

Desempeño del riego por superficie del cultivo de cebolla en el valle bonaerense del río Colorado, Argentina

Propuestas para el aumento de la eficiencia de riego

Marcos Gabriel Bongiovanni

ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 71
Tesis de posgrado





UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



**DESEMPEÑO DEL RIEGO POR SUPERFICIE DEL CULTIVO DE CEBOLLA
(*Allium cepa L.*) EN EL VALLE BONAERENSE DEL RÍO COLORADO,
ARGENTINA. PROPUESTAS PARA EL AUMENTO DE LA EFICIENCIA DE
RIEGO**

AUTOR

Ing. Agr. Marcos Gabriel Bongiovanni

DIRECTOR

Dr. Ing. Agr. Roberto Simón Martínez

Co - DIRECTOR

M. Sc. Ing. Agr. Carlos Schilardi

Para optar al grado de

MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

SEPTIEMBRE, 2020

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

A la Corporación de Fomento del valle bonaerense del río Colorado (CORFO) y al Consorcio Hidráulico del valle bonaerense del río Colorado.

A los productores que mediante su colaboración permitieron elaborar recomendaciones prácticas bajo condiciones locales.

A Ing. (Dr.) Roberto Simón Martínez e Ing (MSc.) Carlos Schilardi quienes guiaron este trabajo.

Al Coordinador Territorial Ing. Agr. (MSc.) Daniel Iurman y a los compañeros del INTA Hilario Ascasubi, en especial al Ing. Agr. Rolando Anze, por su destacado trabajo a campo y calidad humana.

Al Laboratorio de Suelos y Agua de la EEA Hilario Ascasubi del INTA.

Al Dr. Eduardo Bautista (USDA), Lic. Camina (UNS) e Ing. Lucas Díaz (INTA) por la calidad de sus aportes.

A mi familia y amigos, quienes supieron acompañar este proceso.

RESUMEN

La cebolla es el cultivo hortícola de mayor relevancia del valle bonaerense del río Colorado (Argentina) y el principal demandante de agua. Durante los últimos diez años, la escasa acumulación de nieve en la cordillera redujo la disponibilidad y calidad del agua de riego. El objetivo de este trabajo fue caracterizar el riego por superficie de cebolla, calificar su desempeño actual y potencial a través de indicadores y detectar los puntos críticos sobre los cuales proponer alternativas de manejo que aumenten la eficiencia de riego. En la campaña 2015 - 2016 se realizaron 30 evaluaciones de riego, abarcando homogéneamente el ciclo de cultivo y la superficie del valle. Se utilizó el software WinSRFR 4.1.3 para modelar el riego. Según los resultados obtenidos la eficiencia de conducción interna es 85% y la eficiencia de distribución 86%. Por su parte, la eficiencia de aplicación actual promedio es 30% y la eficiencia de aplicación razonable al método 46%, con incrementos a medida que avanzan las etapas de cultivo. Durante la emergencia y establecimiento, el cultivo se riega antes de lo recomendado desde la perspectiva de balance hídrico, pero existen otros usos racionales del agua en ese periodo. También se destaca la fracción de lavado como un volumen beneficioso para la sostenibilidad del sistema. Según los escenarios de optimización, la eficiencia de aplicación podría aumentar en términos absolutos un 16% para las condiciones del día del riego y 26% bajo un manejo potencial del método. Esto, mediante prácticas de manejo a campo que no requieren inversión, como el aumento del caudal unitario por reducción del frente de riego o el ingreso en turnados y la disminución del tiempo de aplicación. A través de las mejoras propuestas, podría reducirse entre 31 y 45% las hectáreas de concesión necesarias por hectárea de cebolla cultivada.

Palabras clave: cebolla, riego por superficie, indicadores de desempeño, eficiencia de riego, valle bonaerense del río Colorado.

ABSTRACT

Onion is the most important horticultural crop in the Colorado river valley of Buenos Aires (Argentina) and the main demand for water. During the last ten years, the low accumulation of snow in the mountain range reduced the availability and quality of irrigation water. The objective of this work was to characterize irrigation by onion surface, qualify its current and potential performance through indicators and detect critical points on which to propose management alternatives that increase irrigation efficiency. In the 2015 - 2016 campaign, 30 irrigation evaluations were carried out, homogeneously covering the cultivation cycle and the valley surface. WinSRFR 4.1.3 software was used to model irrigation. According to the results obtained, the internal conduction efficiency is 85% and the distribution efficiency is 86%. For its part, the current average application efficiency is 30% and the reasonable application efficiency to the method 46%, with increases as the cultivation stages progress. During emergence and establishment, the crop is watered earlier than recommended from a water balance perspective, but there are other rational uses of water in that period. The washing fraction is also highlighted as a beneficial volume for the sustainability of the system. According to the optimization scenarios, the application efficiency could increase in absolute terms by 16% for the conditions of the irrigation day and 26% under a potential management of the method. This, through field management practices that do not require investment, such as increasing the unit flow rate by reducing the irrigation front or entering in turns and reducing the time of application. Through the proposed improvements, the necessary concession hectares per hectare of cultivated onion could be reduced by between 31 and 45%.

Keywords: onion, surface irrigation, performance indicators, irrigation efficiency, Colorado river valley of Buenos Aires.

LISTA DE ABREVIATURAS

$\overline{d} \left(\frac{1}{4}\right)$	lámina infiltrada promedio en el cuarto más perjudicado (mm)
\bar{d}	lámina infiltrada promedio (mm)
a	coeficiente que representa la velocidad de infiltración a $t=1$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-(1+b)}$)
a	ordenada al origen de la ecuación de receso
AD	adecuación de riego
ADT	agua disponible total (mm)
Ae	área de la elipse
AFA	agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm)
At	área de un trapecio
Atr	área de un triángulo
AU	agua útil (mm)
b	exponente sin dimensiones de la ecuación de velocidad de infiltración (0 a -1)
B	límite del error de muestreo para la confiabilidad que fija z
c	cantidad de agua almacenada en las grietas iniciado el riego
C	coeficiente según textura, de la ecuación de caudal máximo no erosivo
Carc	contenido de arcilla (%)
CEem	conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo máximo permisible si se pretende obtener el rendimiento potencial del cultivo ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
CEes	conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
CEesf	conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo final, luego del ciclo de riego ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
CEesi	conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo inicial del ciclo de riego ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
CEi	conductividad eléctrica del agua de riego ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)
ct	sistema de entrega de agua con turnos
d	lámina de riego (mm)
D	profundidad de suelo explorado por las raíces del cultivo (mm)
d_1	lámina de agua en el suelo antes del riego (mm)
d_2	lámina de agua en el suelo después del riego (mm)
db	lámina bruta aplicada (mm)
$dbopt$	lámina bruta optimizada de manejo potencial (mm)
$dboptr$	lámina bruta optimizada razonable al método (mm)
$dboptm$	lámina bruta óptima para el día del riego (mm)
$dboptmr$	lámina bruta óptima para el día del riego razonable al método (mm)
db_s	lámina para satisfacer las necesidades de los cultivos y el lavado de sales (mm)
dc	lámina consumida (mm)
d_{inf}	lámina infiltrada (mm)
dp	lámina percolada (mm)
d_{per}	lámina necesaria para lixiviar sales (mm)
d_{pmp}	lámina de agua en el suelo en Punto de Marchitez Permanente (mm)
dr	lámina de reposición u objetivo (mm)
$dropt$	lámina de reposición óptima en la profundidad radicular (mm)

<i>dropt0 -50</i>	lámina de reposición óptima para la profundidad 0 - 50 (mm)
DUIq	eficiencia de distribución o uniformidad de riego
E ₁	etapa 1 de desarrollo de cultivo
E ₂	etapa 2 de desarrollo de cultivo
E ₃	etapa 3 de desarrollo de cultivo
EAP	eficiencia de aplicación actual (%)
EAP _M	eficiencia de aplicación potencial según el manejo del método de riego (%)
EAP _{Mr}	eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (%)
EAP _m	eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (%)
EAP P _{mr}	Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable
EAP _r	Eficiencia de aplicación razonable para el método de riego (%)
EAP _s	eficiencia de aplicación potencial del riego según el balance salino (%)
ECI	eficiencia de conducción interna (%)
EDIq	eficiencia de distribución del cuarto más perjudicado (%)
Ep	escurrimiento al pie (%)
ERI	eficiencia de riego interna (%)
ETc	evapotranspiración del cultivo (mm, mm. día ⁻¹ o mm.año ⁻¹)
ETx	evapotranspiración máxima (mm. día ⁻¹)
<i>f</i>	eficiencia de lavado
<i>fc</i>	fracción de agua consumida
<i>Fn</i>	familia de infiltración
<i>fo</i>	velocidad de infiltración básica (m ³ .m ⁻¹ .min ⁻¹)
<i>Fr</i>	frecuencia de riego (días)
<i>g</i>	aceleración de la gravedad (9,81 m.s ⁻²)
<i>gs</i>	geometría de surcos
<i>h</i>	carga hidráulica (m)
<i>I</i>	velocidad de infiltración (mm. min ⁻¹ o mm.h ⁻¹)
<i>Ib</i>	velocidad de infiltración básica (mm.h ⁻¹)
ICUC	coeficiente de uso consuntivo de riego
<i>Icum</i>	infiltración acumulada para el tiempo t (mm)
<i>Icum aj</i>	infiltración acumulada ajustada en un tiempo t (mm)
IE	eficiencia de riego (%) (Burt, 1997)
IS	índice de Sagacidad de riego (%)
<i>K</i>	coeficiente de gasto
Kc	coeficiencia de cultivo
Ky	factor de respuesta del rendimiento al agua
<i>L</i>	longitud de la melga o de la unidad de riego (m)
<i>Mh</i>	peso del recipiente más la muestra de suelo húmedo (g)
MO	contenido de materia orgánica (%)
<i>Mr</i>	peso del recipiente (g)
<i>Ms</i>	peso del recipiente más la muestra de suelo seco (g)
<i>n</i>	coeficiente de rugosidad de Manning.

<i>n</i>	número de muestras tomadas de la población bajo estudio
<i>n</i>	días que media entre los muestreos de humedad para el cálculo de d_1 y d_2
<i>P</i>	perímetro mojado (m)
<i>p</i>	factor de agotamiento de la humedad del suelo [0 - 1]
<i>pcuadro22</i>	factor de agotamiento de referencia (cuadro 22, FAO 56)
<i>PP</i>	precipitación (mm) o precipitaciones (mm. año ⁻¹)
<i>Pp</i>	percolación profunda (%)
<i>Q</i>	caudal (litros. s ⁻¹ o m ³ .s ⁻¹)
<i>Qc</i>	caudal de ingreso en bocatoma o compuerta (L. s ⁻¹)
<i>Qm</i>	caudal de manejo en acequia (L. s ⁻¹)
<i>qmáx</i>	caudal máximo no erosivo (L/s)
<i>qu</i>	caudal unitario (L. s ⁻¹ . m ⁻¹)
<i>qumáx</i>	caudal unitario máximo no erosivo (L. s ⁻¹ . m ⁻¹)
<i>qumín</i>	caudal unitario mínimo (L. s ⁻¹ . m ⁻¹)
<i>qumr</i>	caudal unitario optimizado para el día del riego bajo un manejo razonable
<i>r</i>	exponente empírico que toma valores menores a 1.
<i>r_a</i>	coeficiente de densidad de enrizamiento
<i>RL</i>	fracción de lavado
<i>s</i>	coeficiente hidrodinámico del suelo
<i>ś</i>	pendiente de la ecuación de receso
<i>S</i>	desviación típica muestral, utilizada como estimador de la desviación típica poblacional.
<i>Sec</i>	sección resultante del producto del ancho y apertura de la compuerta (m ²)
<i>So</i>	pendiente longitudinal del terreno (m.m ⁻¹ o %)
<i>st</i>	sistema de entrega de agua sin turnos
<i>Sup</i>	superficie (m ²)
<i>t</i>	tiempo de infiltración (min u hora).
<i>tap</i>	tiempo de aplicación o corte (min o s)
<i>tav</i>	tiempo de avance (min).
<i>tc</i>	tiempo de contacto entre el agua y el suelo
<i>to</i>	tiempo de oportunidad de riego
<i>V</i>	velocidad (m.s ⁻¹)
<i>v_{0.2}</i>	velocidad a 20% de la profundidad (h) desde el pelo de agua (m ³ .s ⁻¹)
<i>v_{0.6}</i>	velocidad a 60% de la profundidad (h) desde el pelo de agua (m ³ .s ⁻¹)
<i>v_{0.8}</i>	velocidad a 80% de la profundidad (h) desde el pelo de agua (m ³ .s ⁻¹)
<i>V_m</i>	velocidad media vertical (m ³ .s ⁻¹)
<i>Vol</i>	volumen de agua (litros)
<i>w</i>	ancho de la unidad de riego (m)
<i>W</i>	contenido de humedad (g%g)
<i>Wcc</i>	contenido de humedad a capacidad de campo (g%g)
<i>x</i>	distancia alcanzada por el frente de agua a tiempo t, (m).
<i>x_r</i>	distancia retrocedida por el frente de agua a tiempo t, (m).
<i>Ya</i>	rendimiento real

Y_x	rendimiento máximo
z	percentil de la distribución normal. Para un 95 % de confiabilidad $z = 1,96$
Z	volumen infiltrado por unidad de longitud en tiempo de oportunidad t , de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis ($m^3 m^{-1} min^{-1}$).
$\theta-1500$ (<i>pmp</i>)	punto de Marchitez Permanente (%)
$\dot{\rho}$	coeficiente empírico que representa la distancia que avanza el frente del agua en el primer minuto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Superficie por zona productora de cebolla de Argentina para la campaña 2017/18. Fuente: Áreas de Economía, Extensión y Horticultura - INTA Hilario Ascasubi	1
Figura 2. Valle bonaerense del río Colorado (VBRC)	2
Figura 3. Curso del río Colorado, Argentina	3
Figura 4. Mapa de texturas de suelos del valle bonaerense del río Colorado (Winschel, 2017).....	4
Figura 5. Nivel (cota) del embalse Casa de Piedra (La Pampa). Fuente: CORFO.....	6
Figura 6. Riego de cebolla por surcos en el valle bonaerense del río Colorado.....	8
Figura 7. Riego de cebolla por melgas en el valle bonaerense del río Colorado.....	8
Figura 8. Estadios fenológicos de cebolla según Voss (1979) y fases o etapas en el cultivo de cebolla para bulbo establecidas por Cely Reyes (2010). El período establecido corresponde para la cebolla de días largos cultivada en el VBRC. Fuente: elaboración propia.....	14
Figura 9. Evolución del coeficiente de cultivo (Kc) de cebolla en el VBRC (Sánchez, 2013).....	16
Figura 10. Fases que componen un evento de riego por superficie (FAO, 2001).....	22
Figura 11. Perfil de humedecimiento según el tiempo de oportunidad de riego (FAO, 2001).....	22
Figura 12. Rendimiento relativo expresado como función de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CEes).....	31
Figura 13. Relación entre el coeficiente hidrodinámico del suelo y su textura (Noreno, 1976, mencionado por Grassi, 1998).....	36
Figura 14. Área de riego del valle bonaerense del río Colorado e intendencias de riego (Fuente: CORFO)	45
Figura 15. Aforo de compuertas libres (a) y ahogadas (b) durante las evaluaciones de riego.....	47
Figura 16. Compuerta libre (a) y compuerta ahogada o sumergida (b).....	47
Figura 17. Medición de la velocidad de circulación del agua en acequia con Molinete de hélice Global Water.....	48
Figura 18. Medición a campo de la carga hidráulica de los sifones de riego mediante regla y manguera de nivel.....	49
Figura 19. Aforo volumétrico de los sifones de riego en la EEA Hilario Ascasubi del INTA	50
Figura 20. Agua derivada a la parcela mediante boquetes sobre la acequia de riego.	50
Figura 21. Ensayo de infiltración a campo con el Doble Anillo de Munz en un lote de cebolla regado por surcos.	51
Figura 22. Estaciones de avance y receso del frente de agua en cebolla regada en surcos.	52
Figura 23. Estaciones de avance y receso del frente de agua en cebolla regada en melgas.	52
Figura 24. Estudio de la pendiente en un lote de cebolla regadas por surcos mediante nivel de anteojo marca Pentax AL -321 32x.	52
Figura 25. Medición a campo de largo y ancho de la unidad de riego bajo estudio con cintas métricas.	53
Figura 26. Toma de muestras de suelo con barreno helicoidal	54
Figura 27. Análisis de textura por el método de Bouyoucus en el laboratorio de Suelo y Agua de la Estación Experimental Hilario Ascasubi del INTA.	55

Figura 28.Etapas de desarrollo del cultivo de cebolla de días largos para bulbo en VBRC, definidas para el estudio. ¿Se debe indicar que es elaboración propia?	56
Figura 29.Localización de las evaluaciones de riego dentro del área de estudio.	73
Figura 30.Fase de desarrollo (etapas de cultivo) y perfil de suelo explorado por las raíces (D) según etapa de cultivo.	75
Figura 31.Clase textural de las parcelas evaluadas según intendencia de riego.....	76
Figura 32.Salinidad media del agua de riego (CEi) y error estándar para la estación primavera (P) y verano (V).....	80
Figura 33.Salinidad media del agua de riego y error estándar para cada caso bajo estudio y etapa de cultivo.	80
Figura 34. Salinidad media mensual del agua de riego del VBRC para el periodo 2013 – 2019. Fuente: CORFO.....	81
Figura 35.Precipitaciones mensuales históricas y para la campaña 2015 – 2016. Fuente: Estación meteorológica Hilario Ascasubi.....	81
Figura 36.Ecuación de infiltración promedio para el total de ensayos con el Doble Anillo de Munz.	82
Figura 37.Distance avanzada por el frente de agua en riego por superficie de cebolla para distintos tiempos en el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado.....	84
Figura 38.Distance avanzada por el frente de agua en riego por superficie de melgas de cebolla para distintos tiempos en el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado.	84
Figura 39.Distance avanzada por el frente de agua en riego por superficie de surcos de cebolla para distintos tiempos en el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado.	85
Figura 40.Distance retrocedida por el frente de agua en riego por superficie de cebolla para distintos tiempos en el área irrigada del valle bonaerense del río Colorado.	86
Figura 41.Distance retrocedida por el frente de agua en riego por superficie de melgas de cebolla para distintos tiempos en el área irrigada del valle bonaerense del río Colorado.	86
Figura 42.Distance retrocedida por el frente de agua en riego por superficie de surcos de cebolla para distintos tiempos en el área irrigada del valle bonaerense del río Colorado.	87
Figura 43. Sección transversal de surco promedio para los casos bajo estudio.	90
Figura 44.Curvas de gasto – carga de los sifones de riego utilizados para el riego de cebolla.....	94
Figura 45.Caudal unitario (<i>qu</i>) registrados en melgas y en surcos.....	95
Figura 46.Diagrama de densidad de puntos para los tiempos de aplicación (<i>tap</i>) registrados en melgas y surcos.	98
Figura 47.Variación del tamaño de muestra en función del error de estimación respecto a la media para ECI, EAP y EDIq ($1-\alpha=0,95$).....	102
Figura 48.Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°19 (a) y 23 (b).....	104
Figura 49.Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°11 (a) y 18 (b).....	104
Figura 50.Eficiencia de aplicación según etapa de cultivo.....	106
Figura 51.Eficiencia de aplicación razonable para el método de riego EAP_r (%) según etapa de cultivo.	109
Figura 52.Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m) según etapa de cultivo.	110

Figura 53. Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r) y Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP_{mr}) según etapa de cultivo.	111
Figura 54. Caudal unitario (qu) y caudal unitario optimizado para el día del riego bajo un manejo razonable ($qumr$). Las evaluaciones que no poseen valor no sufrieron modificaciones.	112
Figura 55. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°7, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).	112
Figura 56. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°20, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).	113
Figura 57. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°9, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).	113
Figura 58. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°27, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).	113
Figura 59. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°21, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).	114
Figura 60. Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP_M) según etapa de cultivo.	115
Figura 61. Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r) y Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (EAP_{Mr}) según etapa de cultivo.	116
Figura 62. fracción de agua consumida (fc), factor de agotamiento (p) según FAO (Allen, 2000) y según Noreno (1976) mencionado por Grassi (1998) y evapotranspiración del cultivo (ETc) durante el desarrollo del cultivo.	124

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fechas de cada etapa fenológica y valores de Kc estimado para el cultivo de cebolla en el VBRC (Sánchez, 2013)	17
Tabla 2. Eficiencias de aplicación alcanzables por los diferentes sistemas de riego (Pereira <i>et al.</i> , 2010).....	20
Tabla 3. Familias de infiltración en riego por superficie (Walker, 2006)	27
Tabla 4. Eficiencia de lavado según distintas texturas de suelo (Van der Molen, 1973).	33
Tabla 5. Coeficientes de densidad de enraizamiento para el cálculo de umbral óptimo de riego (Grassi, 1998).	35
Tabla 6. Calificación de eficiencias de aplicación, almacenaje y distribución en parcela para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985).....	38
Tabla 7. Variables de manejo y sistema en riego por superficie.	40
Tabla 8. Número de evaluaciones efectuadas en la estación primavera y verano, desagregadas por intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.	73
Tabla 9. Número de evaluación, fase de desarrollo y profundidad de suelo explorado por las raíces (D) según etapa de cultivo.	75
Tabla 10. Valores medios y error estándar (ES) para densidad aparente (<i>Dap</i>) según textura de los suelos.....	77
Tabla 11. Valores medios y error estándar (ES) para la salinidad del extracto de saturación de suelo (<i>CEes</i>) en cabecera, medio y pie del total de lotes bajo estudio.	78
Tabla 12. Valores medios y error estándar (ES) para la salinidad del extracto de saturación de suelo (<i>CEes</i>) en las profundidades 0 - 25 y 25 - 50 del total de lotes bajo estudio.	78
Tabla 13. Valores medios y error estándar para la salinidad del extracto de saturación del suelo (<i>CEes</i>) según intendencia de riego.....	78
Tabla 14. Valores medios y error estándar (ES) para la salinidad del agua (<i>CEi</i>) según intendencias de riego.	79
Tabla 15. Valores medios y error estándar (ES) referidos a la pendiente longitudinal (<i>So</i>) según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela.	88
Tabla 16. Valores medios y error estándar (ES) referidos a longitud de la unidad de riego (<i>L</i>), según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela.	89
Tabla 17. Espaciamiento, número de surcos regados de manera simultánea y frente de riego (<i>Fr</i>) para el total de eventos de riego que regaron por surcos.....	89
Tabla 18. Ancho de melga (<i>w</i>), número de melgas regadas de manera simultánea y frente de riego (<i>fr</i>) para el total de eventos de riego que regaron por surcos.	90
Tabla 19. Valores medios y error estándar (ES) referidos a caudal en compuerta (<i>Qc</i>), según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación.....	92
Tabla 20. Valores medios y error estándar (ES) referidos a caudal de manejo en acequia (<i>Qm</i>), según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela.....	93
Tabla 21. Valores medios y error estándar (ES) referidos a carga hidráulica (<i>h</i>) en función del método de riego.	94
Tabla 22. Valores medios y error estándar (ES) referidos al caudal unitario (<i>qu</i>) según método de riego	95

