldots \rightarrow R_t - Q_t + K_{t-1} \ldots, \textit{si es positivo} \\ \rightarrow 0 \ \ldots, \textit{en otro caso} \end{array} \right\} \qquad [9.3]$$

Donde, el valor máximo de K_t es la capacidad de almacenamiento requerida.

9.4.3 Análisis de optimización

Los análisis previamente descritos son de gran utilidad para un embalse con el estudio de una variable como es el caso del agua para riego. Sin embargo, para el caso de considerar pérdidas e incorporar otras variables y más embalses en paralelo o en serie, no es posible utilizar el método. Para ello, es

necesario utilizar programación matemática en general o programación lineal en forma específica, utilizando la ecuación del balance de masas. Así, se tiene que:

$$S_t + Q_t - R_t - L_t = S_{t+1} \quad [9.4]$$

Donde:

S_t = Volumen almacenado en el embalse al comienzo del período *t*.
Q_t = Caudal del ingreso en el tiempo *t*.
R_t = Caudal que se debe entregar en el período *t*.
L_t = Pérdidas por evaporación y percolación en el período *t*.

Ahora, si se ignora la percolación; la evaporación en el período t en función del volumen almacenado y de la evaporación en cada período. Las pérdidas por evaporación están dadas por la siguiente ecuación:

$$L_t = A_a e_t \left(\frac{S_t + S_{t+1}}{2} \right) + A_0 e_t \quad [9.5]$$

$$a_t = 0{,}5 A_a e_t \quad [9.6]$$

Combinando las ecuaciones, se tiene que:

$$(1+a_t)S_{t+1} - (1-a_t)S_t = Q_t - R_t - A_0 e_t \quad [9.7]$$

El volumen almacenado no puede exceder la capacidad del almacenamiento activo del embalse, lo que se especifica a continuación:

$$S_t \leq K_a \quad [9.8]$$

Con el caso particular de estudio, para diseñar un embalse para riego por surcos con sistema de baja presión, se tienen que cambiar algunas condiciones descritas anteriormente. Como, por ejemplo, el caudal de entrada (Q_e) puede ser variable en distintos meses de la temporada de riego y el caudal de entrega que es un valor que también cambia, por la sencilla razón de que en el riego superficial se tiene que respetar el tiempo de avance, el cual, tiene un caudal definido, que es el caudal máximo no erosivo ($Q_{máx}$). Terminado este tiempo de avance, se cambiará el valor del flujo a un caudal reducido (Q_{red}), que se estará ejecutando hasta el tiempo de corte (t_{co}).

Para poder obtener el volumen adecuado del embalse de regulación, se tiene que proceder de la siguiente forma:

1. Disponer del valor de las variables empleadas en la metodología en base al área mínima a regar:

- Tiempo de corte (T_{co})
- Tiempo de avance (T_f)
- Tiempo de almacenamiento (T_{alm})
- Caudal máximo no erosivo (Q_{max})
- Caudal reducido (Q_{red})
- Caudal de entrada (Q_{ent})

Para poder obtener un caudal de entrada (Q_{ent}), en base al diseño propio del sistema de riego, se tiene que hacer un "*loops*" desde el paso 3, en el cual se obtendrá el tiempo para llenar el embalse y si con el caudal de entrada existente se puede suplir el volumen faltante del embalse, antes de que se termine el día. Obtener la capacidad requerida (K_t) mediante la Ecuación 9.3, para cada periodo de estudio hasta terminar con todas las posturas de riego. Escoger la máxima diferencia entre las necesidades y la entrada de agua al embalse para obtener la capacidad requerida máxima (K_a) y encontrar el tiempo que se destina al ingreso de agua al embalse (T_{ent}).

2. Optimizar el tiempo empleado en la entrada de agua en el embalse (T_{ent}), logrando empezar el periodo de avance de la segunda postura inmediatamente después de que el caudal de entrada haya suplido la demanda del periodo de almacenamiento de la primera postura, es decir, la fase de avance de la segunda postura empezará a ejecutarse antes de que termine la fase de almacenamiento de la primera postura, logrando así, una disminución en el tiempo en que entra agua (T_{ent}) al embalse en comparación al punto anterior.

3. Analizar si es factible poner otra postura al día, viendo el tiempo disponible que exista después de terminar la última postura. Esto es debido a que se debe considerar de que el embalse tiene que estar a su máxima capacidad el día de riego posterior. La posibilidad de poner otra postura al día será únicamente factible si se quiere aumentar el área total a regar. Entre mayor sea el caudal de entrada, existirán más posibilidades de tener otra postura en el mismo día.

Por último, es recomendable al momento de obtener el volumen requerido, agregar un 15% más de este volumen por seguridad, para suplir posibles pérdidas por evaporación.

Es muy importante resaltar que el embalse de regulación no podría realizar su función si no existieran las válvulas inteligentes, debido a que estas regulan los tiempos y caudales de salida.