Tabla 23. Valores medios y error estándar (ES) referidos al caudal unitario (<i>qu</i>) en melga según etapa de cultivo.....	96
Tabla 24. Valores medios y error estándar (ES) referidos a caudal unitario (<i>qu</i>) en melgas, según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo	97
Tabla 25. Valores medios y error estándar (ES) referidos al tiempo de aplicación (<i>tap</i>) según método de riego.....	98
Tabla 26. Valores medios y error estándar (ES) referidos a tiempo de aplicación (<i>tap</i>) según intendencia de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.....	99
Tabla 27. Valores medios y error estándar (ES) referidos a lámina bruta aplicada (<i>db</i>), lámina consumida (<i>dc</i>) y lámina percolada (<i>dp</i>) expresadas en mm, agrupadas según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, etapa de cultivo.....	101
Tabla 28. Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de muestra para ECI, EAP y EDIq ($1-\alpha = 0,95$)	102
Tabla 29. Valores medios y error estándar (ES) referidos a ECI (%) según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.....	103
Tabla 30. Media y error estándar (ES) de EDIq (%) según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.....	105
Tabla 31. Valores medios y error estándar (ES) para Eficiencia de aplicación (EAP) según estación del año y etapa de cultivo.....	106
Tabla 32. Valores medios y error estándar (ES) referidos a lámina bruta aplicada (<i>db</i>), lámina consumida (<i>dc</i>) expresadas en mm, y EAP (%) según etapa de cultivo y estación del año.....	107
Tabla 33. Valores medios y error estándar (ES) referidos a lámina bruta aplicada (<i>db</i>), lámina consumida 0 – 50 (<i>dc 0-50</i>) expresadas en mm, y EAP _r (%) según etapa de cultivo y estación del año.....	108
Tabla 34. Valores medios y error estándar (ES) para EAP (%) y EAP _m (%) según etapa de cultivo y estación del año.....	110
Tabla 35. Valores medios y error estándar (ES) para EAP _r (%) y EAP _{mr} (%) según etapa de cultivo y estación del año.....	111
Tabla 36. Valores medios y error estándar (ES) para EAP (%) y EAP _M (%) según etapa de cultivo y estación del año.....	114
Tabla 37. Valores medios y error estándar (ES) para EAP _r y EAP _{Mr} (%) según etapa de cultivo y estación del año.....	116
Tabla 38. Valores medios y error estándar (ES) referido a caudal unitario en L s ⁻¹ m ⁻¹ según método de riego, registrado a campo (<i>qu</i>), obtenidos bajo un manejo razonable del método en los escenarios de optimización para las condiciones del día del riego (<i>qu_{mr}</i>), las potenciales de manejo (<i>qu_{Mr}</i>) y el caudal máximo no erosivo de referencia (<i>qu_{máx}</i>)	117
Tabla 39. Valores medios y error estándar (ES) para lámina bruta aplicada (<i>db</i>), lámina bruta optimizada de manejo potencial (<i>db_{opt}</i>) y lámina bruta optimizada razonable al método de riego (<i>db_{opt_r}</i>) según etapa de cultivo y estación del año.....	118
Tabla 40. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación (EAP), Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP _m), y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia para las distintas etapas de cultivo...	119

Tabla 41. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación (EAP), Eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAPM), y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia de aplicación para las distintas etapas de cultivo.	119
Tabla 42. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r), Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP_{mr}) y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia de aplicación.	120
Tabla 43. Valores medios y error estándar referidos a Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r), Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (EAP_{Mr}) y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia.	120
Tabla 44. Hectáreas de concesión o dotación necesarias por hectárea de cebolla bajo distintos escenarios de eficiencia.	121
Tabla 45. Factor de agotamiento (p) y fracción de agua consumida (fc) según etapa de cultivo y estación.	122
Tabla 46. Valores medios y error estándar (ES) para la fracción de agua consumida (fc) según la entrega de agua sea con turnos (ct) o sin turnos (st) para las estaciones primavera y verano.	123
Tabla 47. Valores medios y error estándar (ES) para la fracción de agua consumida (fc) según la entrega de agua sea con turnos (ct) o sin turnos (st) para las etapas de cultivo.	123
Tabla 48. Valores medios y error estándar (ES) para la lámina de reposición óptima ($dropt$) según la profundidad objetivo definida en cada etapa de cultivo y $dropt_{0-50}$ calculadas a través del factor de agotamiento (p) según FAO y según Grassi, para cada etapa de cultivo y estación del año. Valores expresados en mm.	125
Tabla 49. Frecuencia de riego (Fr) óptima para cada etapa de cultivo.	126
Tabla 50. Valor medio y error estándar (ES) referido a lámina de percolación ($dper$) o altura de agua necesaria para lixiviar las sales disueltas por ciclo de cultivo de cebolla según las ecuaciones de Van der Molen (1983) y Rhoades (1992).	127
Tabla 51. Valor medio y error estándar (ES) para el requerimiento de lixiviación como lámina de percolación ($dper$) necesaria por etapa de cultivo según Van der Molen.	127
Tabla 52. Valor medio y error estándar (ES) referido a eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs) promedio para el total de casos bajo estudio, para $dper$ calculada por Rhoades y Van der Molen.	128
Tabla 53. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs) según Van der Molen para cada etapa de cultivo.	128
Tabla 54. Porcentaje del agua aplicada durante el ciclo del cultivo, discriminada por diferentes usos y eficiencia de riego parcelario (IE) e índice de sagacidad del riego (IS).	129
Tabla 55. Porcentaje del agua aplicada en cada etapa de cultivo, discriminada por diferentes usos y eficiencia de riego parcelario (IE) e índice de sagacidad del riego (IS).	129
Tabla 56. Eventos de riego evaluados durante la campaña 2015-2016.	155
Tabla 57. Caracterización de cada caso bajo estudio según las distintas variables de clasificación.	156
Tabla 58. Número de regantes, superficie bajo riego y superficie sembrada de cebolla de días largos en la campaña 2015-2016, discriminado por intendencia de riego (porcentajes expresados en paréntesis).	157
Tabla 59. Humedad gravimétrica antes y después del riego, textura y densidad aparente (Dap).	158

Tabla 60. Conductividad eléctrica del suelo ($CEes$) 0 - 25 y 25 – 50 cm y agua de riego.	159
Tabla 61. Parámetros de la ecuación de infiltración de Kostiakov (A y B), infiltración básica del suelo (I_b) y familia de infiltración según el método del Doble Anillo de Munz, el método del Doble Anillo de Munz ajustado con los datos de campo y el estimado por el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3.	160
Tabla 62. Parámetro p y r de la ecuación de avance y a y s de la ecuación de receso. .	164
Tabla 63. Pendiente (m/m), longitud de la unidad de riego (m), número de surcos o melgas regadas de manera simultánea, espaciamiento, caudal en compuerta (L/s), en acequia (L/s) y unitario (L/s/m) y tiempo de aplicación (min).	165
Tabla 64. Lámina bruta aplicada (db), lámina consumida en el perfil de suelo explorado por las raíces (dc), lámina consumida 0 -50 y lámina percolada (dp) según evaluación de riego. Todos los valores expresados en mm.	167
Tabla 65. Eficiencias de conducción interna (ECI), Eficiencia de distribución (EDI _q), Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación razonable al método de riego (EAP _r). Todos los valores expresados en porcentaje.	168
Tabla 66. Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP _m) y bajo un manejo razonable del método de riego (EAP _{mr}) y la eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP _M) y de manejo razonable (EAP _{Mr}). Todos los valores expresados en porcentaje.	169
Tabla 67. Caudal optimizado bajo las condiciones del día del riego ($qumr$), bajo las condiciones de manejo potenciales ($quMr$), ambos para un manejo razonable del método de riego y caudal máximo no erosivo ($qumáx$). Expresados en L s-1 m-1.	170
Tabla 68. Lámina bruta optimizada de manejo potencial ($dbopt$) y lámina bruta optimizada razonable al método ($dboptr$) para cada caso bajo estudio. Ambas expresadas en mm.	171
Tabla 69. Fracción de agua consumida (fc) y factor de agotamiento (p) según FAO y según Noreno.	172
Tabla 70. Lámina de reposición óptima según el perfil de suelo explorado por las raíces y para 0 – 50, según FAO y según Grassi.	173
Tabla 71. Principales problemas encontrados sobre los indicadores de desempeño y variables de manejo y sistema para cada caso bajo estudio	174
Tabla 72. Lámina de percolación ($dper$) o de lixiviación de sales para el ciclo y por etapa de cultivo según Van der Molen (1983) y Rhoades (1992).	176
Tabla 73. Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs), según el valor de $dper$ calculado por Rhoades (1992) y Van der Molen (1983) para el ciclo de cultivo.	177
Tabla 74. Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs) en cada etapa de cultivo según el caso bajo estudio.	178

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 La cebolla: producción mundial y nacional	1
1.2 El valle bonaerense del río Colorado (VBRC).	2
1.2.1 La crisis hídrica	5
1.2.2 La cebolla en el VBRC.....	6
1.3 El riego de cebolla	7
1.3.1 El riego del cultivo en el valle.....	7
1.3.2 Estudios del riego por gravedad	9
1.3 Hipótesis	10
1.4 Objetivo	10
1.4.1 Objetivo general	10
1.4.2 Objetivos específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO	1
2.1 La cebolla	13
2.1.1 Fenología del cultivo.....	13
2.1.2 Sistema radical.	14
2.1.3 Respuesta del cultivo al agua.	14
2.1.4 Frecuencia de riego	17
2.2 El riego.	18
2.2.1 El riego por superficie	20
2.2.1.1 Hidráulica del riego por superficie.....	21
2.2.1.1.1 Fases del riego por superficie.....	21
2.2.1.1.2 Velocidad de infiltración del agua en el suelo	23
2.2.1.1.3 Caudal de manejo y caudal unitario	27
2.2.1.1.4 Pendiente, longitud de la unidad de riego, tiempo de riego y número de surcos o melgas regadas de manera simultánea.	28
2.2.1.1.5 Láminas de riego	29
2.3 Salinización	30
2.3.1 Tolerancia a la salinidad.....	31
2.3.2 Fracción de lavado	32
2.4 Eficiencia de uso del agua	33
2.4.1 Oportunidad del riego.....	33
2.4.1.2 Factor de agotamiento de la humedad del suelo	34
2.4.2 Desempeño del riego	36
2.4.2.1 Eficiencia de riego e indicadores de desempeño.....	36

2.4.2.2 Variables de manejo y de sistema en riego por superficie	40
2.5 Eficiencias de aplicación potencial.	41
2.6. Modelos matemáticos de diseño y evaluación del riego por escurrimiento superficial.	41
3 METODOLOGÍA.....	45
3.1 Área de estudio.....	45
3.2 Evaluaciones a campo.....	45
3.2.1 Equipamiento	46
3.2.2 Metodología a campo	46
3.2.2.1 Aforo en compuerta.....	46
3.2.2.3 Aforo de ingreso a surcos o melgas	49
3.2.2.4 Infiltración	50
3.2.2.5 Avance y receso del frente de agua.....	51
3.2.2.6 Pendiente.....	52
3.2.2.6 Volumen de agua aplicado.....	52
3.2.2.7 Dimensiones de la unidad de riego y número de surcos o melgas regadas de manera simultánea.....	53
3.2.2.8 Muestras de suelo y agua	53
3.2.2.9 Perfil de suelo explorado por las raíces.....	54
3.3 Metodología de laboratorio.....	54
3.4 Metodología de gabinete.....	55
3.4.1 Análisis estadísticos	55
3.4.1.2 Análisis de la varianza.....	55
3.4.1.3 Estimación del error de muestreo.....	56
3.4.2 Variables explicativas o de clasificación.	56
3.4.2 Caracterización de parámetros físicos y de manejo	57
3.4.3 Láminas de riego	57
3.4.4 Indicadores de desempeño del riego.	59
3.4.4.1 Eficiencia de Conducción Interna (ECI)	59
3.4.4.2 Eficiencia de distribución (EDI _q).....	59
3.4.4.3 Eficiencia de aplicación	59
3.4.4.3.1 Eficiencia de aplicación actual (EAP).....	60
3.4.4.3.2 Eficiencia de aplicación razonable para el método de riego (EAP _r).....	60
3.4.5 Escenarios de optimización del riego.....	60
3.4.5.1 Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego.....	60
3.4.5.2 Eficiencia de aplicación potencial según el manejo del método de riego...	61
3.4.5.3 Caudales unitarios y láminas brutas optimizadas.....	62

3.4.5.4	Análisis de la concesión de agua necesaria por hectárea de cebolla bajo distintos escenarios de manejo del agua.....	63
3.4.6	Oportunidad de riego.....	63
3.4.6.1	Lámina de reposición óptima y frecuencia de riego.	65
3.4.7	Requerimientos de lixiviación de las sales en el suelo.....	65
3.4.8	Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs).....	66
2.4.9	Análisis del desempeño considerando usos benéficos y racionales.....	67
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
4.1	Evaluaciones a campo.....	73
4.2	Parámetros del cultivo.....	75
4.2.1	Perfil de suelo explorado por las raíces.....	75
4.3	Parámetros de suelo y agua.....	75
4.3.1	Textura de suelo.	75
4.3.2	Densidad aparente	76
4.3.3	Salinidad del suelo.	77
4.3.4	Salinidad del agua	79
4.3.5	Infiltración.....	82
4.4	Parámetros físicos del riego	83
4.4.1	Avance y receso	83
4.4.2	Pendiente longitudinal.....	87
4.4.3	Longitud de la unidad de riego.....	88
4.4.4	Geometría y espaciamiento entre surcos, ancho de melgas y frente de riego.....	89
4.4.5	Caudales	91
4.4.5.1	Caudal en compuerta.....	91
4.4.5.2	Caudal de manejo en acequia.....	93
4.4.5.3	Caudal de los sifones de riego.....	93
4.4.5.4	Caudal unitario	95
4.4.6	Tiempo de aplicación	97
4.4.7	Láminas de riego	99
4.5	Indicadores de desempeño	101
4.5.1	Estimación de error de muestreo para ECI, EAP y EDI _q	101
4.5.2	Eficiencia de Conducción Interna (ECI)	102
4.5.3	Eficiencia de distribución (EDI _q).	103
4.5.4	Eficiencia de aplicación	105
4.5.4.1	Eficiencia de aplicación actual (EAP).....	105
4.5.4.2	Eficiencia de aplicación razonable al método de riego (EAP _r).....	107
4.6	Escenarios de optimización del riego.	109

4.6.1 Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP _m).....	109
4.6.2 Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP _{mr})	111
4.6.3 Eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP _M).....	114
4.6.4 Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (EAP _{Mr})	115
4.6.5 Caudales unitarios optimizados.....	117
4.6.6 Láminas brutas optimizadas	118
4.6.7 Incrementos absolutos y relativos de eficiencia alcanzados mediante los escenarios de optimización.....	118
4.6.8 Hectáreas de concesión necesarias por hectárea de cebolla bajo distintos escenarios de manejo del agua.	121
4.7 Oportunidad de riego	122
4.7.1 Lámina de reposición óptima y frecuencia de riego.	125
4.8 Principales inconvenientes encontrados en el manejo del agua de riego.....	126
4.9 Requerimientos de lixiviación de sales del suelo	126
4.9.1. Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs).....	128
4.10 Análisis del desempeño considerando usos benéficos y racionales.....	128
5. CONCLUSIONES.	133
6. RECOMENDACIONES	137
7. BIBLIOGRAFÍA.	141
8. ANEXO.....	155
8.1 Evaluaciones de riego.	155
8.1.2 Fecha y ubicación geográfica.....	155
8.1.3 Caracterización según las variables de clasificación.....	155
8.2. Número de regantes, superficie bajo riego y superficie sembrada de cebolla	157
8.3 Parámetros físicos de suelo y agua	158
8.3.1 Humedad, textura y densidad aparente	158
8.3.2 Conductividad eléctrica de suelo y agua.	159
8.3.3 Infiltración.....	160
8.4 Parámetros físicos del riego por superficie.....	164
8.4.1 Avance y receso.	164
8.4.2 Pendiente, longitud, número de surcos o melgas regadas de manera simultánea, espaciamiento, caudales y tiempo de aplicación.	165
8.4.3 Láminas de riego	167
8.5 Indicadores de desempeño del riego.....	168
8.5.1 Eficiencia de Conducción Interna, Eficiencia de distribución, Eficiencia de aplicación y Eficiencia de aplicación razonable al método de riego.....	168
8.6 Desempeño potencial del riego.....	169

8.6.1 Eficiencias de aplicación máxima alcanzable el día del riego y potencial de manejo.	169
8.6.2 Caudales unitarios optimizados.....	170
8.6.3 Láminas brutas optimizadas	171
8.7.1 Láminas de reposición óptimas.....	173
8.8 Inconvenientes detectados en cada caso bajo estudio.....	174
8.9 Fracción de lixiviación.....	176
8.10 Eficiencia de aplicación potencial según balance salino.....	177

INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 La cebolla: producción mundial y nacional

La producción mundial de cebolla para bulbo es de aproximadamente 88 millones de toneladas. Según FAO, en 2014 se cosecharon 5 millones de hectáreas y el rendimiento promedio para el quinquenio 2010-2014 fue de 18 t/ha. De esta manera, la cebolla se posiciona entre las hortalizas con mayor superficie cosechada, sólo superada por la papa y el tomate. La producción de América del Sur representa el 9% de la producción mundial (Jaldo, 2017). Actualmente Argentina registra una superficie cultivada con cebolla de aproximadamente 18 mil hectáreas y una producción de 700.000 toneladas anuales. Este cultivo posee una distribución agroecológica en distintas zonas del país (Figura 1) y representando alrededor del 20% del total de las exportaciones argentinas de hortalizas frescas. El 70% de la superficie cultivada del país se siembra en la zona sur, puntualmente en el valle bonaerense del río Colorado (Jurman, 2018).



Figura 1. Superficie por zona productora de cebolla de Argentina para la campaña 2017/18.

Fuente: Áreas de Economía, Extensión y Horticultura - INTA Hilario Ascasubi

La zona Norte está representada por Santiago del Estero, la zona Centro por Mendoza y San Juan y la zona Sur por Buenos Aires y Río Negro. Estas zonas productoras y otras de menor relevancia, permiten ofrecer el producto en el mercado la mayor parte del año. La zona Norte, con variedades de ciclo corto y un rendimiento de 18-20 t.ha⁻¹, ingresa al mercado local entre los meses de septiembre y noviembre. La región Centro, con variedades de ciclo intermedio y largo y un rendimiento de 25 a 40 t.ha⁻¹, oferta de octubre a febrero. La región Sur con variedades de días largos (INTA Valcatorce y Grano de oro) y un rendimiento de 40-50 t.ha⁻¹, oferta de enero a agosto. Allí se concentra la mayor superficie cultivada de cebolla del país, y es la zona de producción con destino a exportación. A excepción de la zona Norte, el rendimiento promedio de las restantes zonas se encuentra por encima de la media mundial, duplicada en la zona Sur. (Jurman, 2012; Jaldo, 2017).

1.2 El valle bonaerense del río Colorado (VBRC).

El VBRC es una zona productora de alimentos ubicada en el extremo sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Se encuentra entre los 39° y los 40° de latitud sur y entre los 62° y 63° de longitud oeste. Abarca el área sur del partido de Villarino y el área norte del partido de Patagones (Figura 2). Posee un desarrollo de norte a sur de 78 kilómetros y 103 kilómetros de oeste a este. La zona comprende las localidades de Mayor Buratovich, Hilario Ascasubi y Pedro Luro, dentro del partido de Villarino y las de Juan A. Pradere, Igarzábal y Villalonga, en Patagones.



Figura 2. Valle bonaerense del río Colorado (VBRC)

El río Colorado nace en la Cordillera de los Andes de la unión de los ríos Barranca y Grande y cruza la provincia de Buenos Aires de Oeste a Este, en el límite de los partidos de Villarino y Patagones, donde riega por gravedad el área más extensa de su curso para desembocar luego en el mar (Figura 3). Se trata de un río compartido por cinco provincias: Mendoza, Neuquén, La Pampa, Río Negro y Buenos Aires. Esta cuenca desde el año 1976 cuenta con un acuerdo interprovincial, donde se establecen tanto la distribución de los caudales, como las asignaciones de áreas a regar y los parámetros de calidad a respetar. También en ese mismo acuerdo se creó el COIRCO (Comité Interjurisdiccional del río Colorado) para asegurar el cumplimiento del acuerdo.

De las 535.000 ha que posee el VBRC, 140.000 se encuentran empadronadas con concesión de riego, regándose efectivamente durante las últimas campañas cerca de 100.000 ha (Lucanera *et al.*, 2018). Casi el total la superficie se riega mediante sistemas tradicionales de riego por superficie o gravedad, sin pendiente y sin desagüe al pie (Sánchez, 2013).

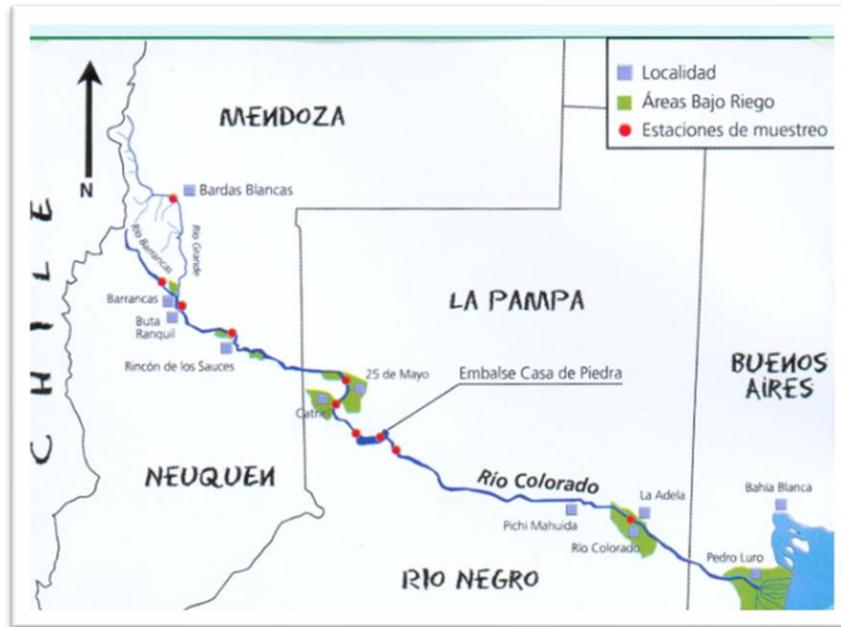


Figura 3. Curso del río Colorado, Argentina

El clima del VBRC se caracteriza por fuertes vientos, bajas temperaturas (con una temperatura media anual de $14.8\text{ }^{\circ}\text{C}$) y escasa humedad. Se prestan veranos con alta demanda hídrica e inviernos rigurosos, con un período libre de heladas de 200 a 260 días. El viento predominante es del Noroeste, con una velocidad promedio de 27 km/h . Agosto es el mes que registra mayores velocidades del viento (Sánchez *et al.*, 1998). El régimen hídrico de la región se caracteriza por la irregularidad de las precipitaciones, oscilando entre 680 y 280 mm con una media de 490 mm anuales (Cepeda y Zura, 2018), siendo las estaciones húmedas el otoño y la primavera. Con respecto a los suelos, la presencia del río Colorado ha dado lugar a la formación de distintos tipos de suelos debido a la acumulación de materiales en los sucesivos cauces que ha desarrollado. No obstante, se pueden apreciar ciertas tendencias en cuanto a determinados tamaños de partículas. En el plano de inundación del río Colorado la textura más común es franca a franca arenosa (Figura 4) (Winschel, 2017). También existe una terraza baja marina, la cual confluye con la terraza aluvial generada por el río (Sánchez *et al.*, 1998).

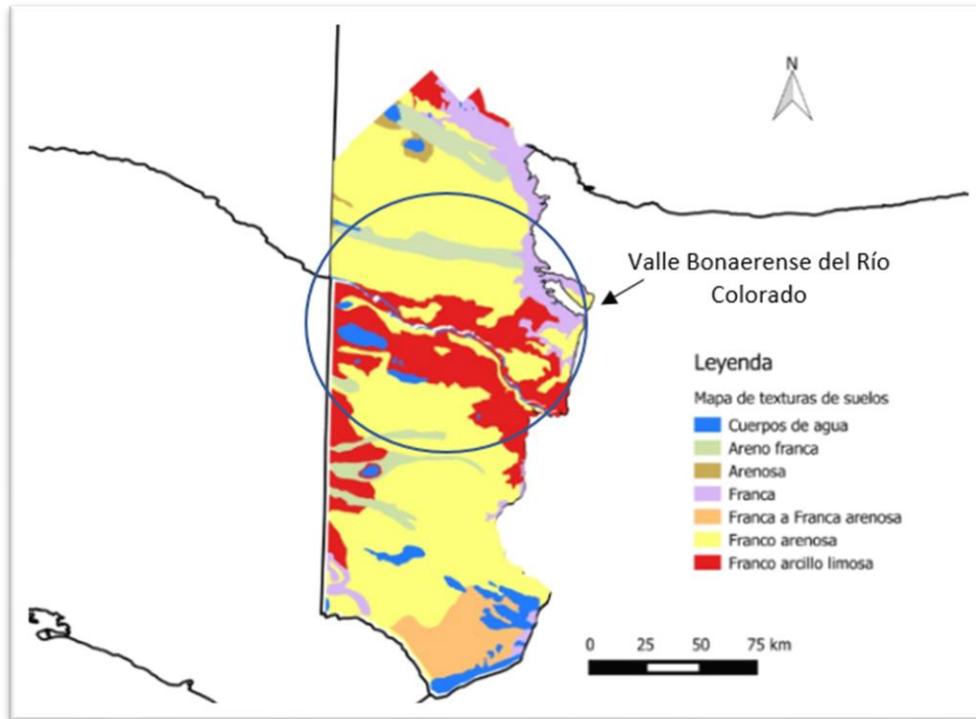


Figura 4. Mapa de texturas de suelos del valle bonaerense del río Colorado (Winschel, 2017)

El área posee un relieve llano, con gran parte de la superficie sistematizada para riego gravitacional. La pendiente general del área se manifiesta de Oeste a Este a partir de la cota de los 30 m a menos de 10 m sobre el nivel del mar, en una distancia de 80 km. Esto trae aparejados problemas de drenaje debido a la baja velocidad del agua del subsuelo en los desagües. El nivel del plano freático es de 1,2 a 1,4 m de profundidad, lo que puede generar procesos de degradación por salinización. Por otro lado, muchos de estos suelos han sido sometidos a excesivos riegos. Aquellos que no tuvieron una adecuada red de drenaje presentaron problemas de salinización (Sánchez *et al.*, 1998).

El desarrollo productivo de la zona data de principios de 1900, época en que se comienza a expandir la producción agropecuaria, predominando la ganadería y la agricultura extensiva. Se construyeron canales de riego y se realizaron las primeras experiencias con cultivos intensivos. Entre 1940 y 1960 comenzó a cobrar importancia la producción frutihortícola y aumentó el área bajo riego. En 1960 se creó la Corporación de Fomento del Valle Bonaerense del Río Colorado (CORFO Río Colorado), con el objeto fomentar el desarrollo integral de la región. Entre sus funciones tiene la de poder concedente de los derechos de riego, la de operar y mantener la red principal de riego y drenaje y supervisar, con poder de policía e intervención de los consorcios de riego, la operación y mantenimiento de la red secundaria y terciaria de riego y drenaje (Aragón, 2018). Con esta institución, se construyeron y habilitaron los sistemas de drenaje para enfrentar el proceso de salinización de los suelos y se desarrollaron acciones orientadas a promover el desarrollo integral del valle (Barbero, 2006).

CORFO, es un organismo descentralizado de la Provincia de Buenos Aires y tiene jurisdicción sobre el total de hectáreas de los distritos de Villarino y Patagones que forman el VBRC. Como ente autónomo encargado de la administración y manejo del agua de riego, otorga un permiso de uso del recurso que se expresa en hectáreas de concesión, donde una hectárea representa una dotación o caudal medio de $0,4 \text{ litros} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$, aunque esta dotación es variable durante la

temporada de riego según la oferta y demanda de agua. De acuerdo a las estadísticas para el periodo 2012 – 2018, la derivación anual media para riego a la región es de 1316 Hm³. Si se consideran las pérdidas en la red primaria (20%) y secundaria (20%) se entrega cada campaña alrededor de 7890 m³/hectárea de riego. El agua de riego posee una concentración salina promedio para las campañas de riego 2012 a 2019 de 1,43 dS.m⁻¹ y se asigna por hectárea de concesión de riego de manera continua o por turnados. El área de riego está dividida en tres intendencias: Intendencia de riego Mayor Buratovich, posee una extensión de la red de riego de 141 km y 56.883 hectáreas bajo riego; Intendencia de riego de Pedro Luro, posee una extensión de la red de riego de 88 km y 45.623 hectáreas bajo riego; Intendencia de riego Villalonga, posee una extensión de la red de riego de 79,6 km y 33.844 hectáreas bajo riego. El número de regantes total es de 1283 y son 162 los consorcios de riego (Aragón, 2018).

En el año 2007 se crea el Consorcio Hidráulico del Valle Bonaerense del río Colorado, que es una entidad pública, no estatal, integrada por la totalidad de los usuarios del sistema de riego, con el objeto de prestar los servicios relativos a la construcción, mantenimiento y administración de las obras de riego y drenaje necesarias para el uso sustentable del agua en la región. Los consorcios son entidades que ayudan al estado a realizar tareas de operación y mantenimiento de los sistemas de riego a largo plazo, además de propiciar la participación del usuario en la gobernabilidad de los mismos, haciendo que aumente el grado de equidad y transparencia (Aragón, 2018).

La zona agrícola presenta actualmente un modelo productivo en el que se combinan actividades intensivas como horticultura, fruticultura y producción de semillas con actividades extensivas de cereales y ganadería. La cebolla constituye el producto que mayor aporte realiza a la generación de riqueza del lugar y su producción creció durante las décadas pasadas por la demanda desde Brasil a partir de la instrumentación del MERCOSUR y por la aparición de formas asociativas, como la mediería o aparcería, ligadas a los flujos inmigratorios del norte. Otros cultivos como el tomate, el ajo, el morrón y el zapallo acompañaron el proceso de desarrollo regional, pero ninguno alcanzó la rapidez y la importancia de la cebolla (Barbero, 2006). La expansión del cultivo de cebolla y su demanda laboral ha sido el principal motivo del fuerte crecimiento poblacional en sus principales localidades. La migración fue de tipo familiar, con una tendencia creciente a la radicación permanente alrededor de los pueblos y en las zonas rurales de Predro Luro y Juan A. Pradere (en general de origen boliviano) y solteros y/o trabajadores individuales que vienen en los períodos de mayor trabajo, donde también se combinan trabajadores del norte argentino (salteños, santiagueños) y en menor medida paraguayos (Gorestein, 2006).

1.2.1 La crisis hídrica

El VBRC alcanzó a regar cerca de 140.000 ha, casi en su totalidad mediante sistemas gravitacionales (Sánchez, 2013). Sin embargo, durante los últimos años el cambio climático ha tenido gran impacto en la acumulación de nieve en la cordillera argentina, afectando de manera directa al río Colorado que es régimen nival, es decir, su caudal depende exclusivamente de los aportes de las nevadas invernales en la cuenca alta, localizada en la cordillera de los Andes al sur de Mendoza y al norte de Neuquén (Aragón, 2018). Como consecuencia, durante los últimos diez años el río no ha superado los 80 m³.s⁻¹ muy por debajo de su caudal medio histórico de 145 m³.s⁻¹ (Aragón, 2018). Esta situación se refleja en el nivel del lago Casa de Piedra, único regulador que posee el río (Figura 5).

Durante las últimas campañas de riego se redujo la disponibilidad y calidad del agua de riego que recibe el VBRC (Sánchez, 2013). Así, la superficie regada en el valle disminuyó de 140.000

a 100.000 hectáreas en las últimas campañas y se estima una superficie regada para la campaña 2019 – 2020 de alrededor de 80.000 hectáreas (Aragón, 2019). Por su parte, la superficie de cebolla también se redujo: con un promedio 11.000 hectáreas y habiéndose sembrado en el valle hasta 18.000 mil hectáreas, actualmente la superficie ronda las 9.000 hectáreas (Lucanera, 2018).

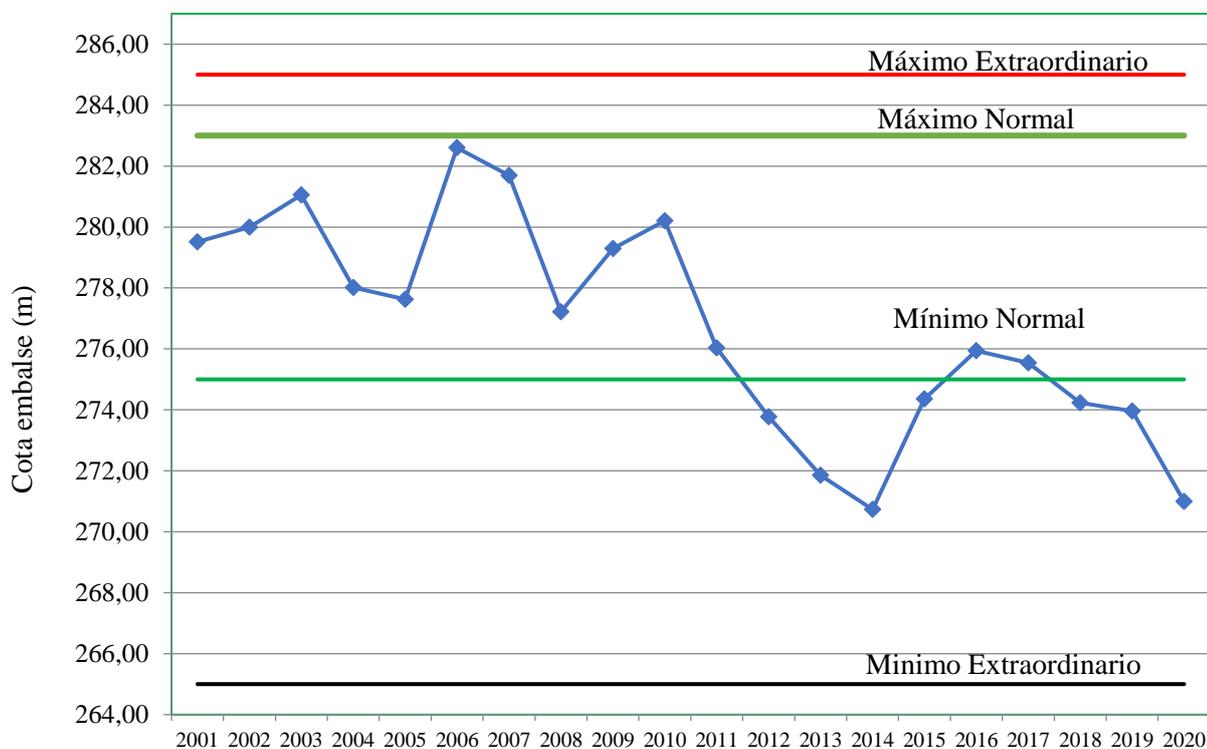


Figura 5. Nivel (cota) del embalse Casa de Piedra (La Pampa). Fuente: CORFO.

1.2.2 La cebolla en el VBRC

El cultivo de la cebolla en el valle tuvo sus inicios a fines de los años 70, y a partir de entonces mostró un desarrollo continuo, debido a las excelentes condiciones agroecológicas, a la infraestructura de riego, a la época de cosecha, a la posibilidad de conservación y a la disponibilidad de mano de obra, convirtiéndose en el principal cultivo intensivo del valle. La expansión, en términos de superficie cultivada, producción y productividad, fue en los años 90, por la demanda desde Brasil y la aparición de formas asociativas, como la mediería o aparcería, ligadas a los flujos inmigratorios del norte (Barbero, 2006; Gorestein, 2006; Picardi *et al.*, 2007). La aparición de estas formas asociativas sustituyó la contratación a cambio de un jornal por la aparcería, donde el propietario de la tierra cede la misma para su uso y los insumos y el aparcerero se compromete a la realización de las labores, repartiendo el producto resultante entre ambas partes para que posteriormente cada una de ellas la comercialice. Otra forma asociativa alternativa a la aparcería es la mediería, donde una parte es responsable del aporte de la tierra y la otra del trabajo y capital necesarios para la producción (Barbero, 2006).

Actualmente se siembran cada año entre 9.000 y 10.000 ha de este cultivo para consumo en fresco, aunque se han llegado a sembrar hasta 18.000 ha (Lucanera, 2018).

Las ventas a Brasil han representado entre el 30 y 50% de la producción local, mientras que las colocaciones en mercados europeos han oscilado entre el 6 y un 10% y el resto de la producción se ha canalizado al mercado interno (Gorestein, 2006). Durante los últimos años la zona produce para el mercado interno y un excedente de entre 70 y 100 mil toneladas anuales, se exporta a Brasil. Sin embargo, la mayor producción en el vecino país y la competencia con la cebolla europea en el mercado brasilero han disminuido las exportaciones (Iurman, 2018).

En el VBRC la cebolla se maneja como un cultivo anual que se inicia por semilla y se cosechan los bulbos como órgano de consumo. Los rendimientos medios oscilan entre 30.000 y 75.000 kg ha⁻¹ (Caracotche y García, 2009).

Entre los productores de cebolla se pueden encontrar distintos perfiles de acuerdo al tamaño de la explotación, la vinculación a los mercados, la tecnología incorporada y el tipo de mano de obra empleada (Pazzi, 2009). Sin embargo, la mayor proporción de la cebolla en el VBRC es producida por minifundistas bolivianos, en general no propietarios de la tierra, sino aparceros de pequeñas parcelas que sólo cuentan con algunas herramientas y la fuerza de trabajo familiar. Estos trabajan con contratos informales de mediería con productores más grandes que suministran el suelo y muchas veces los insumos básicos.

1.3 El riego de cebolla

En áreas áridas y semiáridas, la disponibilidad de agua es el factor más limitante para la producción de cebolla y puede producirse sin dificultades, siempre que haya agua de riego confiable y disponible (Dessalegn y Aklilu, 2003). El rendimiento del bulbo y la calidad de este cultivo a menudo disminuye debido a la falta de agua y programación inadecuada de riego (Narang y Dastane, 1969; Battalani y Lanzoni, 1987; Brewster, 1994; Bossie *et al.*, 2009). Sin embargo, el riego excesivo aumenta la susceptibilidad a enfermedades, la lixiviación de nutrientes y el uso ineficiente del agua. Para el ideal desarrollo del bulbo, es necesario un adecuado nivel de humedad en toda la temporada (Maughan *et al.*, 2015).

El riego por goteo es cada vez más utilizado para cultivar cebollas en el mundo debido a la alta eficiencia de aplicación del agua y uniformidad que el sistema bien diseñado puede alcanzar, a la menor lixiviación de nutrientes y a los mayores rendimientos de bulbo obtenido (Clinton *et al.* 2000, Shock *et al.*, 2000, 2005; Maughan *et al.*, 2015). Sin embargo, la mayoría de la cebolla cultivada se riega por sistemas gravitacionales (en especial surcos), siendo factible alcanzar altos rendimientos en campos nivelados y de textura uniforme, sin invertir en sistemas presurizados ni costos de energía (Shock *et al.*, 2005).

1.3.1 El riego del cultivo en el valle

Prácticamente el total de la superficie sembrada de cebolla en el VBRC se riega mediante sistemas de riego por gravedad o superficie (Sánchez, 2013). A partir de la campaña 2009 – 2010, en el valle se percibió un aumento de la superficie de cebolla sembrada en tablón y regada por inundación en melgas, en reemplazo de la siembra y riego en surcos (Figura 6 y Figura 7) Figura 8. La modificación consiste en reemplazar dos surcos de 0,80 m cada uno, en los cuales se siembran cuatro hileras de cebolla por camellón, por un tablón de 1,6 m con doce hileras distribuidas en 1,4 m de ancho, luego cada siete a nueve tablonos se construyen bordos para facilitar el riego por inundación (Baffoni *et al.*, 2012).



Figura 6. Riego de cebolla por surcos en el valle bonaerense del río Colorado.



Figura 7. Riego de cebolla por melgas en el valle bonaerense del río Colorado.

El cultivo de cebolla regado por gravedad, ya sea en surcos o melgas, es una de las actividades productivas a la que más agua se destina en el valle, con un total de riegos por ciclo de 19 a 22. Según cálculos realizados por Sánchez (2013) cerca de la mitad del agua que recibe cada campaña el valle se destina a este cultivo hortícola.

En el VBRC, desde décadas pasadas se vienen realizando experiencias de riego presurizado en cebolla, como goteo o aspersión, con buenos resultados e indiscutibles ventajas. Sin embargo, por diversas cuestiones la superficie de cebolla regada por goteo o aspersión en este valle irrigado sigue siendo baja (actualmente no supera las 400 ha concentradas en unos pocos productores) sin alcanzar la importancia que posee la aplicación por gravedad.

1.3.2 Estudios del riego por gravedad

Kifle *et al.* (2008) en un ensayo de riego por surcos de cebolla en una región semiárida de Etiopía, obtuvo valores de eficiencia de aplicación de 60% con riego por pulsos y valores de uniformidad de riego de 87%. Más tarde, este mismo autor (Kifle *et al.*, 2017) en un ensayo de eficiencia del riego en la misma zona de estudio, obtuvo valores de eficiencia de aplicación entre 44 y 55 % y uniformidad de riego entre 67 y 79 % para el riego de cebolla convencional por surcos y caudal continuo. Por su parte, obtuvo valores entre 53 y 59% de eficiencia de aplicación y 81 a 86% en uniformidad de riego para un sistema de caudal discontinuo y surco alterno. Al-Jamal MS *et al.* (2001), en un estudio de eficiencia de riego en el sur de México, para los campos de cebolla con riego por surcos, registró eficiencias de aplicación entre 79 y 82%. Este autor menciona que los valores altos de eficiencia de aplicación obtenidos con surcos en esa región, fueron debido a que los agricultores tienen recursos hídricos limitados y, en consecuencia, utilizan el concepto de riego deficitario.

En el VBRC, se han realizado estudios acerca del consumo del agua y riego por gravedad del cultivo. Luque *et al.* (1966) en un trabajo de investigación relativo al riego del cultivo de cebolla en suelos representativos del valle, estableció un requerimiento total del cultivo de 620 mm y una lámina bruta total por periodo de 1092 a 1260 mm, con 20 a 23 riegos, lo que daría una eficiencia de aplicación promedio y simplificada del orden del 50%. Pla y Martínez (2007) evaluaron el efecto de tres caudales unitarios sobre el volumen de agua aplicada y la eficiencia de aplicación de cebolla, obteniendo valores bajos de eficiencia de aplicación, con un promedio para los tres caudales y todos los eventos del 27%. Sánchez (2010), luego de evaluar siete eventos de riego en el cultivo de cebolla en el valle (5 en surcos y 2 en melgas) obtuvo una lámina bruta aplicada promedio de 40 mm en melgas y 75 mm para surcos, con registros en esta variable que van de los 36 a 110 mm. En otro trabajo publicado, Sánchez (2013) estima 21 riegos durante el ciclo del cultivo, 84 mm de lámina bruta por riego. Calcula entonces un total de 1764 mm aplicados durante el ciclo y 684 mm de evapotranspiración del cultivo, siguiendo la metodología de FAO (Allen, 2000) para el cálculo del Kc de cultivo y los datos de evapotranspiración de la estación meteorológica del INTA Ascasubi.

Baffoni *et al.* (2012), en un estudio en tres establecimientos rurales del partido de Villarino, sobre el efecto del riego por surco y melga en rendimiento y la incidencia de podredumbre blanda en cebolla, no encontró diferencias entre las láminas brutas aplicadas durante la campaña bajo estudio con respecto al método de riego, registrando en promedio 1990 mm de lámina bruta total aplicada. Si comparamos ese valor con la evapotranspiración total del cultivo, la eficiencia de aplicación sería del orden del 35%.

Varela *et al.* (2013), en un ensayo en la EEA Hilario Ascasubi sobre el rendimiento de cebolla bajo distintos sistemas de riego, registró una lámina bruta total aplicada durante el ciclo del cultivo alta, del orden de 2450 mm para surco y 3450 mm para melga. Más tarde, en un estudio posterior de la eficiencia de riego por gravedad en el cultivo de cebolla realizado en la misma estación experimental, Varela *et al.* (2014) compararon distintos sistemas de riego superficial en cebolla, por pulsos en surco, surco con caudal continuo y melga con caudal continuo, registrando láminas brutas medias sobre un total de 10 eventos de riego de 40, 50 y 120 mm

respectivamente, con valores de eficiencia de aplicación (como relación entre la demanda evapotranspiratoria y lámina bruta aplicada) de 70, 60 y 24 %.

Durante la campaña 2015 – 2016, evaluaciones realizadas por CORFO Río Colorado en su campo piloto indicaron un total de 19 riegos durante el ciclo del cultivo con un total de 1350 mm aplicados, lo que da una lámina bruta promedio por riego de 71 mm y una eficiencia de aplicación (como relación entre lámina bruta total y evapotranspiración total del cultivo) del orden del 50% (Baumgartner, 2016)

A pesar de los antecedentes mencionados, no existe un estudio integral en el VBRC que caracterice el riego por gravedad del cultivo, califique su desempeño actual y potencial, e identifique y sugiera alternativas para obtener mejoras en la eficiencia de uso del agua.

1.3 Hipótesis

- La eficiencia de aplicación promedio para el riego por gravedad de cebolla en el VBRC es inferior al 50 %.
- Existen diferencias en la eficiencia de aplicación del agua de riego, debido principalmente a percolación profunda, según la fase de desarrollo o etapa de cultivo.
- Es posible optimizar el desempeño del riego de cebolla en el VBRC modificando variables de manejo a campo, como caudal unitario y tiempo de riego.

1.4 Objetivo

1.4.1 Objetivo general

Caracterizar el riego por superficie de cebolla en el VBRC, calificar su desempeño actual y potencial a través de indicadores e identificar los puntos críticos sobre los cuales se puedan proponer alternativas de manejo a campo que aumenten la eficiencia de riego.

1.4.2 Objetivos específicos

- Cuantificar y describir los parámetros físicos del riego por superficie de cebolla en el VBRC.
- Cuantificar y calificar el desempeño del riego de cebolla a través de la eficiencia de conducción interna, de aplicación, de distribución y percolación profunda. Analizar y discutir estos indicadores tradicionales de riego.
- Calificar y discutir la oportunidad del riego y el manejo del agua en el cultivo.
- Proponer escenarios de optimización del riego mediante el modelo de simulación hidráulica WinSRFR 4.1.3 y calcular la eficiencia de aplicación máxima para el día del evento y la potencial de manejo.
- Realizar recomendaciones locales para el aumento de la eficiencia de riego.
- Estimar los requerimientos de lavado de sales y la eficiencia de aplicación potencial según balance salino.
- Estimar la eficiencia de riego parcelaria (IE) y el índice de sagacidad (IS).

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1 La cebolla.

La cebolla ha sido cultivada por más de 4700 años y es originaria de regiones montañosas de Asia central (Brewster, 2008). Fue domesticada hace tiempo y como el maíz, ha perdurado gracias al trabajo de los agricultores durante generaciones. Las cebollas han evolucionado con los sistemas de cultivo y han acompañado las migraciones (Currah, L. 1998). Por ser una de las hortalizas más consumidas en el mundo y por sus propiedades nutritivas y medicinales es un cultivo de gran relevancia (Vidyavati *et al.*, 2010; Suleria *et al.*, 2015).

En términos botánicos, la cebolla es una planta herbácea bienal perteneciente a la familia de las amarilidáceas. Perteneció al género *Allium*, que reúne más de 600 especies. Entre las cultivadas se encuentran: *Allium cepa* (cebolla), *Allium sativum* (ajo), *Allium porrum* (puerro), *Allium fistulosum* (cebolla de verdeo) y cebolla de hoja o ciboulette (*Allium schoenoprasum*).