RIEGO POR SURCOS

CAPÍTULO 10

Referencias bibliográficas

1. Abbasi, Y., Abbasi, F., Liaghat, A. and Alizadeh, H. A. 2011. Evaluation of furrow fertigation and model validation on maize field. Irrigation and Drainage Systems, 25, 279-291. https://doi.org/10.1007/s10795-012-9124-7

2. Al-Azawi, S. A. 1985. Experimental evaluation of infiltration models. Journal of Hydrology (New Zealand), 24(2), 77-88.

3. Bassett, D.L. and Strelkoff, T. 1985. Hydraulic of Surface Irrigation. Chapter 12, In: Design and Operation of Farm Irrigation System. M. Jensen (Ed) American Society of Agricultural Engineering.

4. Bazán, S. 1986. Análisis de parámetros de riego por surcos. Memoria para optar al título de: Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Chillán, Chile.

5. Bodman, G. B. and Colman, E. A. 1944. Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils. Soil Science Society of America Journal, 8(C), 116-122.

6. Brown-Manrique, O., Luis-Pelier, D. and Gallardo-Ballat, Y. 2019. Metodología para la estimación del caudal aplicado en el surco a partir de las ecuaciones de Chezy y Bazin [en línea]. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 28(3). <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/rcta/article/view/1129/pdf_1>. [Consulta: 10 agosto 2020].

7. Camacho, E., Pérez, C., Roldán Cañas, J., and Alcaide García, M. 1997. Modelo de manejo y control en tiempo real del riego por surcos. Ingeniería del agua, 4(4), 11-18.

8. Chow, V.T. 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill International Book Company. New York, USA.

9. Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkler. California agricultural experimental station Bulletin 570.

10. Cunge, J.A., and D.A. Woolhiser. 1975. Irrigation systems. Chapter 13, In: Unsteady Flow in Open Channels. Mahmood and Yevjevich (Ed). Water Resources Publication, Fort Collins, Colorado.

11. Munevar, W.G.D. 2015. Gestión y valor económico del recurso hídrico. Revista Finanzas y Política Económica, 7(2), 279-298.

12. Ebrahimian, H. and Liaghat, A. 2011. Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. Soil and Water Research, 6(2), 91-101.

13. Elliott, R.L. 1980. Furrow irrigation field evaluation data. Summers 1977 to 1979. Colorado State University. Department of Agricultural and Chemical Engineering. Fort Collins, USA.

14. Elliott, R.L. and Walker, W.R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. Transactions of the ASAE, 25(2), 396-400.

15. Esfandiari, M. and Maheshwari, B. L. 1997. Application of the optimization method for estimating infiltration characteristics in furrow irrigation and its comparison with other methods. Agricultural Water Management, 34(2), 169-185.

16. Fernández de Córdova, C.J., León, A.J.F., Rodríguez, Y., Martínez, P.G. and Meneses, D.M. 2018. Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. Riha, 39(1), 17-31.

17. Gilley, J.E. and Finkner, S.C. 1991. Hydraulic roughness coefhcients as affected by random roughness. Transactions of the ASAE, 34(3), 897-903.

18. Guerra, M.A. 2009. Manual de diseño de sistemas de riego a gravedad y por aspersión. Tesis, Ingeniero Civil. Universidad San Francisco de Quito, Colegio Politécnico. Quito, Ecuador.

19. Henderson, D. and Haise, H. 1967. Control of water intake rate. Agronomy monograph. In: Irrigation of Agricultural Land. Vol. 11: 923-940.

20. Hoffman, G.J., Evans, R.G., Jensen, M.E., Martin, D.L. and Elliott, R.L. 2007. Design and operation of farm irrigation systems. (2nd. ed.). American Society of Agricultural and Biological Engineers. St. Joseph, USA.

21. Holzapfel, E.A., Marino, M.A. and Chávez-Morales, J. 1984. Comparison and selection of furrow irrigation models. Agricultural Water Management, 9(2), 105-125.

22. Holzapfel, E.A., Mariño, M.A., Valenzuela, A. and Diaz, F. 1988. Comparison of infiltration measuring methods for surface irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 114(1), 130-142.

23. Holzapfel, E.A., Mariño, M.A. and Chavez-Morales, J. 1986. Surface irrigation optimization models. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112(1), 1-19.

24. Holzapfel, E.A., Jara, J., Zuniga, C., Marino, M. A., Paredes, J. and Billib, M. 2004. Infiltration parameters for furrow irrigation. Agricultural Water Management, 68(1), 19-32.

25. Holzapfel, E.A., Pannunzio, A., Lorite, I., de Oliveira, A.S.S. and Farkas, I. 2009. Design and management of irrigation systems. Chilean Journal of Agricultural Research, 69(1), 17-25.

26. Holzapfel, E.A., Leiva, C., Mariño, M. A., Paredes, J., Arumí, J.L. and Billib, M. 2010. Furrow irrigation management and design criteria using efficiency parameters and simulation models. Chilean Journal of Agricultural Research, 70(2), 287-296.