2.1.1 Fenología del cultivo.

Durante el primer año las cebollas acumulan foto-asimilados en el bulbo y en el segundo año realizan el ciclo reproductivo, florecen y producen semillas (Brewster, 2008). Sin embargo, para la producción de bulbos son cultivadas como anuales. Su crecimiento sigue un comportamiento sigmoideo, en donde se encuentran tres fases: la fase de implantación, la de crecimiento exponencial y la de senescencia (Peluffo y Arias, 2001).

Cely Reyes (2010) describe 3 fases fenológicas o etapas en el cultivo de cebolla para bulbo:

- Fase I (desarrollo de hojas): desde el trasplante hasta el inicio de la bulbificación.
- Fase II (bulbificación): engrosamiento de la base de las hojas, aumenta del número de catáfilas, el área foliar, se engrosa el pseudotallo y el diámetro ecuatorial del bulbo llega al 65% del diámetro definitivo.
- Fase III (maduración): se engrosan las catáfilas y el bulbo completa su llenado. La parte foliar muere ya que se seca el cuello del bulbo y la planta cae por el peso de sus hojas. Esta fase finaliza con la cosecha.

Los estadios fenológicos definidos por Voss (1979) son: estadio hoja bandera, estadio 1 a 2 hojas verdaderas, estadio 3 a 4 hojas verdaderas, bulbificación visible; comienzo de maduración y maduración completa (Figura 8).

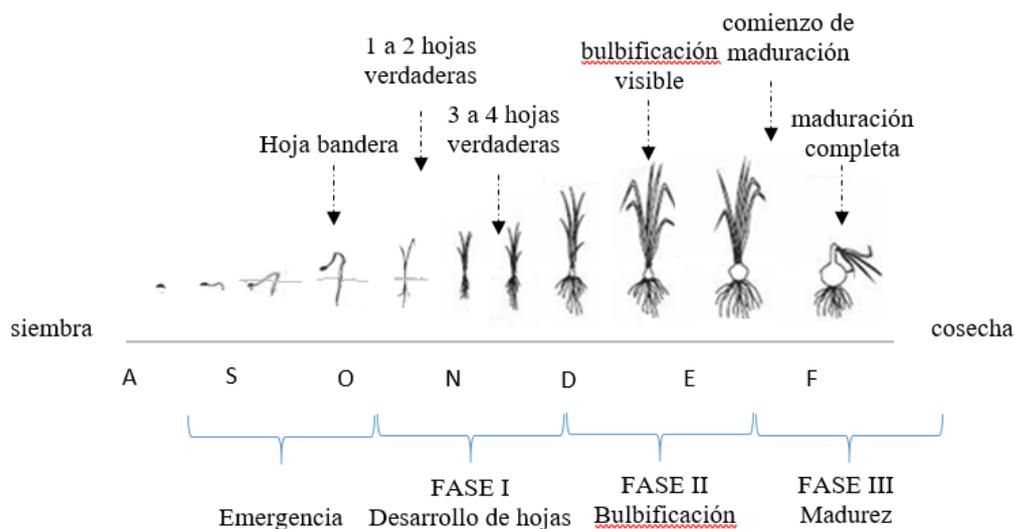


Figura 8. Estadios fenológicos de cebolla según Voss (1979) y fases o etapas en el cultivo de cebolla para bulbo establecidas por Cely Reyes (2010). El período establecido corresponde para la cebolla de días largos cultivada en el VBRC. Fuente: elaboración propia.

Fases similares indican Rondón *et al.* (1996) y Jaramillo (1997) para el crecimiento y desarrollo de la cebolla de bulbo, agregando a las fases anteriormente mencionadas, una primera etapa que comprende desde la siembra y emergencia hasta la primera hoja verdadera.

2.1.2 Sistema radical.

Diversos estudios coinciden en que la cebolla tiene un sistema radicular muy limitado en extensión y profundidad y es considerado un cultivo de raíces poco profundas. El crecimiento de la planta depende casi enteramente de las raíces adventicias que están creciendo y muriendo continuamente (Arbolea, 2005) hasta el comienzo de la bulbificación (Bettoni *et al.*, 2013).

Con respecto al perfil de suelo que es capaz de explorar el cultivo, la bibliografía en general indica que sus raíces se concentran en los primeros 0,30 m del suelo, pero alcanzando los 0,60 m (Zink, 1966; Thorup-Kristensen, 2001; Brewster, 2008). Drinkwater y Janes (1955, mencionado por Pejić *et al.*, 2011) encontraron que la penetración máxima de la raíz fue de 0,76 m, sin embargo, la mayoría de las raíces estaban en los primeros 0,31 m. Greenwood *et al.* (1982) y Bosh-Serra (1999) coinciden en que el 90% del sistema radical de la planta de cebolla se concentró en 0,40 m de suelo. Maughan *et al.* (2015), afirma que alrededor del 70% las raíces de cebolla están en los primeros 0,30 m de suelo, un 25% en 0,30 – 0,60 m y algunas raíces que se extienden más profundo. Por su parte Cardoso (2016), en ensayos en la Estación Experimental de Hilario Ascasubi del INTA, registró raíces hasta los 50 cm de profundidad. FAO (Allen, 2000), en su publicación número 56, indica que la cebolla posee un rango de profundidad efectiva de raíces de 0,30 a 0,60 m y Grassi (1998) menciona que la cebolla se encuentra dentro de los cultivos hortícolas con sistema radicular superficial, con un rango de 0,45 a 0,60 m de profundidad.

2.1.3 Respuesta del cultivo al agua.

Varias investigaciones demuestran que la cebolla es sensible al déficit de agua y que se necesita humedad adecuada del suelo para un buen rendimiento y tamaño óptimos de bulbo (Shock *et al.*, 1998b, 2000; Pejić *et al.*, 2011; Chopade *et al.*, 1998; Gaviola *et al.*, 1998; Lipinski, 1994).

FAO (Doorenbos y Kassam, 1986; Steduto *et al.*, 2012) propuso una ecuación para el rendimiento en función de la evapotranspiración, también llamada función de la productividad de los cultivos al agua (ecuación 1).

$$\left(1 - \frac{Ya}{Yx}\right) = Ky \times \left(1 - \frac{ETc}{ETx}\right) \quad (1)$$

Dónde:

Yx : rendimiento máximo

Ya : rendimiento real

ETx : evapotranspiración máxima

ETc : evapotranspiración real

Ky : factor de respuesta del rendimiento, que representa el efecto de una disminución de la evapotranspiración sobre las pérdidas de rendimiento.

El factor de respuesta del rendimiento (Ky) capta la esencia de las complejas relaciones que existen entre la producción y el uso del agua en un cultivo, donde ocurren procesos biológicos, físicos y químicos (Doorenbos y Kassam, 1986). La bibliografía y diversos estudios indican que el cultivo de cebolla posee un factor de respuesta del rendimiento al agua (Ky) superior a la unidad (Kipkorir *et al.*, 2002), alcanzando valores de 1,5 (Doorenbos y Kassam, 1986; Al-Jamal, *et al.*, 2000; Steduto *et al.*, 2012; Enchalew *et al.*, 2016). Esto significa que, en el cultivo de cebolla, la disminución del rendimiento es proporcionalmente mayor que la disminución del uso del agua debido al estrés (Steduto *et al.*, 2012).

La cantidad de agua de riego que se aplica al cultivo de cebolla varía dependiendo del cultivar, del clima, del tipo de suelo y del sistema de riego empleado (Osuna Canizalez y Ramírez Rojas, 2013). En España, con riego por goteo, Al-Jamal *et al.* (2000) y Martín de Santa Olalla *et al.* (2004), reportan 662 mm de agua para obtener rendimientos óptimos en cebolla, mientras que López-Urrea *et al.* (2009) 893 mm con riego por microaspersión. En Estados Unidos, reportan 1,040 mm en riego por gravedad, en surcos (Ellis *et al.*, 1993) y 910 mm con microaspersión (Drost *et al.*, 1996). En Morelos, Cuenca *et al.* (2003) reportan láminas totales de 587 a 616 mm con riego por gravedad. Para Baja California, Guzmán *et al.* (2008) reporta 720 mm durante el periodo marzo-agosto para el cultivo de cebolla.

Con respecto a la demanda evapotranspiratoria del cultivo para la zona bajo estudio, Sánchez (2013), siguiendo la metodología propuesta por FAO (Allen, 2000) estimó un total 684 mm. Los valores de Kc estimados por Sánchez para el cultivo de cebolla se observan en la Figura 9 y en la

Tabla 1.

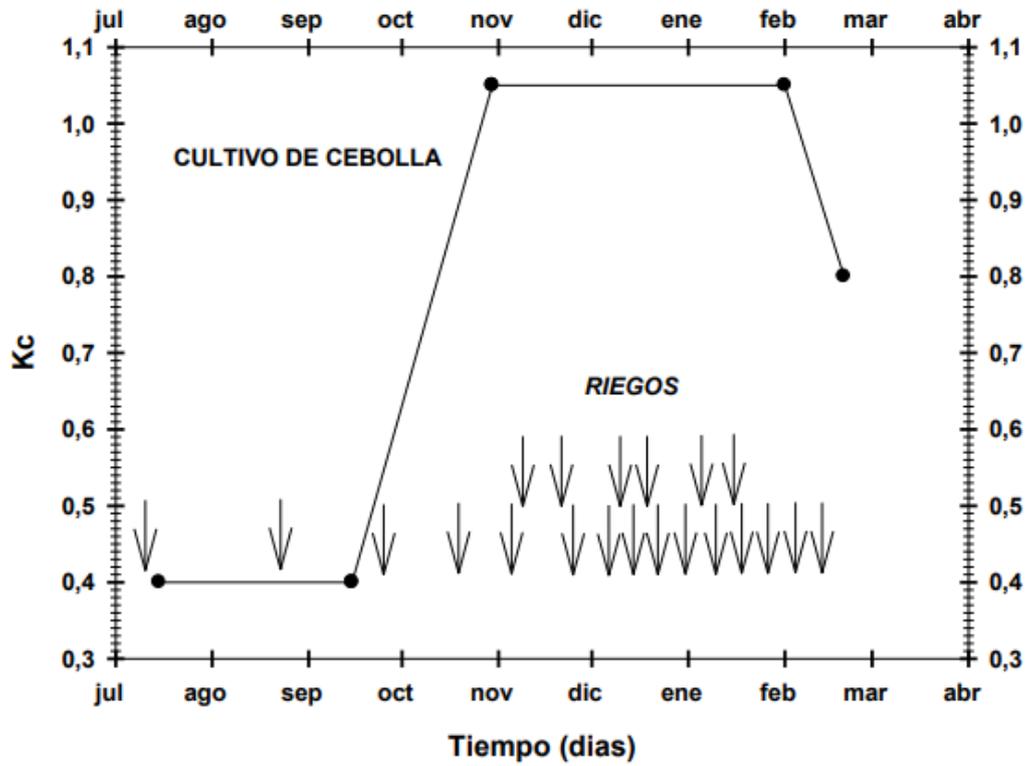
Figura 9. Evolución del coeficiente de cultivo (K_c) de cebolla en el VBRC (Sánchez, 2013)

Tabla 1. Fechas de cada etapa fenológica y valores de Kc estimado para el cultivo de cebolla en el VBRC (Sánchez, 2013)

	Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV
Fecha	15/7 - 15/9	15/9 - 30/10	30/10 - 1/2	1/2 - 20/2
Kc	0,38	0,38 - 1,05	1,05	1,05 - 0,80

La producción de cebolla a partir de semillas requiere alta humedad del suelo para la emergencia en la primera etapa de cultivo (Pejić *et al.*, 2011). La etapa más sensible para el estrés hídrico es la formación de bulbos, donde se registra la tasa máxima de uso de agua (Prashar *et al.*, 1994; Sánchez, 2013). El estrés hídrico durante la bulbificación, reduce significativamente la producción de materia seca, rendimiento y eficiencia del uso del agua de la cebolla, con un impacto negativo en la calidad y tamaño de los bulbos. Son varios los autores que indican que este periodo es el más crítico para la obtención de un alto rendimiento (Al-Jamal *et al.*, 2001; Ortola y Knox, 2015; Maughan *et al.*, 2015 y Parashar, 1976, Batra y Pandita, 1984; Chung, 1989; Suryawangsi y Banger, 1993, mencionados por Bandyopadhyay *et al.*, 2003).

Sharma *et al.*, (1994) en un trabajo sobre riego deficitario en cebolla, obtuvo el rendimiento más bajo y la menor evapotranspiración, cuando retuvo el riego durante la etapa de formación del bulbo. Bekele y Tilahun (2007) en un estudio sobre riego deficitario en el cultivo, indican que la cebolla no puede soportar el déficit hídrico en esta etapa sin una reducción sustancial en el rendimiento.

Durante el período vegetativo y la etapa de maduración, el cultivo de cebolla parece ser menos sensible al déficit hídrico. Si el agua es limitante, es preferible un déficit durante estas etapas (Sammis *et al.*, 2000). Bekele y Tilahun (2007) concluyen que si el estrés hídrico se impone al comienzo de la temporada de crecimiento (y no es demasiado alto), podrían conseguirse buenos rendimientos de cebolla con riego adecuado durante el resto de la temporada de crecimiento. Por su parte, el déficit de agua al final de la temporada (durante la etapa de madurez) tampoco afectaría el rendimiento. Sin embargo, excesos de agua durante el período vegetativo puede conducir a un desarrollo de bulbo retrasado y la calidad final del cultivo también puede verse afectada (Doorenbos y Kassam, 1986).

2.1.4 Frecuencia de riego

La frecuencia de riego es un tema controvertido, no sólo en cebolla sino en general en todos los cultivos. Como la cebolla posee un sistema de raíces poco profundo, es común aplicar tasas de riego ligeras y frecuentes (Pelter *et al.*, 2004, Shock *et al.*, 2000). Varios autores mencionan que, para optimizar los rendimientos en el cultivo de cebolla, se requiere mantener el suelo con altos valores de humedad mediante riegos frecuentes (Al-Jammal *et al.*, 2000; Bucks *et al.*, 1981; Chung, 1989; Delaware Santa Olalla *et al.*, 1994; Ells *et al.*, 1993; Hegde, 1986; Jones y Johnson, 1958; Kadayifci *et al.*, 2005; Koriem *et al.*, 1994; Nassar y Waly, 1977; Rana y Sharma 1994, mencionados por Shock *et al.*, 2007; Shock *et al.*, 1998b, 2000; Halim y Ener, 2001, mencionado por Mermoud *et al.*, 2005; Renault y Wallender, 2000). Sin embargo, Hanson *et al.* (2003) y Mermoud *et al.*, (2005), reportan pocas diferencias en el rendimiento de cebolla entre riegos diarios (reponer diariamente la ETc acumulada), o dos veces por semana.

En términos de tensión de agua en el suelo, Dragland (1974) recomienda regar cuando el potencial del suelo a 0,15 m de profundidad caiga por debajo de -40 kPa y Hedge (1986), cuando a 0,08 m de profundidad se alcance un potencial de -45 kPa. Otros autores sugieren mejores resultados regando con más frecuencia, manteniendo niveles de humedad en el suelo por debajo de -20 kPa en el cultivo de cebolla regado por goteo (Schock *et al.*, 2000; 2005, 2010, Sullivan *et al.*, 2001; Enciso *et al.*, 2007) y por debajo de -10 kPa y -15 kPa (Klar *et al.* 1976; Abreu *et al.* 1980; Coelho *et al.* 1996) y entre -17 y -27 kPa para el riego por goteo y surco (Ortola *et al.*, 2015).

Prashar *et al.*, (1994) mencionan que obtuvieron mejores rendimientos en cebolla regando cuando la humedad del suelo disponible a una profundidad de 20 cm se había agotado en un 40% que a 60 u 80% de agotamiento. Cuenca Adame *et al.*, (2003) en un estudio de cebolla bajo riego por surcos, mencionan que el riego de cebolla se debe aplicar cuando se haya agotado entre un 20 y un 40 % de la humedad aprovechable. Duarte Díaz *et al.*, (2012) mencionan como criterio para el riego de la cebolla, que la humedad no descienda del umbral de agotamiento del 45%. Maughan *et al.*, (2015) mencionan que la cantidad permitida de agotamiento de la humedad del suelo para el cultivo de cebolla es aproximadamente del 25 al 30% del total agua disponible en el suelo.

2.2 El riego.

El riego constituye una de las primeras experiencias tecnológicas humanas, siendo implementado por civilizaciones muy antiguas (Silva Busso, 2011). El objetivo primordial del riego es suministrar al cultivo el agua adicional a la precipitación para su crecimiento óptimo y cubrir las necesidades de lavado de sales para evitar su acumulación en el perfil del suelo, asegurando la sostenibilidad del regadío.

La superficie regada en Argentina fue variando en función del tiempo. En 1970 la misma ocupaba 1.066.143 ha (Chambouleyron, *et al.*, 1982), en 1989 se incrementó según FAO a 1.760.000 ha, para luego descender en 2005 a 1.650.000 ha (Aquastat, 2014). Según las últimas estimaciones el área total irrigada del país es de 2.100.000 ha, lo que corresponde al 5 % del área agrícola de la Argentina. Aproximadamente el 53 % de dicha superficie (1.097.000 ha) se ubica en las regiones áridas y semiáridas, la mayoría de las cuales tienen como fuente de agua los cursos superficiales. El restante 47 % (1.003.000 ha) corresponde a regiones subhúmedas y húmedas e incluyen al riego de arroz, el riego suplementario de cultivos extensivos y cultivos fruti-hortícolas de los cinturones verdes de las grandes ciudades (Andrade *et al.*, 2017). En el año 2002 según el CNA un 69% de la superficie regada en la Argentina fue por gravedad, un 21% por aspersión y 10% localizado.

No existe el mejor método de riego, sino que existe un método de riego más apropiado para cada situación (Pereira y Trout, 1999; Martínez, 2010). Los métodos de riego por gravedad se utilizan en más del 85 % de las tierras bajo riego del mundo (Procisur, 2010), en todo tipo de cultivos y en la mayoría de los suelos y condiciones topográficas. En la Argentina continúa siendo el método de aplicación de agua más importante (Sánchez, 2010). Cuando estos sistemas de riego están bien diseñados y son manejados de forma adecuada, pueden ser muy eficientes y permitir el riego uniforme de la parcela (Faci y Playán, 1994). A su vez los nuevos enfoques del uso de los recursos naturales aconsejan introducir los balances energéticos del regadío, la huella hídrica y energética y los conceptos de agua y energía virtual (Corominas, 2010). Esto plantea el desafío de optimizar los sistemas de riego por gravedad con los que se riega la mayor

la superficie bajo riego del país en todo tipo de cultivos y en la mayoría de los suelos y condiciones topográficas.

El riego, produce resultados muy favorables para una zona o región, pero su mal manejo puede llevar al deterioro del suelo, el agua y el ambiente (Grassi, 1998). Algunos ejemplos de las externalidades negativas del riego son: la fracción no utilizada del agua (ineficiencias) que se reincorpora al ciclo hidrológico natural, pero regresa con mayores contenidos salinos y/o con contaminantes (Pereira *et al.*, 2010); los excesos de agua aplicada que recargan el acuífero freático en parcelas regadas de las regiones áridas y genera un proceso de salinización secundaria seguido de sodificación, reduciendo la capacidad productiva de los suelo y la salinización por riego con agua salina. Por tal motivo es necesario implementar estrategias para asegurar la viabilidad y productividad a largo plazo de los sistemas irrigados (Hillel, 2000).

Ledivow *et al.* (2014) indican que, en las regiones áridas y semiáridas, los procesos de captación, conducción y distribución del agua que sirven a un número importante de usuarios son generalmente responsabilidad de instituciones públicas, privadas o mixtas, sobre las cuales los productores individuales tienen un espacio de acción reducido para la mejora. No sólo porque participan diferentes actores, sino también porque requiere de acciones estructurales (muchas veces de ingeniería civil) y no estructurales (como la organización para la gestión, participación de usuarios, etc.). A su vez, mencionan que en los sistemas colectivos muchas veces la modalidad de distribución del agua puede condicionar el margen de maniobra del agricultor. Sin embargo, la eficiencia de aplicación del agua de riego a nivel de finca puede incrementarse a través de mejoras en el diseño, gestión y manejo del método de riego, ya sea por superficie (Morábito, 2003; Schilardi, 2010) como presurizado (Schilardi *et al.* 2015, Olgún, 2016). También puede incrementarse a través de la migración a sistemas presurizados, pero sólo en aquellos casos que el sistema productivo sustente la inversión y se disponga de la fuente de energía necesaria. Por otro lado, al igual que en el riego por superficie, la eficiencia alcanzable con los sistemas presurizados depende de un correcto diseño y de un buen mantenimiento y operación.

La Tabla 2 muestra las eficiencias de aplicación alcanzables con cada uno de los sistemas según Pereira *et al.*, (2010). Por un lado, la eficiencia de aplicación es baja para el riego por superficie y mediana a alta para el riego presurizado (Lamm y Trooien, 2003). No obstante, la operación y mantenimiento de estos últimos es fundamental para mantener en el tiempo las altas eficiencias (Olgún, 2016). Los métodos de riego por superficie tecnificados y bien diseñados y operados pueden alcanzar eficiencias similares a las de los riegos presurizados (Morábito, 2003; Schilardi, 2010).

Tabla 2. Eficiencias de aplicación alcanzables por los diferentes sistemas de riego (Pereira *et al.*, 2010)

Método de riego	Eficiencia (%)
Riego por gravedad con nivelación de precisión	
Surcos	65 - 85
Fajas	70 - 85
Canteros	70 - 90
Riego por gravedad tradicional	
Surcos	40 - 70
Fajas	45 - 70
Canteros	45 - 70
Riego de arroz, canteros en inundación permanente	25 - 70
Riego por aspersión	
Sistemas estacionarios de cobertura total	65 - 85
Sistemas estacionarios desplazables manualmente	65 - 60
Laterales con ruedas	65 - 80
Cañón enrollador o con cable	55 - 70
Laterales móviles, con pivot central	65 - 85
Microriego (riego localizado)	
Goteros, 3 emisores por planta	85 - 95
Goteros, < 3 emisores por planta	80 - 90
Micro-aspersores y "difusores" (frutales)	85 - 95
Línea continua de emisores gota a gota	70 - 90

2.2.1 El riego por superficie

El riego por superficie (o de gravedad) continúa teniendo gran relevancia en el desarrollo del regadío, no sólo porque corresponde aproximadamente al 80% de las áreas regadas del mundo, sino porque para muchos cultivos y sistemas de producción continúa siendo el método técnica y económicamente más apropiado.

Se basa en la aplicación controlada de agua sobre una superficie nivelada y bien preparada, limitada por bordos. Morábito y Salatino (2008), mencionan que existe dos métodos de riego por superficie:

a) sin desagüe (sin pendiente o "riego a cero"): el agua inunda la unidad de riego y permanece estancada sobre el suelo durante el tiempo suficiente que se necesita para infiltrar una cantidad deseada de agua. Pueden presentarse aquí dos situaciones: mojado completo (es el caso de las melgas) o mojado parcial de la superficie del suelo (como es el caso de los surcos).

b) con desagüe y pendiente; la infiltración del agua en el suelo se produce mediante la circulación y el mantenimiento de un caudal que escurre sobre la superficie del suelo. La aplicación del agua se mantiene el tiempo suficiente hasta que se logre infiltrar la lámina deseada o mojar la profundidad de suelo deseada. Se presentan también dos situaciones: el mojado completo y parcial de la superficie del suelo.

El riego por superficie, al tener la característica de que el agua se aplica en la superficie del suelo y se distribuye en el campo por gravedad, no requiere de tuberías de conducción ni necesita presurizar el agua para obtener una correcta distribución. Esto hace que los sistemas de riego por superficie tengan dos ventajas económicas claras: no necesitan equipos que graven al agricultor con sus amortizaciones, ni es preciso bombear el agua por encima del nivel de la parcela, con el consiguiente ahorro energético. Cuando los sistemas de riego por superficie están bien diseñados y son manejados de forma adecuada, pueden ser muy eficientes y permitir el riego uniforme de la parcela. Sin embargo, cuando estos sistemas están mal diseñados u operados, o cuando no están adaptados a las condiciones particulares de una finca, estas ventajas se ven anuladas por otros costos que pueden estar ligados al sistema, como elevadas necesidades de mano de obra, disminuciones en la producción o poca eficiencia en el uso del agua (Faci y Playán, 1994).

Las principales ventajas de estos métodos son: costos de inversión medios (a menos que se requiera un gran movimiento de suelo), costos de operación y mantenimiento también medios, y bajos requerimientos de energía. Las desventajas son: en general, bajas eficiencias de uso del agua, disminución del espacio cultivable debido a la red de riego (canales y acequias), necesidad de una adecuada nivelación del terreno y requerimiento de regadores experimentados (Morábito y Salatino, 2008).

2.2.1.1 Hidráulica del riego por superficie

2.2.1.1.1 Fases del riego por superficie.

El evento de riego por superficie se compone de cuatro fases: a) avance, b) almacenamiento, c) vaciamiento, d) recesión.

a) avance: implica el escurrimiento del flujo del agua sobre la superficie del terreno desde la cabecera hacia el pie del surco o melga, constituyendo el mojado del suelo.

b) almacenamiento: tiempo comprendido entre el fin de la etapa de avance y el tiempo de corte. Esta fase permite que al final de la unidad de riego se haya infiltrado la cantidad de agua requerida.

c) vaciamiento: constituye el período comprendido entre el corte del agua en la cabecera y el comienzo de la recesión. Esta fase concluye al momento en que desaparece el agua de la superficie del suelo en la cabecera.

d) recesión: constituye el retiro del agua desde la cabecera hacia el pie. Como puede verse en la Figura 10, la curva de recesión es inversa a la de avance, lo que permite completar la lámina neta al pie del surco o melga (FAO, 2001)

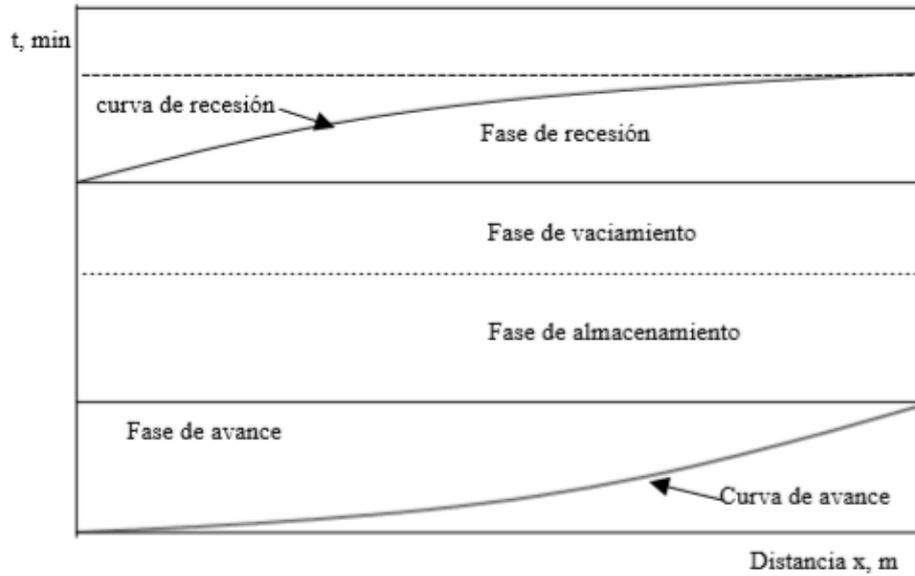
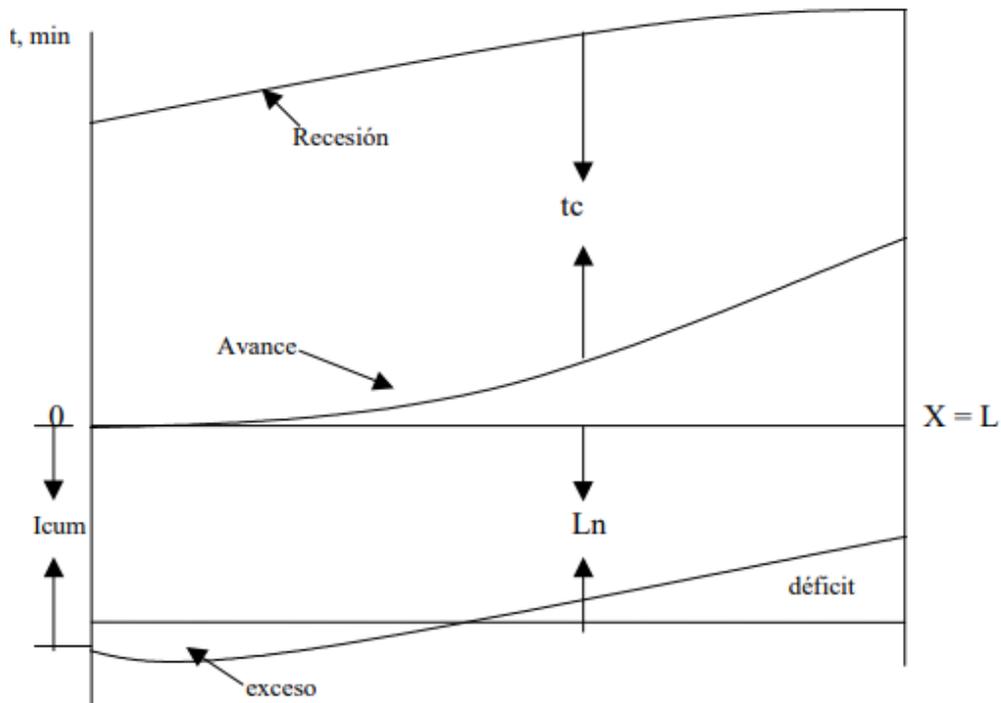


Figura 10. Fases que componen un evento de riego por superficie (FAO, 2001)

Si bien lo ideal es aplicar una lámina uniforme a lo largo de todo el surco o melga, durante la aplicación del agua puede presentarse un déficit o un exceso, tal como se muestra en la Figura 11.



De
Figura 11. Perfil de humedecimiento según el tiempo de oportunidad de riego (FAO, 2001)

acuerdo a la figura 11, la distancia entre las curvas de avance y receso representa el tiempo de contacto entre el agua y el suelo (t_c) o tiempo de oportunidad de riego (t_o), que permite calcular la lámina infiltrada a lo largo del surco/melga. Conocer las curvas de avance y receso,

constituye la base fundamental para diseñar y manejar correctamente el riego por superficie (FAO, 2001).

El avance del agua sobre un suelo bajo riego, depende principalmente del tiempo, caudal unitario, pendiente, velocidad de infiltración, rugosidad o aspereza de la superficie de avance y la geometría del surco o melga (Grassi, 2000). La trayectoria del avance no tiene una descripción matemática concisa, pero puede aproximarse razonablemente a una función potencial simple (Walker, 1989) (ecuación 2):

$$x = \dot{\rho} \times tav^r \quad (2)$$

Dónde:

x : distancia alcanzada por el frente de agua a tiempo t , (m).

tav : tiempo de avance (minutos).

$\dot{\rho}$: coeficiente empírico que representa la distancia que avanza el frente del agua en el primer minuto.

r : exponente empírico que toma valores menores a 1.

Terminado el riego el agua escurre superficialmente a la vez que se infiltra, desapareciendo de la superficie del suelo. Este fenómeno se define como receso. En el caso de un suelo nivelado y uniforme, el agua desaparecerá al mismo tiempo en toda la superficie. El fenómeno se representa a través de la ecuación 3.

$$xr(m) = s * t(min) \text{ ó } xr(m) = a + \dot{s} * t(min) \quad (3)$$

Dónde:

x_r : distancia retrocedida (m)

\dot{s} : pendiente de la función, que depende de la lámina de agua aplicada, la velocidad de infiltración del suelo, la pendiente del terreno y la rugosidad de la superficie.

a : ordenada al origen.

2.2.1.1.2 Velocidad de infiltración del agua en el suelo

La infiltración tiene gran influencia sobre la eficiencia y uniformidad en los métodos de riego por superficie, debido a que representa el mecanismo que transfiere y distribuye el agua desde la superficie al perfil de suelo explorado por las raíces de los cultivos. Es un parámetro físico utilizado tanto para el diseño como para la evaluación del desempeño de los métodos de riego. Depende de las características físicas, químicas y biológicas de suelo, afectando los procesos de avance y receso del agua, siendo de importancia para estimar el caudal óptimo a derivarse en una parcela bajo riego (Walker *et al.*, 2006).

Se trata de uno de los parámetros físicos más difíciles de definir adecuadamente a campo. La metodología más difundida y fácil de implementar es la del infiltrómetro de doble anillo, que permite aproximar a campo el valor de infiltración básica del suelo y con ello obtener los valores de los parámetros de los otros modelos de infiltración conocidos. La metodología para determinar la velocidad de infiltración con el infiltrómetro de doble anillo ha sido definida por varios autores (Haise *et al.*, 1956, mencionado por Grassi, 1998 y Walker y Skogerboe, 1987)

y adoptada por el Servicio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, 1956, mencionado por Grassi, 1998).

El proceso de infiltración ha sido descrito por varios autores (Walker *et al.*, 2006; Chambouleyron, 2005; Morábito, 2003; Grassi, 1998; Roscher, 1985; Israelsen y Hansen, 1965), detallando y explicando los diferentes modelos que la caracterizan. Se han propuesto varias ecuaciones empíricas para expresar la velocidad de infiltración como una función del tiempo (Grassi, 1998). Una de las aproximaciones más simples y mayormente utilizada, ha sido la ecuación de Kostiakov (1932, mencionado por Grassi, 1998), la cual expresa la velocidad de infiltración en un punto (ecuación 4).

$$I = a \times t^b \quad (4)$$

Dónde:

I: velocidad de infiltración (mm min⁻¹ o mm h⁻¹).

t: tiempo de infiltración (min u h).

a: coeficiente que representa la velocidad de infiltración a t=1 (mm*min^{-(1+b)} o mm*h^{-(1+b)}).

b: exponente sin dimensiones, siempre es negativo con valores que van de 0 a -1.

Al integrar la ecuación (4) entre los límites t = 0 y t, se obtiene la ecuación de infiltración acumulada (ecuación 5).

$$Icum = \int_0^t a \times t^b = \frac{a}{b+1} \times t^{b+1} = A \times t^B \quad (5)$$

Dónde:

Icum: infiltración acumulada para el tiempo t (mm)

Otro parámetro que merece consideración debido a su importancia al proyectar el riego a nivel parcelario es la infiltración básica de los suelos (ecuación 6). De acuerdo con el Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (NRCS-USDA), la velocidad de infiltración básica es el valor instantáneo, cuando su velocidad de cambio para un período estándar, es del 10% o menos de su valor (mencionado por Grassi 1998 y Chambouleyron, 2005).

$$Ib = a \times (-600 \times b)^b \quad (6)$$

Dónde:

Ib: mm h⁻¹

a: A×B×60

b: B -1

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos “NRCS-USDA” (1974, mencionado por Walker *et al.*, 2006 y Grassi, 1998), ha obtenido en pruebas de campo una gran cantidad de curvas representativas de muy diversas condiciones edáficas, que han sido agrupadas en “familias de curvas”, las que responden a la ecuación 7.

$$Icum = A' \times t^{B'} + C' \quad (7)$$

En la ecuación del NRCS-USDA, los valores A' y B' son parecidos, pero no iguales a los coeficientes A y B de la ecuación de Kostiakov y $C' = 7$. Por último, Kostiakov-Lewis (mencionado por Walker y Skogerboe, 1987 y Walker *et al.*, 2006), agregan un término que representa la infiltración final o “básica”, para ajustar mejor las ecuaciones a los métodos de riego con grandes tiempos de aplicación e infiltración (ecuación 8).

$$Z = Icum = k \times t^a + fo \times t + c = A \times t^B + Ib \times t + c \quad (8)$$

Dónde:

Z : $Icum$: volumen infiltrado por unidad de longitud durante el tiempo de oportunidad t ($m^3 m^{-1} min^{-1}$).

fo : velocidad de infiltración básica en unidades de volumen por unidades de longitud y tiempo ($m^3 m^{-1} min^{-1}$).

K, a : parámetros empíricos.

c : cantidad de agua almacenada en las grietas o depresiones del suelo una vez iniciado el riego ($m^3 m^{-1} min^{-1}$).

Se han realizado varios intentos para definir los valores de a, k y fo . En 1997 una nueva serie de valores fueron alcanzados como parte del desarrollo del programa de simulación de riego por superficie SIRMOD (Walker, 2003), estos valores caracterizan las familias de infiltración representadas en Tabla 2. Todavía no hay valores disponibles del componente C . Finalmente Walker *et al.*, (2006) revisan y actualizan las “familias de curvas” de infiltración (

Tabla 3), detallando las ecuaciones 9, 10 y 11, que permiten obtener para cada familia de curva de infiltración los valores de a , k y f_0 según se detalla:

$$a = \frac{(0,1571 + 2,5739 \times Fn)}{(1 + 3,6940 \times Fn - 0,1149 \times Fn^2)} \quad (9)$$

$$f_0 = 0,000454 \times (1,0149 - e^{(0,5596 \times Fn)}) \quad (10)$$

$$k = 0,00247 \times (Fn + 0,00319)^{0,5817} \quad (11)$$

Dónde:

Fn : familia de curva de infiltración, valores entre 0,02 a 4,00

Tabla 3. Familias de infiltración en riego por superficie (Walker, 2006)

F	Código (Ib)		Textura	SCS - USDA			Kostiakov		Kostiakov - Lewis		
	(mm/h)	("/h)		A	B	C	A	B	k	a	fo
		0.01	Muy arc.						0.200	0.00440	0.000011
		0.05	arc.						0.258	0.00426	0.000022
ML	2.5	0.10	arc.	0.62	0.660	7	1.22	0.580	0.317	0.00383	0.000035
		0.15	arc. Lig.						0.357	0.00360	0.000046
		0.20	Fco arc						0.388	0.00346	0.000057
		0.25	Fco arc						0.415	0.00337	0.000068
L	7.5	0.30	Fco arc	0.93	0.720	7	1.76	0.630	0.437	0.00330	0.000078
		0.35	Limoso						0.457	0.00326	0.000088
		0.40	Limoso						0.474	0.00323	0.000098
		0.45	Fco Lim						0.490	0.00321	0.000107
Mod.L	12.5	0.50	Fco Lim	1.20	0.750	7	2.20	0.660	0.504	0.00320	0.000117
		0.60	Fco Lim						0.529	0.00320	0.000136
		0.70	Fco Lim						0.550	0.00321	0.000155
		0.80	Fco Are						0.568	0.00322	0.000174
		0.90	Fco Are						0.584	0.00324	0.000193
Mod.	25	1.00	Fco Are	1.79	0.785	7	3.10	0.690	0.598	0.00326	0.000212
Mod.R	37.5	1.50	Arenoso	2.28	0.800	7	3.90	0.700	0.642	0.00340	0.000280
R	50	2.00	Arenoso	2.75	0.808	7	4.50	0.710	0.672	0.00355	0.000325
MR	75	3.00	Arenoso	3.65	0.816	7	5.800	0.715			
Ex.R		4.00	Arenoso	4.45	0.827	7	7.00	0.720	0.750	0.00421	0.000390

2.2.1.1.3 Caudal de manejo y caudal unitario

Conocer el caudal de ingreso y en su caso, el escurrido de la parcela bajo riego, es un dato fundamental para el diseño y optimización de la operación de los sistemas de riego por superficie. La medida del caudal o aforo puede realizarse en el cauce de distribución o en bocatoma de finca, como sí también en los puntos de suministro de agua a las parcelas.

El caudal de manejo es el caudal que dispone el productor en el establecimiento y dependerá en este caso del número de hectáreas de concesión que posee y del sistema de entrega de agua, si es a caudal continuo o está dentro de un turnado de riego. El caudal de manejo definirá qué superficie podrá regar de manera simultánea y cómo será la operación del riego.

El caudal unitario corresponde a un volumen por unidad de tiempo y por unidad de frente de riego, por ejemplo, $L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$. El caudal unitario es de suma importancia en el riego por superficie, porque de él dependerán otras variables del riego, como el tiempo de aplicación, la uniformidad, la lámina aplicada y la eficiencia de riego.

El flujo de agua sobre el terreno no deberá producir erosión. Esto dependerá fundamentalmente de la pendiente y textura del suelo. En melgas se consigue utilizando caudales unitarios que no superan los valores dados por las ecuaciones 12 y 13 (FAO 2001, Pascual España, 2008).

- Cultivos no encespedantes (ej. alfalfa, cereales):

$$Q_{umx} = 0,1765 \times S_0^{-0,75} \quad (12)$$

- Cultivos bien establecidos, encespedantes:

$$Q_{umx} = 0,353 \times S_0^{-0,75} \quad (13)$$

Dónde:

$q_{umáx}$: caudal unitario máximo ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$).

S_0 : pendiente de la melga (m/m)

Cuando se trata de surcos, el caudal máximo no erosivo se puede calcular según la ecuación 14 (FAO, 2001):

$$Q_{máx} = C/S_0 \quad (14)$$

Dónde:

$Q_{máx}$ = caudal máximo no erosivo (L/s)

$C = 0,57$ para suelos arenosos

$C = 0,63$ para suelos francos

$C = 0,96$ para suelos arcillosos

S_0 : pendiente de la melga (%)

Sin embargo, para que el agua alcance todos los puntos de la melga y se consiga una adecuada uniformidad en el riego, es necesario que el caudal unitario sobrepase un valor mínimo, dado por la ecuación 15 (FAO 2001, Pascual España, 2008):

$$q_{umín} = (0,00595 \times L \times S_0^{0,5})/n \quad (15)$$

Dónde:

$q_{umín}$: caudal unitario mínimo ($L \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)

L : longitud de la melga (m).

S_0 : pendiente ($m \cdot m^{-1}$),

n : coeficiente de rugosidad de Manning.

2.2.1.1.4 Pendiente, longitud de la unidad de riego, tiempo de riego y número de surcos o melgas regadas de manera simultánea.

En el riego por superficie resulta muy importante tanto la velocidad de infiltración del agua en el suelo como la velocidad con que fluye el agua sobre el terreno, ya que de ellas y de la duración del riego depende la lámina de riego que se aporta. La velocidad a la que fluye el agua por el terreno depende del caudal utilizado, de las dimensiones de la melga, de la rugosidad de la superficie y de la pendiente del terreno (Pascual España, 2008).

A mayor pendiente menor será el tiempo de avance, por lo que los tiempos de infiltración serán más próximos en toda la parcela. Sin embargo, a mayor pendiente, mayor es la probabilidad de erosión del suelo, por lo que se recomienda que las parcelas de riego por superficie no superen el 2%. La pendiente a lo largo de la melga debe ser o uniforme o ligeramente decreciente, pero no debe ser creciente porque aumentaría la velocidad del flujo del agua, produciéndose una distribución desigual y probablemente erosión. Como excepción a esta regla el primer tramo de

la melga (5 a 15 metros) puede tener pendiente nula para que el agua se reparta uniformemente a lo ancho antes de que comience a descender por este (Pascual España, 2008). En cuanto a la pendiente transversal, lo ideal es que sea nula, no obstante, se permite un ligero desnivel, que no debe sobrepasar la cuarta parte de la altura de la lámina de agua que fluye sobre el terreno (Booher, 1974). En el caso de los surcos la pendiente puede ser constante o variable a lo largo de los surcos. Si los surcos presentan salida al pie, parece conveniente que la pendiente sea creciente. En el caso de existir retención al pie del surco, parece conveniente que la pendiente sea decreciente, pues de esta manera se consigue mayor uniformidad en los tiempos de contacto (Pascual España, 2008). En el valle bonaerense del río Colorado en general los lotes bajo riego se encuentran sistematizados con muy poca pendiente, casi a cero.

La longitud óptima de la parcela de riego está vinculada a la textura, pendiente, y caudal de manejo. En suelos arenosos y de baja pendiente, la longitud debe ser menor respecto a la situación de riegos con pendiente y suelo de texturas arcillosas. En general, existe cierta resistencia a dividir los lotes y manejar tiradas cortas de riego. En el VBRC existen distintas longitudes de parcelas y texturas de suelo.

El tiempo de riego es una variable de diseño y manejo en el riego por superficie. El mismo debe garantizar la aplicación de la lámina de riego objetivo o de reposición. Generalmente el tiempo de aplicación será mayor cuanto mayor sean las necesidades del cultivo. Junto con el caudal unitario son las dos variables de manejo a campo con gran influencia en el desempeño del evento de riego. El caudal unitario dependerá del caudal de manejo en la reguera principal y de la capacidad operativa del regador, es decir, el número de surcos o melgas regadas de manera simultánea (o frente de riego). Este punto constituye una importante variable de ajuste a campo con impacto directo en las eficiencias y uniformidades de riego. En el VBRC, el operario del riego maneja el frente de riego en función del caudal que se le entregue, el tiempo que tenga disponible el agua y el resto de actividades en las que esté a cargo. En general si el establecimiento se encuentra bajo un tornado, el regador necesitará efectuar riegos rápidos para poder completar la superficie cultivada, variable que ajuste mediante el caudal unitario y el frente de riego.

2.2.1.1.5 Láminas de riego

En métodos de riego superficiales, el término lámina de riego se aplica a la altura de agua (d) con que una superficie (Sup), supuestamente a nivel, quedaría cubierta por una aportación V (Losada Villasante y Roldán Cañas, 2009), quedando entonces representada por la ecuación 16.

$$d = Vol / Sup \quad (16)$$

Dónde:

d : lámina de riego (mm)

Vol : volumen de agua (L)

Sup : superficie (m^2)

Si una parcela recibe un caudal durante un tiempo de riego, la lámina bruta aplicada (db) es aquella referida a la aportación o volumen de agua aplicada a la superficie bajo riego.

Si la parcela regada no posee desagüe al pie, la lámina bruta aplicada se infiltra por completo, constituyendo la lámina infiltrada (d_{inf}). De esta lámina, parte se almacena en la zona radical del cultivo y parte alcanza profundidades mayores, constituyendo la lámina percolada (dp). En el caso de los métodos de riego con desagüe al pie, el volumen de agua escurrido fuera de la parcela, referido a la superficie regada representa la lámina escurrida al pie.

En principio, la lámina equivalente al consumo hídrico debido a la evapotranspiración durante el tiempo transcurrido del último riego, es la base para determinar el volumen de agua a aplicar en el próximo riego. Así queda definida, la lámina consumida (*dc*) como lámina de reposición (*dr*). Enfoques más modernos hablan de altura de agua objetivo a aplicar con el riego, en vez de únicamente considerar el consumo hídrico debido a la evapotranspiración como lámina de reposición, ya que el riego puede tener también otros objetivos, como la aplicación de una lámina extra para el lavado de sales, la germinación de un cultivo o cierta labor del suelo (Burt *et al.*, 1997).

2.3 Salinización

Los problemas que generan las sales en el suelo son, entre otros, menor disponibilidad del agua, reducción de la velocidad de infiltración del suelo en aquellos casos de contenidos altos en sodio o bajos en calcio y toxicidad si se trata de acumulaciones altas de los iones sodio, cloro y boro. Estos efectos pueden actuar de manera independiente y frecuentemente en forma sinérgica (Richards, 1954).

Entre el 15 y 20% del total de suelo bajo regadío en el mundo está afectado por la salinización (Aquas-ta, mencionado por Sánchez y Dunel, 2017). La tasa de crecimiento de la salinización se encuentra en el orden de 0,25 - 0,50 millones de hectáreas por año, situándose mayormente en regiones áridas y semiáridas (FAO, 2002). De acuerdo a las últimas estimaciones, la superficie nacional salinizada alcanza 412.000 ha (FAO, 2015; Prieto, 2015; Sánchez y Dunel, 2017).