27. Holzapfel, E.A. 2020. Hidráulica de forma de surcos. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola, Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería. Chillán, Chile (Documento de clases, eholzapf@udec.cl).

28. Holzapfel E.A., Orrego, X., Jara, J., Salgado, L. and Souto, C. 2021. Riego y Drenaje en Frutales. Manual FIA-CRHIAM. 62 p.

29. Loucks, D., J. Stedinger, J. and Haith, D. 1985. Water Resources System Planning and Analysis. Prentice-Hall.

30. Karmeli, D., Salazar, L.j., and Walker, W.R. 1978. Assessing the spatial variability of irrigation water applications. U.S. Environmental Protection. Office of Research and Development. Agency Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory. Ada, USA.

31. Koech, R., Gillies, M. and Smith, R. 2010. Simulation modelling in surface irrigation systems. In: Southern region engineering conference. November 11-12, 2010. University of Southern Queensland. Toowoomba, Australia.

32. Kostiakov, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation I soil and on the necessity for studying it front a dynamic point of view for purposes of amelioration. Transaction 6th Comm. International Soil Science Society Russian, Part A: 17-21

33. Lima, V.I.A., Pordeus, R.V., de Azevedo, C.A.V., Pereira, J.O., de Lima, V.L.A. and Azevedo, M.R.D. Q. A. 2014. Optimization of furrow irrigation systems with continuous flow using the software applied to surface irrigation simulations-SASI. African Agricultural Research, 9(42), 3115-3125.

34. Liu, K., Jiao, X., Li, J., An, Y., Guo, W., Salahou, M.K. and Sang, H. 2020. Performance of a zero-inertia model for irrigation with rapidly varied inflow discharges. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13(2), 175-181.

35. Maldonado, T. 2007. Unidad: diseño de métodos de riego superficial por gravedad. Texto guía. Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Carrera de Ingeniería Agrícola. Loja, Ecuador.

36. Merriam, J.L. and keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation. A guide for management Utah State University, Logan, 285 p.

37. Morábito, J.A. 2003. Desempeño del riego por superficie en el área de riego del río Mendoza. Eficiencia actual y potencial. Parámetros de riego y recomendaciones para un mejor aprovechamiento agrícola en un marco sustentable. Tesis para optar al grado de Magister Scientiae. Universidad Nacional de Cuyo. Instituto Nacional del Agua. INTA. Cuyo, Argentina.

38. Mostafazadhefard, B. 1982. Furrow geometry and roughness under surge and continuous flow. Thesis to obtain the Master of Science in Engineering (Agriculture and Irrigation Engineering). Utah State University. Logan, USA.

39. Palma, D. 2022. Criterios de diseño y manejo en frutales: Estudio de caso. Proyecto de título, Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.

40. Philip, J.R. 1957. The theory of infiltration: 1. The infiltration equation and its solution. Soil Science, 83(5), 345-358.

41. Pushpalatha, R., Perrin, C., Le Moine, N. and Andréassian, V. (2012). A review of efficiency criteria suitable for evaluating low-flow simulations. Journal of Hydrology, 420, 171-182.

42. Rodríguez, J.A. 2007. Modelización de la fase de avance del riego por superficie. Integración de una solución de balance de volumen con redes neuronales artificiales. Memoria del período de investigación. Universidad de Sevilla, Departamento de Ciencias Agroforestales. Sevilla, España.

43. Schilardi, C. 2010. Desempeño del riego por superficie en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán superior, Mendoza. Maestría en Riego y Drenaje. Universidad Nacional de Cuyo. Instituto Nacional del Agua. INTA. Cuyo, Argentina.

44. Sepaskhah, A.R. and Bondar, H. (2002). Sw-soil and water: estimation of manning roughness coefficient for bare and vegetated furrow irrigation. Biosystems Engineering, 82(3), 351-357.

45. Smith, R. J., Raine, S. R. and Minkevich, J. 2005. Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. Agricultural Water Management, 71(2), 117-130.

46. Strelkoff, T. 1970. Numerical solution of Saint-Venant equations. Journal of the Hydraulics division, 96(1), 223-252.

47. Strelkoff, T. S. 1969. One-dimensional equations of open-channel flow. Journal of the Hydraulics Division, 95(3), 861-876.

48. Walker, W.R. and Skogerboe, G.V. 1987. Surface irrigation: theory and practice. Prentice Hall. Englewood Cliffs, USA.

49. Zúñiga, C. 1997. Determinación de los parámetros de infiltración para diseño de riego por surcos. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil Agrícola. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile.

RIEGO POR SURCOS

CRHIAM
CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS PARA LA AGRICULTURA Y LA MINERÍA
ANID/FONDAP/15130015

fiaudec
Facultad Ingeniería Agrícola

Universidad de Concepción

DISEÑO, MANEJO Y OPERACIÓN **DE RIEGO POR SURCOS**

Eduardo Holzapfel • Camilo Souto • Christian Correa • Nicole Uslar • Ricardo Matta

ISBN: 978-956-227-552-1

EDITORIAL UDEC