En todas las regiones semiáridas y áridas bajo riego del mundo, la aparición de sales en superficie es una constante natural, ya que las mismas se encuentran disueltas en el agua de riego, en el suelo o en ambos (Sánchez y Dunel, 2017). Es común también, la salinización secundaria seguido de sodificación debido a la recarga del acuífero freático y la salinización por riego con agua salina (Andrade *et al.*, 2017).

En Argentina existen dos procesos de afectación por sales y/o sodio resultantes de la aplicación de agua de riego: el que se verifica en las regiones áridas y semiáridas del país coincidente con la isohieta de hasta 700 mm y estrechamente vinculado a láminas importantes de irrigación, elevación del plano freático, traslado de las sales disueltas hacia el perfil del suelo y deposición de las mismas en superficie y aquel proceso relacionado fuertemente con el riego complementario presurizado con agua bicarbonatada sódica en la Región Pampeana, cuyo efecto inmediato es el deterioro de la matriz del suelo por dispersión, disminución de la infiltración e intercambio gaseoso en el perfil y generando consecuentemente toxicidad en los cultivos (Sánchez y Dunel, 2017)

En el valle bonaerense del río Colorado, con el inicio de las primeras obras de riego a ambos márgenes de río durante la primera mitad del siglo XX, y con riegos continuados, pero sin un adecuado sistema de drenaje, se elevó el nivel freático con el consecuente proceso de salinización de los suelos. Esta situación luego fue revertida en parte por un programa de rehabilitación y construcción de obras de drenaje (Cappannini y Lores, 1966; Sánchez y Dunel, 2017). Los suelos salinos y sódicos que todavía se pueden encontrar en el valle son la consecuencia de un drenaje deficiente y un nivel freático elevado, que aún en la actualidad perdura en promedio entre 1,2 m y 1,4 m de profundidad (Sánchez *et al.*, 1998).

El monitoreo constante del agua del río Colorado sugiere que debe emplearse en suelos con adecuado drenaje (Richards, 1954; Cappannini y Lores, 1966, Sánchez y Dunel, 2017) Sin embargo, en regiones bajo riego como el VBRC, y particularmente en el cultivo de cebolla, cuyas necesidades de agua son cubiertas casi en su totalidad por riego con aguas del río, puede existir casos de desbalance de sales por deficiente drenaje y registrarse efectos negativos en el cultivo, especialmente en los estadios prematuros del cultivo de cebolla (Sánchez y Dunel, 2017).

2.3.1 Tolerancia a la salinidad

Existe una clasificación de la tolerancia a la salinidad de los cultivos en función del valor umbral de $CEes$ (conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación del suelo) a partir del cual comienza a reducirse la producción (Figura 12). De esta manera, el rendimiento relativo se puede expresar como función $CEes$ (ecuación 17).

$$\text{Producción relativa (\%)} = 100 - b \times (CEes - CEem) \quad (17)$$

Dónde:

$CEes$: conductividad eléctrica medida en el extracto de saturación del suelo ($dS \cdot m^{-1}$).

$CEem$: $CEes$ límite a partir de la cual el cultivo comienza a perder producción por salinidad.

b : es la pendiente de la recta, que indica el porcentaje de pérdida de producción del cultivo en función del aumento de la salinidad del extracto de saturación del suelo.

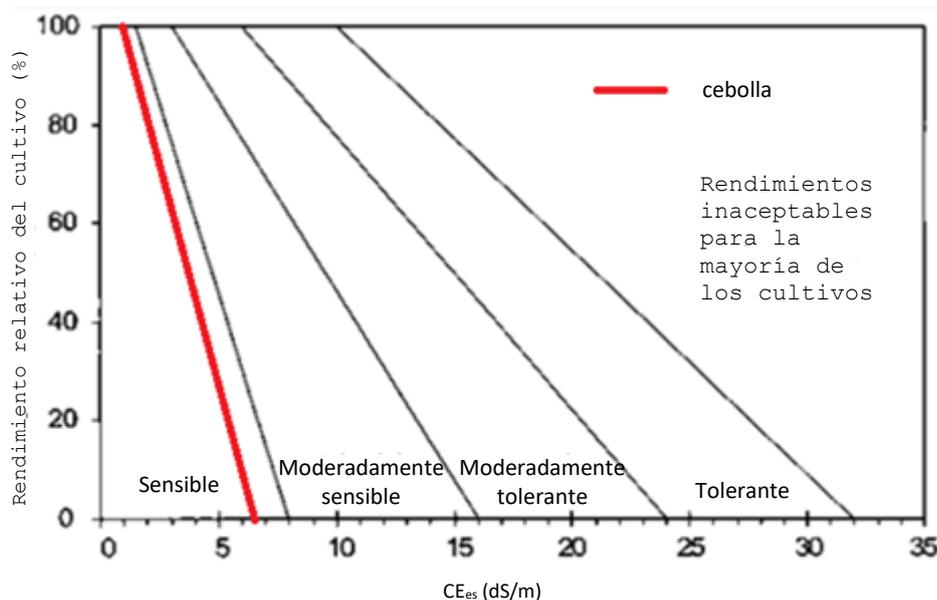


Figura 12. Rendimiento relativo expresado como función de la conductividad eléctrica en el extracto de saturación ($CEes$).

La cebolla es un cultivo que con valores superiores a 1,2 dS/m del extracto de saturación del suelo comienza a ver afectado su potencial de rendimiento, con una pendiente de la recta de producción relativa de 16% y una calificación según su tolerancia a la salinidad como “sensible” (Mass y Hoffman, 1977; Allen, 2000; Sánchez y Dunel, 2017).

2.3.2 Fracción de lavado

El lavado o arrastre de sales por lixiviación al sistema de drenaje es el método de remediación más utilizado en regiones áridas o semiáridas bajo riego por gravedad. Tiene por objetivo disminuir el contenido de sales de la zona radical de los cultivos, mediante la aplicación de mayor cantidad de agua que la evapotranspirada. Esta lámina extra (requerimiento de lavado) es función de la salinidad del agua de riego y de la tolerancia del cultivo y puede aplicarse en cada riego o concentrada en algún periodo del año si los niveles de salinidad del suelo durante la etapa de crecimiento no alcanzan el umbral de reducción de rendimiento del cultivo.

Cuando el fenómeno de salinización se hace evidente en el campo, es común observar que el productor tiende a restringir la aplicación del agua de riego con la creencia que disminuye de ese modo el efecto nocivo de las sales en el suelo. Sin embargo, bajo condiciones adecuadas de drenaje, lo indicado es el incremento de la oferta de agua necesaria para disminuir el efecto osmótico (Sánchez y Dunel, 2017). En regiones áridas, todos los sistemas de riego requieren alguna fracción de lixiviación para evitar la acumulación de sal (Shock *et al.*, 2005). Esta dosis o lámina de riego de percolación profunda, es incluida en el cálculo de la lámina de reposición y objetivo, según la ecuación 18.

$$dr = ETc - PP + dper \quad (18)$$

Dónde:

dr: lámina de reposición u objetivo (mm)

ETc: evapotranspiración de cultivo (mm)

PP: precipitación efectiva (mm)

dper: lámina de percolación para lixiviar sales del suelo (mm)

Esta sobreaplicación de agua de riego se denomina Fracción de Lavado (FL) y se calcula como un porcentaje de agua a agregar a la dotación de riego, destinada a lavar o evitar acumulación de sales en la zona de exploración radical (Ayers y Wescot, 1987). Esta fracción de agua extra para un evento de riego por superficie puede calcularse según la ecuación 20 (Rohades *et al.*, 1992).

$$RL = \frac{CEi}{(5 \times CEem - CEi)} \quad (20)$$

Dónde:

RL: fracción de lavado

CEi: conductividad eléctrica del agua de riego

CEem: conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo máximo permisible si se pretende obtener el rendimiento potencial del cultivo.

Por su parte, Van der Molen (1983) define la lámina de percolación (*dper*) altura de agua necesaria para lixiviar las sales disueltas en el agua de riego y/o el perfil de suelo explorado por las raíces de los cultivos, para garantizar un adecuado nivel productivo según la ecuación 21.

$$dper = \frac{(ETc - PP) \times CE_{agua} - 2 \times (Wc \times D)/100 \times (CE_{esf} - CE_{esi})}{f \times (CE_{esf} + CE_{esi} - CE_{agua})} \quad (21)$$

Dónde:

dper: altura de agua necesaria para lixiviar las sales disueltas en el agua de riego y/o el perfil de suelo explorado por las raíces de los cultivos, para garantizar un adecuado nivel productivo (mm)

ETc: evapotranspiración de cultivo (mm año⁻¹)

PP: precipitaciones (mm año⁻¹)

CEagua: conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹)

Wc: capacidad de campo del suelo (g%g)

D: profundidad de suelo explorado por las raíces del cultivo (mm)

CEesf: conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo final, luego del ciclo de riego (dS m⁻¹)

CEesi: conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo inicial del ciclo de riego (dS m⁻¹)

f: eficiencia de lavado.

Sobre el uso de una u otra ecuación existen diferentes consideraciones. Se destaca en la ecuación propuesta por Van der Molen un balance más completo para el cálculo de la lámina necesaria para lixiviar las sales del suelo, incluyendo evapotranspiración del cultivo, las precipitaciones y la eficiencia de lavado en función de la clase textural (Tabla 4).

Tabla 4. Eficiencia de lavado según distintas texturas de suelo (Van der Molen, 1973).

<i>Textura</i>	<i>Eficiencia de lavado (f) %</i>
Arenoso	65
Franco Arenoso	60
Franco	55
Franco Limoso	50
Franco Arcilloso	45

2.4 Eficiencia de uso del agua

La preocupación por la preservación, en cantidad y calidad, de los recursos naturales renovables y más precisamente del agua, es prioridad para las zonas áridas y semiáridas (Morábito *et al.*, 2012). Ante escenarios de escasas creciente de los recursos hídricos y energéticos y ante el impacto que pueda generar, sobre estos recursos, el cambio climático, es necesario un manejo estratégico y responsable del riego agrícola (Schilardi *et al.*, 2015). Utilizar racionalmente el agua, implica emplearla en actividades agropecuarias que permitan optimizar el beneficio a obtener de los recursos invertidos y manejarla apropiadamente, en cuanto a oportunidad del riego y cantidad, de manera de hacer un uso eficiente y garantizar la sostenibilidad ambiental del regadío (Grassi, 1998).

2.4.1 Oportunidad del riego

En los riegos de superficie, a diferencias de los riegos de alta frecuencia donde el suelo siempre posee contenidos elevados de humedad, se tiende a alargar lo máximo posible el intervalo entre riegos con el objetivo de disminuir al máximo la mano de obra, siendo muy importante en estos casos la determinación del momento a regar u oportunidad del riego. La programación de riego es uno de las herramientas más importantes para la mejor gestión del agua en áreas irrigadas

(Vučić, 1976; Hedge, 1986; Olalla *et al.*, 1994; AlJamal *et al.*, 1999, 2001, mencionados por Pejić *et al.*, 2011). Muchas veces se obtienen rendimientos bajos debido a programación de riego inadecuada (Mermoud *et al.*, 2005).

2.4.1.2 Factor de agotamiento de la humedad del suelo

Después de un riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo. En este punto, el suelo contiene humedad suficiente y es capaz de suministrar el agua con velocidad para satisfacer la demanda atmosférica al cultivo (ETc). En ausencia de una fuente de agua, el contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reducirá y el agua remanente será retenida con mayor fuerza por las partículas del suelo, lo que hará más difícil su extracción por las plantas. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comenzará a sufrir estrés. La disponibilidad de agua total en el suelo (ADT), representa la cantidad de agua disponible para la planta que un suelo pueda almacenar y su magnitud depende del tipo de suelo y la profundidad radicular (Allen *et al.*, 2006). La fracción de ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico es denominada agua fácilmente aprovechable en el suelo (AFA) (ecuación 22).

$$AFA = p ADT \quad (22)$$

Dónde:

AFA: agua fácilmente aprovechable (extraíble) de la zona radicular del suelo (mm)

p: factor de agotamiento [0 - 1] (fracción promedio del total de agua disponible en el suelo que puede ser agotada de la zona radicular antes de presentarse estrés hídrico)

ADT: agua disponible total (mm)

Varios autores coinciden en utilizar 0,5 como valor de referencia del factor de agotamiento de la humedad del suelo (Pascual España, 2008; Grassi, 1998, Allen, 2000). Pascual España (2008) en el libro “Riegos de gravedad y a presión” cita a diversos autores a la hora de considerar cuándo volver a regar: Hidalgo (1971) recomienda regar cuando se haya agotado diferentes fracciones del agua disponible total en función de la textura del suelo. Así, en los suelos muy arenosos o con grava, regar cuando se hubiera agotado 0,4 de agua útil, 0,5 en los arenosos, 0,6 en los francos y 0,66 en los arcillosos. Ollier y Poiree (1981) y Pizarro (1996), recomiendan regar antes de que se haya agotado 2/3 del agua útil. Keller y bliesner (1990) recomiendan regar cuando se ha consumido entre 0,25 y 0,4 del agua útil en cultivos de alto valor y/o de raíces superficiales; 0,4 a 0,5 en cultivo con raíces de profundidad intermedia, y 0,5 en cultivos con raíces profundas. Sin embargo, este factor de agotamiento varía de un cultivo a otro y es función de las etapas del cultivo y el poder evaporante de la atmósfera. FAO indica, en su publicación 56 (Allen, 2000), que este valor oscila de 0,30 para plantas de raíces poco profundas y tasas altas de ETc (> 8 mm d⁻¹) a 0,70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de ETc (< 3 mm d⁻¹) y propone la ecuación 23 como una aproximación numérica para ajustar el valor de *p* de acuerdo a la tasa de ETc.

$$p = p_{cuadro22} + 0,04 \times (5 - ETc) \quad (23)$$

Dónde:

p: factor de agotamiento de la humedad del suelo

ETc: evapotranspiración (mm día⁻¹)

pcuadro22: facto de agotamiento de referencia del cultivo para $ETc = 5 \text{ mm.d}^{-1}$ (cuadro 22, manual FAO 56)

Para la cebolla y para $ETc = 5 \text{ mm. día}^{-1}$, FAO indica un factor de agotamiento de referencia de 0,3 (Allen, 2000).

Por su parte, Noreno (1976, mencionado por Grassi,1998) propone al respecto la ecuación 24 para el cálculo de *p*, en la que intervienen además de la *ETc*, las características del sistema radical del cultivo y un coeficiente hidrodinámico del suelo, en función de la textura.

$$p = [ra \times s \times (1 - ETc)]^{1/3} \quad (24)$$

Dónde:

p: umbral óptimo del riego, expresado como fracción de agotamiento de humedad

ra: coeficiente de densidad de enraizamiento

s: coeficiente hidrodinámico del suelo

ETc: Evapotranspiración del cultivo (cm día⁻¹).

En la Tabla 5 de detallan los coeficientes de densidad de enraizamiento para el cálculo de umbral óptimo de riego.

Tabla 5. Coeficientes de densidad de enraizamiento para el cálculo de umbral óptimo de riego (Grassi, 1998).

Característica radicular	Ejemplo	<i>r_a</i>
Muy profusas	gramíneas pratenses	0,7 - 1,0
Profusas	maíz, sorgo, arroz, girasol	0,5 - 0,7
Moderadamente densas	caña de azúcar, soya, algodón, maní	0,3 - 0,5
Poco densas	papa, tabaco, hortalizas, banano	0,2 - 0,4

Por su parte, el coeficiente hidrodinámico puede calcularse a partir de la relación establecida con la textura de los suelos, según Noreno (1976, mencionado por Grassi,1998) (Figura 13).

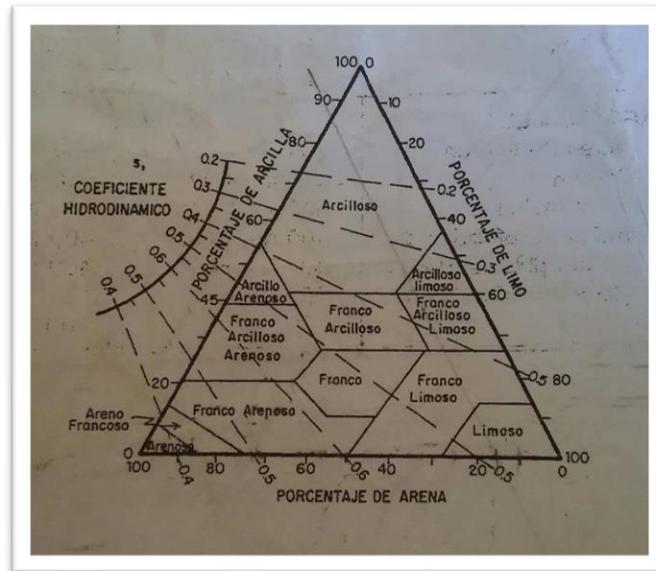


Figura 13. Relación entre el coeficiente hidrodinámico del suelo y su textura (Noreno, 1976, mencionado por Grassi, 1998).

Experiencias locales previas a este trabajo dejan en evidencia que el factor de agotamiento de la humedad del suelo calculado según Noreno (1976) se adapta al manejo de los sistemas de riego por superficie en la zona. Sus valores son acordes al manejo de este método de riego y considera la influencia de la textura en su cálculo. Por su parte, los valores que se obtienen mediante la ecuación de FAO, en la práctica resultan bajos para los sistemas de riego por superficie o gravedad, de baja frecuencia.

2.4.2 Desempeño del riego

La calificación del desempeño o performance de un método de riego puede definirse como la observación, documentación e interpretación sistemática de las actividades relacionadas al riego. Para definir cuantitativamente el desempeño de un riego (en relación con las variables físicas del sistema y a su diseño y manejo) es necesario realizar ensayos de campo (Walker, 1989). Schilardi *et al.*, (2015) también destaca la necesidad de ejecutar evaluaciones de desempeño a campo, como punto de partida para alcanzar el riego estratégico y adecuado para cada propiedad agrícola. Por su parte, Grassi (1998) menciona que la medición sistemática de la eficiencia de riego realizada en diferentes parcelas de un área irrigada, arroja resultados que, procesados y graficados, constituyen una información esencial para efectuar un diagnóstico del estado actual del riego y llevar a cabo programas específicos de mejoramiento del sistema. Este autor también indica que la evaluación de la eficacia del riego en un área determinada constituye una forma de establecer el grado de racionalidad en el uso del agua.

El riego por superficie continúa siendo objeto de investigación para la mejora de los procesos y prácticas de riego, potenciado a su vez por la evolución de los precios de la energía (Pereira *et al.*, 2010).

2.4.2.1 Eficiencia de riego e indicadores de desempeño.

Los indicadores de desempeño son las herramientas de utilidad para mejorar una baja performance en el uso del recurso (Bos *et al.*, 2005; Schilardi, 2010; Morábito, 2003; Gonzáles *et al.*, 2017). Durante décadas se han propuesto diferentes indicadores o parámetros de desempeño, que han sido nombrados como eficiencias y uniformidad.

Christiansen (1942, mencionado por Grassi, 1998) produjo la primera ecuación de eficiencia de distribución para evaluar el grado de uniformidad en el riego por aspersión, al cual denominó “Coeficiente de Uniformidad”. Por su parte, Criddle *et al.* (1956) determinó la uniformidad de distribución, como la relación entre la lámina mínima respecto a la lámina media infiltrada, concepto retomado por Merriam y Keller, 1978 (mencionado por Walker, 2003) quienes definieron la uniformidad de distribución como la relación entre el promedio de la lámina infiltrada en el cuarto más perjudicial, respecto de la lámina media infiltrada y la uniformidad de distribución absoluta como la relación entre la lámina mínima respecto a la promedio infiltrada.

Israelsen (1950), definió la eficiencia de riego, como la relación entre el volumen de agua consumido por los cultivos agrícolas en el predio o sistema de riego y el volumen derivado de la fuente natural. También definió la eficiencia de conducción de agua como la relación entre el volumen de agua derivado en el punto de uso, con respecto al volumen de agua introducido al sistema de conducción en la fuente de suministro. Hansen (1960, mencionado por Grassi, 1998) introdujo el concepto de eficiencia de almacenaje, expresada como la relación entre el volumen de agua almacenada en la zona radical y el volumen de agua allí necesario, con el objeto de evaluar la insuficiencia en la aplicación de agua cuando la eficiencia de aplicación es alta. Sin embargo, el concepto de eficiencia de almacenaje no ha sido totalmente aceptado, ya que se puede obtener un excelente cultivo sin reponer agua a no más de la mitad de la profundidad de las raíces, con riegos más frecuentes (Jensen, 1967).

Posteriormente Israelsen y Hansen (1962) hicieron más específico el concepto de eficiencia de riego, llamándolo eficiencia de aplicación de agua, como la relación entre el volumen de agua almacenada en la zona de exploración radical durante el riego y el agua derivada, indicando que este concepto se ajusta más a la determinación de la eficiencia de un riego específico. También incorporan el término de eficiencia de uso del agua, como la relación entre el volumen que se usa en forma beneficiosa en el predio o sistema con respecto al volumen derivado. Más adelante, definieron varios conceptos: a) rendimiento de aplicación del agua, b) rendimiento de utilización del agua, c) rendimiento del almacenamiento del agua, d) rendimiento de la distribución del agua y e) rendimiento de la evapotranspiración del agua.

Más tarde, Jensen (1967, mencionado por Grassi, 1998) amplió la definición de la eficiencia de riego, incluyendo el agua necesaria para lixiviar las sales del suelo. De esta manera, la eficiencia de riego se expresa como la relación entre el volumen de agua de riego transpirada por las plantas y evaporada por el suelo, más la necesaria para regular la concentración salina del suelo y aquella usada en la formación de los tejidos de las plantas, con respecto al volumen total de agua derivada, almacenada o bombeada para riego. Este autor también propuso un procedimiento sintético para obtener la eficiencia parcelaria o del sistema, que consiste en medir sólo el agua derivada y estimar la evapotranspirada, la requerida para lixiviación de sales y la precipitación efectiva. Sin embargo, el procedimiento expuesto es válido con un buen manejo del riego en el predio ya que con prácticas deficientes la evapotranspiración real puede ser inferior, arrojando un valor de eficiencia más elevado que el verdadero.

En 1974, el “Comité de Requerimientos de Agua para Riego” de la ASCE (American Society of Civil Engineers) citado por Burman *et al.*, (1983), sintetizó la definición anterior de Jensen bajo el nombre de “eficiencia de riego de la unidad”, al expresar que es la relación del volumen de agua de riego requerido para un uso beneficioso (provechoso o útil), con respecto al volumen

de agua derivado. Y en 1978 el “Comité de Riego en Finca” difundió en un primer estándar internacional, los términos y conceptos de la “performance” de los métodos de riego.

Chambouleyron (1977) dividió las eficiencias en dos grandes grupos: el primero como eficiencias externas (referidas a la red de riego) y el segundo grupo, como eficiencias internas (referidas a las parcelas agrícolas). Por otro lado, definió la eficiencia de conducción interna (ECI) como la relación entre el caudal recibido en la parcela regada, respecto del caudal derivado en bocatoma de finca y la eficiencia de riego interna (ERI), como el producto de la eficiencia de aplicación y la eficiencia de conducción interna.

Por su parte, Roscher (1985) propuso una calificación del desempeño de riego, que permite analizar situaciones particulares y clasificarlas según los parámetros de desempeño más importantes en riego por superficie (Tabla 6).

Tabla 6. Calificación de eficiencias de aplicación, almacenaje y distribución en parcela para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985)

Parámetro	Malo	Satisfactorio	Bueno
EAP	< 60	60-75	> 75
EAL	< 80	80-90	> 90
EDI	< 80	80-90	> 90

Bos y Nugteren (1990) dividieron al sistema en tres secciones: conducción, distribución y aplicación en la parcela. La conducción implica el movimiento del agua desde su fuente hasta los canales primarios y secundarios. La distribución de agua implica el movimiento del agua en los canales terciarios, cuaternarios e internos de la propiedad y finalmente la aplicación en la parcela, corresponde al movimiento del agua desde su entrada a la parcela hasta el cultivo. Wolters (1992) resume varios términos de eficiencias de la literatura internacional dividiéndolos en dos grandes grupos. El primer grupo basado en volúmenes (Israelsen 1932; Hansen, 1960; Jensen *et al.*, 1967; Erie, 1968; ICID, 1978; Bos, 1980; Hart *et al.*, 1979; Greenland y Bhuiyan, 1980; Jensen *et al.*, 1980; Levine, 1982; Keller, 1986; Weller *et al.*, 1988 y Schuurmans, 1989, mencionados por Jensen, 2007) y el segundo grupo basado en láminas (Christiansen, 1942; Hall, 1960; Hansen, 1960; y ASCE 1978, mencionados por Jensen, 2007).

También sobre los años 90 diversos autores propusieron el término “fracciones” en reemplazo del de eficiencia (Jensen, 1993; Willardson et al, 1994; Allen et al, 1996,1997; Molden, 1997 y Molden y Sakthivadivel, 1999). Para Jensen (1993) el concepto fracción de agua en lugar de eficiencia, mejora la descripción física y/o la evaluación de la gestión del agua. Willardson (1994) indica que el término pérdidas de riego, aplicado a toda el agua que no se evapora o transpira, debe ser abandonado y reemplazado por el término fracción, que permite identificar tanto los efectos negativos como los positivos. Así, se definieron fracciones para describir cada uso particular del agua: a) Fracción evaporada, como la fracción del agua derivada de riego que es consumida a través de la evaporación o de la evapotranspiración; b) Fracción no reusable, como la fracción del agua derivada que no se evapora y no está mucho tiempo disponible para su re-uso debido a su ingreso en un sistema salino o a la degradación de su calidad; c) Fracción consumida, como la fracción consumida de una derivación y no disponible para ningún otro uso durante un período de tiempo futuro; d) Fracción reusable, como la fracción del agua derivada que retorna a las fuentes para un posterior re-uso.

Siguiendo esta línea, Burt *et al.*, (1997) menciona que, si bien el término “eficiencia de riego” es útil, desde el punto de vista de la sociedad e incluso del productor, puede ser incompleto. La sociedad puede obtener otros beneficios del agua utilizada para el riego, incluso una parte no utilizada por las plantas, por ejemplo, para apoyar la vida silvestre ribereña. O, desde otro punto de vista, puede ser prudente que un productor aplique un poco de agua que el cultivo no usa directamente, es decir, pérdidas inevitables. Este autor, discute el uso de la terminología referida al aprovechamiento del agua de riego con fines agrícolas y revisa y redefine los términos propuestos por la ASCE (1978) actualizando los estándares internacionales en función del balance hídrico, considerando la partición física del agua aplicada en función de su capacidad de re-uso y de su juicio de uso, quedando definidos: usos consuntivos, no consuntivos, benéficos, no benéficos, racionales y no racionales. Según este autor, los “usos benéficos” incluyen: el agua usada en la producción de un cultivo (evapotranspiración, percolación profunda para lixiviación de sales del perfil del suelo, control de la temperatura de la planta o climático, germinación de la semillas, etc.), el exceso de percolación profunda para control de heladas (con suelo en capacidad de campo), el agua escurrida al pie pero usada para regar otro cuartel o parcela localizada aguas abajo (riego encadenado) y el agua almacenada o re-usada/circulada en la parcela o propiedad. Definen también los “usos no benéficos” como el exceso de percolación profunda y la evapotranspiración de malezas o freatófitas (a menos que tengan alguna finalidad especial como el control de erosión o sean hábitat de insectos o de fauna beneficiosa). Por otro lado, los “usos racionales y no benéficos”, como la percolación profunda por la falta de certeza sobre cuándo regar y “usos no racionales” como el uso agrícola del agua en un sitio no apto para el cultivo, ya sea por factores climáticos o de suelo.

Burt, también menciona que, si el objetivo es juzgar el rendimiento de un sistema de riego en el campo y la cuestión no gira en torno a qué es lo que realmente necesita la planta, sino de cuán bien o de manera eficiente el sistema satisface una necesidad percibida (por ejemplo, una profundidad objetivo) el asunto se resuelve con el concepto de alcanzar una profundidad de riego objetivo para ese evento. La profundidad objetivo puede contener una profundidad deseada de agua de recuperación, o puede contener una fracción de lixiviación de mantenimiento además del agua agotada. Esta definición actualizada se aparta de la definición anterior de eficiencia elaborada por la ASCE (1978) que sólo consideraba la humedad agotada del suelo y no incluía agua para lixiviación u otros usos beneficiosos percibidos, siendo varios los autores que citan la necesidad de considerar una fracción para lixiviación de sales dentro de la lámina o profundidad objetivo a reponer (Jensen 1967, mencionado por Grassi 1998).

Para evaluar el desempeño de un área de riego, Burt *et al.*, (1997) propone los siguientes indicadores: a) Eficiencia de riego (IE), como el cociente entre el volumen de agua de riego beneficiosamente usado y el volumen de agua de riego aplicada; b) Coeficiente de uso consuntivo de riego (ICUC) definido como el agua aplicada con el riego que ha sido usada por la planta (evaporación, transpiración y agua que forma parte de los tejidos del cultivo); c) Sagacidad de riego (IS), como el volumen de agua usada beneficiosamente y racionalmente respecto del volumen aplicada de riego, d) Uniformidad de distribución (DU_{lq}), como el cociente entre la lámina media del cuarto más perjudicado y la lámina media acumulada; e) Porcentaje por percolación profunda y por escurrimiento (Pp; Ep %) como el porcentaje del agua de riego aplicada que percola por debajo de la profundidad objetivo o escurre de la parcela, sugeridos anteriormente y por Israelsen y Hansen, (1965) y Walker & Skogerboe (1987); f) Adecuación de riego (AD), como la relación entre la lámina media del cuarto más perjudicado y la lámina requerida, asumiendo que ésta es uniforme en toda la parcela a regar (estima si el riego ha sido insuficiente, adecuado o exagerado) y por último g) Eficiencia de almacenaje

(EAL), definida como la relación entre la lámina almacenada en el perfil, después del riego, respecto de la lámina necesaria que se esperaba almacenar o almacenable. Expresa el grado de suficiencia del riego, evaluado en la capa de suelo que exploran las raíces (Grassi, 1998).

Con respecto a la evaluación a campo de la eficiencia de riego parcelaria, Grassi (1998) indica que la lámina consumida se obtiene por diferencia de lámina antes y después del riego en la porción del suelo que comprende la rizósfera, más la evapotranspiración del cultivo durante los días que media entre los muestreos de humedad. Con respecto a la medición luego del riego, este autor menciona que en presencia del cultivo se reduce el lapso en el cual se alcanza el equilibrio en el movimiento descendente del agua, por lo que sería factible realizar su determinación pasadas 24 horas del riego en suelos arenosos, 48 horas en suelos francos y hasta varios días en suelos arcillosos.

Por su parte, Van Halsema y Vincent (2012) definen la eficiencia de riego desde la perspectiva del propietario: la asignación del agua pertenece al sistema de riego y la eficiencia de riego (IE) mide qué tan bien el sistema maneja o usa el agua y que tan bien es capaz de conducirla y convertirla en un uso productivo. Por lo tanto, desde el punto de vista del agricultor, el agua que sale del manejo del sistema es considerada una pérdida. Sin embargo, desde la mirada de los responsables de la gestión, las recomendaciones apuntan a una planificación de las diversas nociones de eficiencia de uso del agua (water use efficiency, WUE) y de los factores de productividad a nivel de cuenca (water productivity, WP). La WP (kg/m^3) representa la capacidad productiva por unidad de agua evapotranspirada y la WUE (kg/m^3) define la producción por unidad de agua aplicada. Sin embargo, el término WUE ha sido desaconsejado debido a la imprecisa interpretación (bajos valores de WUE proporcionan una falsa sensación de “derroche”) y lo aleatorio de los componentes del balance hídrico (Bluemling *et al.*, 2007; Perry, 2007) que la hacen poco confiable. Estos autores para evitar confusiones aconsejan reservar el uso del concepto productividad del agua (WP) como una medida de la productividad de los procesos fisiológicos que ocurren en el cultivo, relacionada con el consumo real de agua, donde la evapotranspiración está medida con precisión.

Según Pereira *et al.*, (2012), el uso del agua es más eficiente cuando se maximizan los usos benéficos, se incrementa su productividad y se minimizan las pérdidas y/o la contaminación. Sin embargo, estas condiciones pueden dar al cultivo la oportunidad de una mayor evapotranspiración, por lo que, un uso más eficiente del agua, no necesariamente significa que se consuma una menor cantidad (Ahmad *et al.*, 2007).

Actualmente se sigue revisando y discutiendo el término “eficiencia”, proponiendo para el mejor entendimiento del manejo racional del recurso agua los términos: “rendimiento” o “desempeño” del riego sostenible.

2.4.2.2 Variables de manejo y de sistema en riego por superficie

Las variables físicas que determinan el desempeño de un evento de riego pueden agruparse en “variables de manejo”: parámetros físicos cuya magnitud puede cambiar en un amplio rango en función de la decisión del usuario, y “variables del sistema”: parámetros físicos propios del sistema y que poco o nada de margen de cambio tienen (

Tabla 7) (Feyen y Zerihun 1999).

Tabla 7. Variables de manejo y sistema en riego por superficie.

VARIABLES DE SISTEMA	VARIABLES DE MANEJO
lámina de reposición (dr)	caudal de manejo y/o caudal unitario (Q_m, q_u)
pendiente del terreno (S_o)	tiempo de aplicación o corte (T_{ap})
coeficiente de rugosidad (n)	longitud de la unidad de riego (L)
parámetros de la ecuación de infiltración (A, B, f_o)	
geometría de surcos (g_s)	

La uniformidad de distribución (EDI) es función de variables de manejo y de sistema (ecuación 25)

$$EDI = f(Q_m; q_u; L; n; S_o; A; B; f_o; T_{ap}; g_s) \quad (25)$$

La eficiencia de aplicación (EAP) también es dependiente de variables de diseño o sistema como de manejo (ecuación 26).

$$EAP = f(Q_m; q_u; L; n; S_o; A; B; f_o; T_{ap}; g_s; dr) \quad (26)$$

Las variables de manejo que se encuentran al alcance del operario del riego durante el mismo evento de riego, son el caudal unitario (q_u) y el tiempo de aplicación o corte (t_{ap}). En menor medida el caudal de manejo (Q_m), ya que estará sujeto a la concesión que disponga el establecimiento y del tipo de entrega que tenga (continua o por turnos) y la lámina de reposición (dr), es decir de la oportunidad del riego, por el mismo motivo.

Por otro lado, si observamos las ecuaciones anteriores, podemos ver que la eficiencia de aplicación es función de la uniformidad de distribución y del criterio de programación de los riegos (Pereira y Trout, 1999; Pereira *et al.*, 2002).

2.5 Eficiencias de aplicación potencial.

Merriam *et al.*, (1973, mencionado por Morábito, 2003) proponen el cálculo de la eficiencia de aplicación potencial (EAPp) definida como aquella factible de alcanzar cuando la lámina media infiltrada y almacenada es coincidente con la lámina de reposición óptima, indicando el grado de eficiencia de aplicación que puede alcanzar el método si el manejo es óptimo, minimizando las pérdidas por percolación profunda y/o por escurrimiento al pie, operando el riego con caudales unitarios adecuados y tiempos de aplicación precisos. Del mismo modo, Burt *et al.*, (1997) define la eficiencia de aplicación potencial del riego (PAElq), suponiendo que el momento del riego, el tiempo de riego, el caudal unitario y la uniformidad de riego (DUlq) han sido adecuadas, reduciendo las láminas percoladas y/o escurridas al mínimo. Es decir, estima la máxima eficiencia de aplicación, proporcionando una idea del nivel de eficiencia de aplicación que es posible alcanzar. Morábito (2003) define la eficiencia potencial siguiendo dos metodologías: la primera según el manejo del método de riego (EAP_M), que indica el grado de eficiencia máxima u óptima que puede alcanzar el método de riego si su manejo a campo es óptimo y la segunda según el balance salino (EAP_S), definida como la eficiencia de aplicación máxima que se puede alcanzar sin poner en el peligro cierta productividad deseada del cultivo por acumulación de sales en el suelo.

2.6. Modelos matemáticos de diseño y evaluación del riego por escurrimiento superficial.

La gran cantidad de variables e interacciones que involucran al riego por superficie lo hace un proceso complejo y difícil de predecir o simular cuantitativamente. Durante años las únicas referencias para ingenieros en riego eran tablas y fórmulas simples que dieron sólo pautas o guías poco precisas (Jurriëns *et al.*, 2002, mencionado por Schilardi, 2010).

Durante las últimas décadas se han desarrollado modelos matemáticos que explican todos los procesos involucrados en el riego por superficie. Dichos modelos requieren información precisa de variables como: dimensiones de la parcela a regar, pendiente topográfica, caudal, tiempo de aplicación, velocidad de infiltración de los suelos, rugosidad de la superficie del suelo, etc. La interacción de estas variables permite determinar la velocidad de avance y receso del frente de agua sobre la superficie del suelo, las láminas de agua aplicada, infiltrada, escurrida, almacenada y percolada, calculando, por último, las distintas eficiencias de riego. Todos ellos son representaciones simplificadas del sistema físico real expresado mediante ecuaciones matemáticas (Morábito, 2003). Así, con el paso de los años, los modelos matemáticos aplicados al riego por superficie se volvieron más sofisticados, resultando de utilidad para optimizar las evaluaciones de riego realizadas a campo y plantear escenarios de optimización que permitan mejorar el diseño y la operación de los métodos de riego, pudiendo ser usados en el manejo del riego en tiempo real (Losada Villasante y Roldan Cañas, 2009, Schilardi *et al.*, 2009, Schilardi, 2010).

Morábito *et al.* (1991) desarrollaron el modelo ERFIN que permite calcular las eficiencias de riego en el ámbito parcelario, para diferentes métodos de riego por escurrimiento superficial: surcos o melgas, con o sin desagüe al pie, es decir, es un modelo de evaluación. Posteriormente, Chambouleyron *et al.*, (1993) desarrollaron el modelo DISEVAL, modelo para el diseño y evaluación de riego por superficie que permite calcular eficiencias y diseñar o rediseñar caudales y tiempos adecuados para asegurar un riego eficiente en la parcela. En 1993 la Universidad de Utah publicó el programa SIRMOD II (Walker, 1993) y en el 2003 el SIRMOD III (Walker, 2003) que contiene los tres modelos: onda cinemática, inercia cero e hidrodinámico.

El USDA-ARS (United State Department of Agricultura – Arid Land Agricultural Research Center) que ha trabajado en el desarrollo de modelos de simulación hidráulica y software para analizar los métodos de riego por superficie desde los años setenta (Bautista *et al.*, 2009a, 2009b, 2007) desarrolló en el año 2004 el modelo WinSRFR, con actualizaciones en 2006, 2007 y 2009 y 2012, utilizando los modelos matemáticos de inercia-cero y onda cinemática. El modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3 se divide en cuatro módulos: 1) *Event Analysis*: evalúa la performance del riego según datos de campo y estima los parámetros de infiltración de los suelos necesarios para la evaluación, simulación, diseño y operación; 2) *Physical Desing*: optimiza el diseño físico de melgas y surcos, especialmente en su largo y ancho; 3) *Operations Analysis*: optimiza la operación del riego para surcos y megas, calculando el caudal y tiempo de corte y 4) *Simulation*: simula el riego brindando información de todos sus parámetros de desempeño según Burt *et al.*, (1997).

En un estudio de desempeño de riego sobre regantes del río Tunuyán Superior, Schilardi (2010) obtuvo, mediante el modelo de simulación de riego WinSRFR, distintos escenarios de optimización que le permitieron concluir que, mejorando la práctica de manejo del riego con poca o ninguna inversión, la eficiencia de aplicación podía incrementarse un 26% para métodos de riego con desagüe al pie y en un 20% para métodos sin desagüe. Trabajos similares han sido realizados por Morábito (2003) para el área de riego del río Mendoza. Actualmente el El USDA-ARS continúa trabajando en el modelo WinSRFR, para expandir las capacidades del modelo para simular los procesos hidráulicos del riego por superficie.

METODOLOGÍA

3 METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

El estudio se realizó en área de riego del valle bonaerense del río Colorado (VBRC) ubicado entre los 39° y los 40° de latitud sur y entre los 62° y 63° de longitud oeste y en su desarrollo de 78 kilómetros norte a sur y 103 kilómetros de oeste a este. Las evaluaciones de riego incluyeron las tres intendencias de riego: Mayor Buratovich, Pedro Luro y Villalonga (Figura 14).

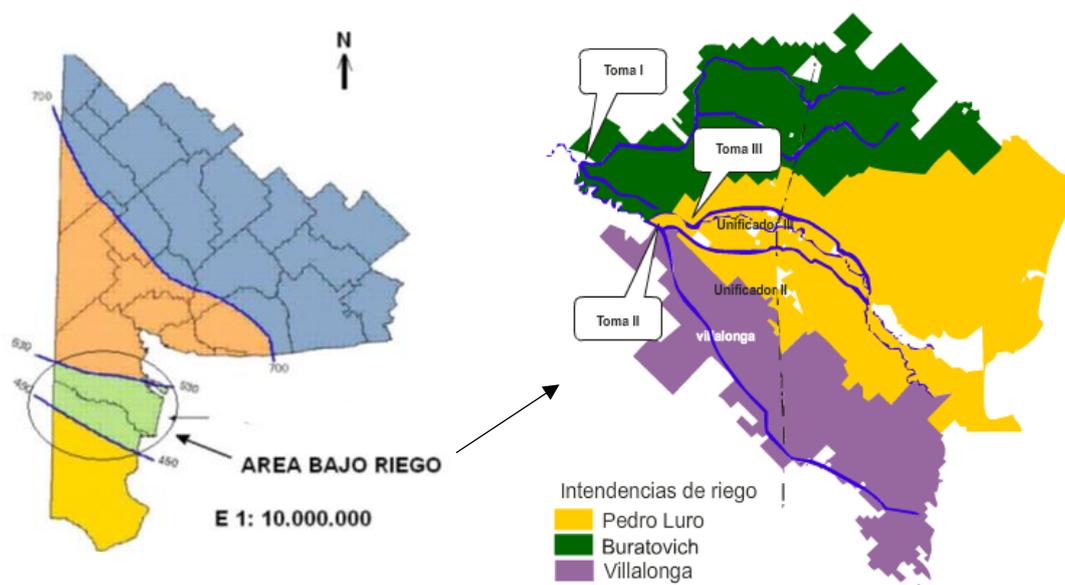


Figura 14. Área de riego del valle bonaerense del río Colorado e intenciones de riego (Fuente: CORFO)

3.2 Evaluaciones a campo.

Para realizar las evaluaciones a campo se contactó a técnicos del Consorcio Hidráulico del valle bonaerense del río Colorado y CORFO Río Colorado, con sede de trabajo en cada una de las intenciones de riego. De esta manera se establecieron reuniones de trabajo en las cuales se discutieron los objetivos, el alcance del proyecto y la metodología de campo. Acordados estos puntos con el personal responsable de la administración del agua, se procedió a coordinar el trabajo a campo. Tanto el INTA Hilario Ascasubi, CORFO Río Colorado, como el Consorcio Hidráulico participaron activamente de las evaluaciones, poniendo a disposición tanto recursos materiales como humanos.

La unidad de análisis fue la parcela cultivada con cebolla de días largos en distintas propiedades agrícolas con derecho a riego superficial. Para la cebolla sembrada en plano y regada por inundación se tomó 1 melga como unidad de análisis. Para la cebolla sembrada en bordos y regada en surcos, se evaluaron 3 surcos. Durante el mismo evento de riego el operario regó los surcos o melgas adyacentes. El estudio se realizó desde septiembre de 2015 a febrero de 2016. El tamaño de la muestra fue de 30 propiedades.

Previo a cada evaluación a campo, se certificó con CORFO Río Colorado y el productor o encargado del cultivo, que el lote a evaluar en la oportunidad de visita estuviera recibiendo su turno de riego e irrigando el cultivo. Obtenida la autorización y ubicado el establecimiento, se procedió a dirigirse con el equipamiento de campo. Una vez en el campo se contactó al operario del riego, y se lo puso al tanto de las características del estudio y las mediciones a realizar durante el mismo. De esta manera se dio paso a la instalación del equipamiento y a la evaluación propiamente dicha. Durante el riego el operario regó de manera habitual y de ninguna forma se interfirió su desempeño.

3.2.1 Equipamiento

El equipamiento utilizado a campo comprendió: vehículos, minimolinete (marca A. OTT Kempton tipo C2 “10.150”), infiltrómetros de Doble Anillo de Munz, nivel de anteojo marca Pentax AL -321 32x, cintas métricas de 100, 7 y 5 metros, cronómetros, barreno de media caña y helicoidal, pesafiltros de aluminio, palas, nivel de albañil, estacas de madera, recipientes plásticos para toma de muestras de agua, cilindros de densidad aparente, calibre, bolsas plásticas para toma de muestras de suelos y manguera de nivel, entre otros elementos.

3.2.2 Metodología a campo

Las evaluaciones de desempeño a campo del riego de cebolla, se realizaron según la metodología propuesta por Chambouleyron y Morábito (1982) y los estándares de ASAE (2000).

3.2.2.1 Aforo en compuerta

Durante el riego en cada propiedad se ubicó la compuerta responsable del ingreso de agua y se realizó su aforo (Figura 15) según la ecuación 27 (Hidalgo Granados, 1971).

$$Q = K \times Sec \times \sqrt{2 \times g \times h}$$

Dónde:

Q : caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

K : coeficiente de gasto menor que la unidad, que depende del material y de la sección (según recomendación de los organismos administradores del agua en el valle, se utilizó un valor de 0,65)

Sec : sección resultante del producto del ancho y apertura de la compuerta (m^2)

g : $9,8 m \cdot s^{-1}$

h : carga hidráulica (m)



Figura 15. Aforo de compuertas libres (a) y ahogadas (b) durante las evaluaciones de riego.

La carga hidráulica (h) para compuertas ahogadas se calculó $h_1 - h_2$ y para compuertas libres como $h_1 - (a/2)$ (Figura 16).

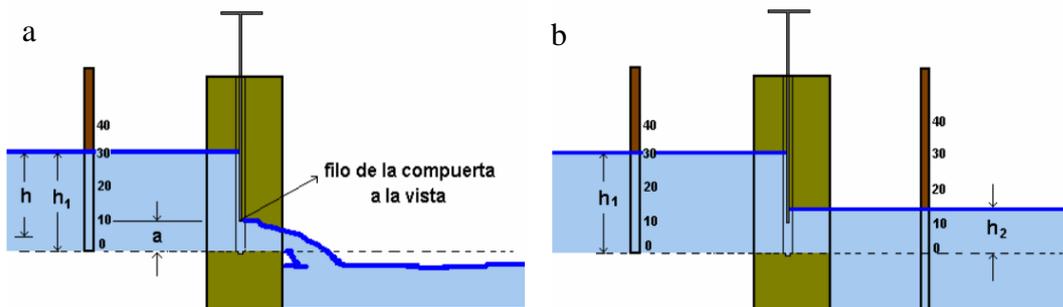


Figura 16. Compuerta libre (a) y compuerta ahogada o sumergida (b).

3.2.2.2 Aforo en acequia

El caudal de manejo durante el riego, se calculó mediante el producto de la sección y la velocidad media con que circula el agua (ecuación 28). El valor de velocidad media se obtuvo a partir de las observaciones de la velocidad efectuadas en tres puntos a lo largo de la vertical entre la superficie del agua y el lecho del canal. La velocidad se midió colocando el molinete de hélice en la vertical a 0,2, 0,6 y 0,8 de profundidad a partir de la superficie (Figura 17). La velocidad media se obtuvo con la ecuación 29. Este método de medición de la velocidad en 3 puntos se utiliza en canales de riego cuando se quiere tener precisión (Basán Nickisch, 2008).

Para determinar la sección de la acequia, se utilizaron reglas y cintas métricas y la ecuación del área de un trapecio, triángulo o elipse según qué figura geométrica mejor la representara (ecuaciones 30, 31 y 32).

$$Q = Vm \times Sec \quad (28)$$

Dónde:

Q : caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Vm : velocidad media ($m \cdot s^{-1}$)

Sec : sección (m^2)



Figura 17. Medición de la velocidad de circulación del agua en acequia con Molinete de hélice Global Water.

$$Vm = v_{0.2} \times 0,25 + v_{0.6} \times 0.5 + v_{0.8} \times 0.25 \quad (29)$$

Dónde:

Vm = velocidad media vertical ($m^3 \cdot s^{-1}$)

$v_{0.2}$ = velocidad a 20% de la profundidad (h) desde el pelo de agua ($m^3 \cdot s^{-1}$)

$v_{0.6}$ = velocidad a 60% de la profundidad (h) desde el pelo de agua ($m^3 \cdot s^{-1}$)

$v_{0.8}$ = velocidad a 80% de la profundidad (h) desde el pelo de agua ($m^3 \cdot s^{-1}$)

$$At = ((B + b) \times h)/2 \quad (30)$$

At : área de un trapecio

B : base mayor

b : base menor

h : altura

$$Atr = (B \times h)/2 \quad (31)$$

Atr : área de un triángulo

B : base

h : altura

$$Ae = \pi \times a \times b \quad (32)$$

Ae : área de la elipse

π : constante matemática

a : semieje mayor

b : semieje menor

3.2.2.3 Aforo de ingreso a surcos o melgas

Para estimar el caudal ingresando a la parcela bajo estudio, en aquellos casos que el productor utilizó sifones de riego se llevó un registro del número de sifones, el diámetro interno, el material y el largo y se midió la carga hidráulica (h) de trabajo utilizando manguera de nivel (Figura 18). A su vez, se tomó una muestra de cada los sifones registrados a campo durante las evaluaciones y se aforaron de forma volumétrica en la EEA Hilario Ascasubi del INTA (Figura 19) para distintas cargas hidráulicas. Posteriormente se construyeron las curvas de gasto para cada sifón evaluado. Con esta información y con el registro a campo se calculó con precisión el caudal erogado de los sifones durante cada evento de riego.

En aquellos casos que el agua fue derivada a la parcela mediante boquetes, se consideró el caudal de manejo en la acequia como el entregado a la parcela y se dividió por el número de melgas regadas simultáneamente, por lo general una o dos melgas a la vez (Figura 20).



Figura 18. Medición a campo de la carga hidráulica de los sifones de riego mediante regla y manguera de nivel.



Figura 19. Aforo volumétrico de los sifones de riego en la EEA Hilario Ascasubi del INTA.



Figura 20. Agua derivada a la parcela mediante boquetes sobre la acequia de riego.

2.2.2.4 Infiltración

Para describir la infiltración de los suelos bajo estudio, se utilizó el método de Doble Anillo de Munz (Haise *et al.*, 1956, mencionado por Grassi 1998 y Walker y Skogerboe, 1987, adaptado por “NRCS-USDA”, mencionado por Grassi 1998) y se realizó el ensayo correspondiente en cabeza y pie de la unidad de riego (Figura 21).



Figura 21. Ensayo de infiltración a campo con el Doble Anillo de Munz en un lote de cebolla regado por surcos.

3.2.2.5 Avance y receso del frente de agua.

Para determinar el avance del frente de agua sobre la superficie del suelo se dividió la longitud total de la parcela regada en diez partes iguales, colocando en cada una de ellas una estaca indicadora de estación. Comenzado el riego, se registró el tiempo acumulado desde el inicio de la operación, que demoró el frente de agua en alcanzar cada estación. De la misma forma se registró el receso o desaparición del agua sobre la superficie del suelo una vez finalizada la entrega de agua a la parcela. Esta operación se realizó en tres surcos (Figura 22) y en una melga (Figura 23), según se tratase de uno u otro sistema de riego. Para el caso de las melgas, se colocaron en cada estación dos columnas de estacas transversales, con el fin de cubrir el avance en todo el ancho de las mismas.



Figura 22. Estaciones de avance y receso del frente de agua en cebolla regada en surcos.



Figura 23. Estaciones de avance y receso del frente de agua en cebolla regada en melgas.

3.2.2.6 Pendiente.

Para determinar la pendiente parcial y total de la unidad de riego, se midió la cota en cada una de las estacas utilizadas para indicar las estaciones de avance y receso, mediante nivel de anteojo marca Pentax AL -321 32x (Figura 24).



Figura 24. Estudio de la pendiente en un lote de cebolla regadas por surcos mediante nivel de anteojo marca Pentax AL -321 32x.

3.2.2.6 Volumen de agua aplicado.

El volumen de agua aplicado a la unidad de riego se calculó como el producto del caudal entregado a la parcela y el tiempo de riego o corte (ecuación 33).

$$Vol = Q \times tap \quad (33)$$

Dónde:

Vol: volumen (L)

Q: caudal (L. s⁻¹)

t_{ap}: tiempo de aplicación o corte (s)

2.2.2.7 Dimensiones de la unidad de riego y número de surcos o melgas regadas de manera simultánea

Previo al riego se midió el largo y espaciamiento entre surcos o ancho de melgas mediante cintas métricas (Figura 25).



Figura 25. Medición a campo de largo y ancho de la unidad de riego bajo estudio con cintas métricas.

En las evaluaciones que regaron mediante surcos se tomó registro de su geometría (ancho superficial, medio e inferior) y el perímetro mojado mediante reglas y cintas métricas en cabeza, medio y pie de la unidad de riego. Durante la evaluación a campo también se tomó registro del número de surcos o melgas regadas de manera simultánea y el frente de riego.

3.2.2.8 Muestras de suelo y agua

Durante la evaluación de riego a campo se tomaron muestras de suelo para humedad antes y después del riego en tres sitios: cabeza, medio y pie (con dos repeticiones) y a dos profundidades (cm) 0-25 y 25-50. Se utilizó un barreno de media caña y pesafiltros. Por otro lado, se extrajeron seis muestras de suelo con barreno helicoidal, tres superficiales (0-25 cm) y tres subsuperficiales (25-50 cm), en cabecera, medio y pie (Figura 26) para realizar luego distintas determinaciones físico-químicas en laboratorio. También se tomó una muestra de agua de riego mediante el uso de recipientes estériles en la compuerta del establecimiento o bocatoma, para analizar luego su salinidad en laboratorio.



Figura 26. Toma de muestras de suelo con barreno helicoidal

3.2.2.9 Perfil de suelo explorado por las raíces

La evaluación a campo incluyó la determinación del perfil de suelo explorado por las raíces del cultivo mediante excavación, observación visual y medición con cinta métrica. Este procedimiento se realizó hasta la evaluación número 22. En las evaluaciones siguientes y debido a la complejidad de esta determinación a campo con el cultivo en su estado de desarrollo avanzado, se consideró 50 cm como la profundidad radicular máxima que alcanza el cultivo desarrollado en un suelo sin impedimentos físicos. Se utilizó como base las referencias nacionales e internaciones que discuten la temática y puntualmente el trabajo realizado por el Ing. Cardoso en la EEA Hilario Ascasubi para su tesis doctoral.

3.3 Metodología de laboratorio

Las muestras de suelo y agua fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos y Agua de la Estación Experimental Agropecuaria del INTA Hilario Ascasubi, certificado por el Programa Nacional de Interlaboratorios de Suelos Agropecuarios (PROINSA) y miembro de la Red de Suelos, Aguas y Material Vegetal de INTA.

Con las muestras de suelo recolectadas a campo se realizaron las siguientes determinaciones físico-químicas: conductividad eléctrica y contenido de iones hidrógeno (pH) del extracto de saturación; cationes solubles por complejometría; fotometría de llama y Carbono orgánico oxidable mediante Walkley & Black escala semimicro (IRAM SAGyP 29571-2) y textura por el hidrómetro de Bouyoucos (Figura 27). Con las muestras de agua recolectadas en compuerta, se realizaron las siguientes determinaciones físico-químicas: sales totales a estufa a 105°C durante 24 hs; conductividad eléctrica, conductimetría; contenido de iones hidrógeno (acidez/alcalinidad), potenciometría; catión Calcio y Magnesio, complejometría; Dureza Total, en CaCO₃; catión Sodio, fotometría de llama y Relación adsorción de sodio (RAS), calculado a partir de los cationes.

Las muestras de suelo para humedad antes y luego del riego, fueron pesadas húmedas y luego llevadas a estufa a una temperatura de 105°C hasta peso constante. El contenido de agua como porcentaje en peso al momento de muestreo se calculó según la ecuación 34.

$$W = \frac{Mh - Ms}{Ms - Mr} \times 100 \quad (34)$$

Dónde:

W : contenido de humedad de la muestra (%)

Mh : peso del recipiente más la muestra de suelo húmedo (g.)

Ms : peso del recipiente más la muestra de suelo seco (g.)

Mr : peso del recipiente (g.)



Figura 27. Análisis de textura por el método de Bouyoucus en el laboratorio de Suelo y Agua de la Estación Experimental Hilario Ascasubi del INTA.

3.4 Metodología de gabinete.

Los datos obtenidos a campo fueron sistematizados y evaluados en gabinete a través de hojas de cálculo Microsoft Excel 2010 y el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3.

3.4.1 Análisis estadísticos

3.4.1.2 Análisis de la varianza

Para analizar diferencias entre medias, cuando los niveles a comparar fueron dos, se realizó un análisis de varianza equivalente a una prueba t de Student. Cuando los niveles a comparar

fueron mayores, se utilizó la prueba de la diferencia mínima significativa o LSD de Fisher. Aquellos casos que presentaron datos sospechosos que pueden afectar los supuestos del modelo, se optó por transformar los datos mediante rango y aplicar un análisis de varianza a los datos transformados, equivalente al test no paramétrico correspondiente (Mann-whitney o Kruskal wallis).

3.4.1.3 Estimación del error de muestreo

Se estimó el error de muestreo para una confiabilidad del 95% para los indicadores de desempeño, según la ecuación 35.

$$\mp B = z \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (35)$$

Dónde:

B: límite del error de muestreo para la confiabilidad que fija z

z: percentil de la distribución normal. Para un 95 % de confiabilidad $z = 1,96$

n: número de muestras tomadas de la población bajo estudio.

S: estimación de la desviación típica muestral, utilizada como estimador de la desviación típica poblacional.

4.4.2 Variables explicativas o de clasificación.

Las variables explicativas o de clasificación utilizadas fueron: a) Intendencia de riego (Mayor Buratovich, Pedro Luro, Villalonga) b) Método de riego (Surco, Melga); c) Tenencia de la tierra (Propietario, Arrendatario); d) Entrega de agua (Con turno, Sin turno); e) Tipo de derivación a la parcela (Sifón, Boquete); f) Etapa de cultivo (E_1 : Siembra – 2 hojas verdaderas; E_2 : 2 hojas verdaderas – Bulbificación; E_3 : Bulbificación - Madurez); g) Estación (Primavera, Verano).

Para el análisis de los datos fueron definidas tres etapas de desarrollo del cultivo, como se observa en la Figura 28.

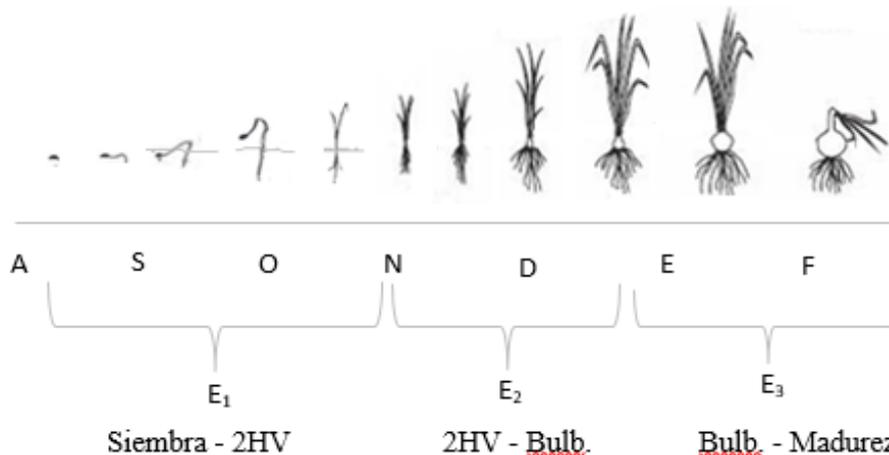


Figura 28. Etapas de desarrollo del cultivo de cebolla de días largos para bulbo en VBRC, definidas para el estudio. Fuente: elaboración propia.

3.4.2 Caracterización de parámetros físicos y de manejo

Con los pares de datos provenientes de cada ensayo de infiltración a campo se obtuvieron un total de 56 ecuaciones de infiltración. Para obtener una ecuación que represente la curva de velocidad de infiltración y velocidad de infiltración básica promedio de la zona de estudio según Kostiakov (1932, mencionado por Grassi, 1998) se promediaron los parámetros A y B de la ecuación de infiltración para no perder la independencia de los datos. De manera paralela se analizaron los datos según mínimos cuadrados ponderados y pendientes aleatorias (modelos mixtos).

Por otro lado, todas las ecuaciones resultantes del ensayo a campo con el doble anillo de Munz se ajustaron según la lámina aplicada e infiltrada medida a campo según la ecuación 36.

$$Icum_{aj} = A \times t_o^B \times \frac{P}{w} \times \frac{db}{Icum} \quad (36)$$

Dónde:

$Icum_{aj}$: infiltración acumulada ajustada en un tiempo t (mm)

t_o : tiempo de oportunidad (min)

P: perímetro mojado (m)

w: ancho de la unidad de riego (m)

db: lámina bruta (mm)

$Icum$: lámina infiltrada acumulada promedio resultante de aplicar la ecuación del doble anillo de Munz.

También se calcularon los parámetros de la ecuación de infiltración (A y B) y la infiltración básica que arroja el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3. En ambos casos se promediaron los parámetros A y B de las ecuaciones de infiltración resultantes para obtener una curva representativa y se analizaron los datos según mínimos cuadrados ponderados y pendientes aleatorias (modelos mixtos).

Los pares de datos de avance se utilizaron para obtener los parámetros p y r de la ecuación de avance para cada caso bajo estudio, que luego fueron promediados para obtener una ecuación que represente el avance del agua de riego por superficie de cebolla en el valle. A su vez, se obtuvieron los parámetros de las ecuaciones de avance para los casos de melga y surcos en forma discriminada. De manera paralela se analizaron los datos según mínimos cuadrados ponderados y pendientes aleatorias (modelos mixtos). De la misma manera y con los pares de datos de receso se obtuvieron los parámetros a y b de la ecuación de receso. Luego se realizó la misma operación con los casos evaluados de melgas y surcos de manera independiente.

Los registros de caudal en compuerta (Q_c), caudal de manejo en acequia (Q_m) y unitario (q_u), pendiente longitudinal (S_o), tiempo de aplicación (t_{ap}), frente de riego (Fr), número de melgas y surcos regados de manera simultánea y longitud de surcos y melgas (L) fueron agrupados según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación.

3.4.3 Láminas de riego

Para cada evento de riego se calcularon las siguientes láminas de riego:

a) Lámina de reposición o consumida (d_c): diferencia del contenido de humedad del suelo antes (d_1) y después del riego (d_2) más la evapotranspiración (E_t) ocurrida en el período de n días que media entre ambos muestreos (ecuación 37) (Grassi, 1998).

$$d_c = d_2 - d_1 + n \times E_t \quad (37)$$

Dónde:

d_c : lámina de reposición o consumida (mm)

d_1 : lámina de agua en el suelo antes del riego (mm)

d_2 : lámina de agua en el suelo después del riego (mm)

E_t : evapotranspiración del cultivo (mm.d⁻¹)

n : días que media entre los muestreos de humedad para el cálculo de d_1 y d_2

b) Lámina bruta aplicada (d_b): relación de volumen del agua ingresada a la parcela regada (Vol) y su superficie (Sup) (ecuación 38).

$$d_b = V/Sup = (Q \times tap)/Sup \quad (38)$$

Dónde:

d_b : lámina bruta (mm)

Vol : volumen de agua aplicado (litros)

Sup : superficie bajo riego (m²)

Q : caudal (L/min)

tap : tiempo de aplicación o riego (min)

c) Lámina percolada (d_p): lámina infiltrada que ha superado la lámina consumida o lámina objetivo con el riego.

Al tratarse de riego sin desagüe al pie no existe escurrimiento. De esta manera la lámina percolada (d_p) fue calculada según la ecuación 39).

$$d_p = d_b - d_c \quad (39)$$

Dónde:

d_p : Lámina percolada (mm)

d_b : La lámina bruta aplicada (mm)

d_c : lámina consumida (mm)

La lámina bruta (d_b), lámina de reposición o consumida (d_c) y lámina percolada (d_p) expresadas en mm, fueron agrupadas según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación del año.

3.4.4 Indicadores de desempeño del riego.

Se utilizó la metodología desarrollada por Chambouleyron y Morábito (1982), los indicadores de desempeño propuestos por Grassi (1998), Burt *et al.*, (1997) y Morábito (2003) y los estándares de ASCE (1978); ASAE (2000).

Los indicadores de desempeño: Eficiencia de Conducción Interna (ECI), Eficiencia de Aplicación (EAP) y Eficiencia de distribución (EDI_q) fueron agrupados según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación del año.

3.4.4.1 Eficiencia de Conducción Interna (ECI)

La eficiencia de conducción interna se calculó según la ecuación 40.

$$ECI = \frac{\text{caudal de manejo en acequia}}{\text{caudal de ingreso en compuerta}} = \frac{Q_m}{Q_c} \times 100 \quad (40)$$

Dónde:

ECI: Eficiencia de conducción interna (%)

Q_m : caudal de manejo en acequia (L. s⁻¹)

Q_c : caudal de ingreso en bocatoma o compuerta (L. s⁻¹)

3.4.4.2 Eficiencia de distribución (EDI_q).

La eficiencia de distribución se calculó según la ecuación 41.

$$EDI_q = \frac{\text{lámina infiltrada en el cuarto más perjudicado}}{\text{lámina infiltrada promedio}} = \frac{d\left(\frac{1}{4}\right)}{\bar{d}} \times 100 \quad (41)$$

Dónde:

EDI_q: Eficiencia de distribución del cuarto más perjudicado (%)

$d\left(\frac{1}{4}\right)$: lámina infiltrada promedio en el cuarto más perjudicado.

\bar{d} : lámina infiltrada promedio

3.4.4.3 Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación se calculó según la ecuación 42.

$$EAP = \frac{\text{lámina consumida}}{\text{Lámina bruta aplicada}} = \frac{d_2 - d_1 + n \times ET_c}{db} \times 100 \quad (42)$$

Dónde:

EAP: Eficiencia de aplicación (%)

db : lámina bruta aplicada (mm)

d_1 : lámina de agua en el suelo antes del riego (mm)

d_2 : lámina de agua en el suelo después del riego (mm)

ET_c : evapotranspiración del cultivo (mm.d⁻¹)

n : días que media entre los muestreos de humedad para el cálculo de d_1 y d_2

Para el cálculo de EAP, d_2 se evaluó a campo entre las 24 y 48 horas después del riego dependiendo del tipo textural.

3.4.4.3.1 Eficiencia de aplicación actual (EAP)

La EAP calculó considerando la profundidad del sistema radicular del cultivo de cebolla en cada etapa de cultivo como la profundidad objetivo a humedecer mediante el riego. De esta forma se calcularon las láminas de reposición o consumidas correspondientes y la EAP en relación a la lámina bruta aplicada, según la ecuación 43.

$$EAP = \frac{dc}{db} \times 100$$

Dónde:

EAP: eficiencia de aplicación actual (%)

dc : lámina consumida en la profundidad radicular (mm)

db : lámina bruta aplicada (mm)

3.4.4.3.2 Eficiencia de aplicación razonable para el método de riego (EAP_r)

La EAP_r se calculó considerando los primeros 50 cm (profundidad máxima que alcanza el sistema radicular del cultivo de cebolla) como profundidad objetivo razonable a humedecer mediante el riego por superficie. De esta forma se calcularon las láminas de reposición o consumidas correspondientes y la eficiencia de aplicación en relación a la lámina bruta aplicada, según la ecuación 44.

$$EAP_r = \frac{dc_{0-50}}{db} \times 100$$

Dónde:

EAP_r: eficiencia de aplicación razonable para el método de riego (%)

dc_{0-50} : lámina consumida 0 – 50 cm (mm)

db : lámina bruta aplicada (mm)

3.4.5 Escenarios de optimización del riego.

Para el estudio de los escenarios de optimización se utilizó el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3 (Bautista *et al.*, 2012), en su módulo “*Operations Analysis*”, permitiendo identificar las combinaciones de caudales y tiempos de riego que mejor ajustaran a los objetivos del riego. Se trabajó con el modelo bajo dos condiciones: a) no subirrigar y b) que la uniformidad de distribución sea superior o igual a 80%.

4.4.5.1 Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego

La Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego, se obtuvo optimizando las variables de manejo a campo *caudal unitario* y *tiempo de aplicación*, en un rango tal que

durante el día de la visita los cambios en estas variables hubiesen sido factibles de implementar. Por ejemplo, en los casos en que el aumento del caudal unitario significara un aumento de la eficiencia, esta variable se modificó sujeta al caudal de manejo registrado en acequia, variando sólo el frente de riego, es decir, el número de surcos o melgas regadas de manera simultánea. No se modificó para este indicador el momento del riego, utilizándose para el cálculo los registros de lámina consumida (dc) a campo.

Según la profundidad objetivo considerada a reponer en humedad mediante el método de riego, se calculó la Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m) según la ecuación 45 y la Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP_{mr}) según la ecuación 46.

$$EAP_m = \frac{dc}{dboptm} \times 100 \quad (45)$$

Dónde:

EAP_m : eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (%)

dc : lámina consumida en la profundidad radicular (mm)

$dbopt$: lámina bruta óptima para el día del riego (mm)

$$EAP_{mr} = \frac{dc_{0-50}}{dboptmr} \times 100 \quad (46)$$

Dónde:

EAP_{mr} : eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego razonable al método de riego (%)

dc_{0-50} : lámina consumida 0 – 50 cm (mm)

$dboptmr$: lámina bruta óptima para el día del riego razonable al método (mm)

3.4.5.2 Eficiencia de aplicación potencial según el manejo del método de riego

La eficiencia potencial según el manejo del método de riego (Morábito, 2003), se obtuvo optimizando las variables de manejo *caudal unitario* y *tiempo de aplicación*, así como las variables *oportunidad del riego* (lámina de reposición óptima) y *caudal de manejo*. Los escenarios de optimización planteados fueron elaborados sin restricciones con respecto a lo observado el día de la evaluación y fue ajustada la lámina de reposición a su valor óptimo. Así, en los casos en que el aumento del caudal unitario significara un aumento de la eficiencia, esta variable se modificó sin estar sujeta al caudal de manejo registrado en acequia durante el día de la evaluación. Por otro lado, la lámina de reposición óptima fue calculada a través de las muestras de humedad de suelo y la estimación de las constantes hídricas, con un factor de agotamiento “p” calculado según la ecuación propuesta por Noreno (1976) citado por Grassi (1998).

Según la profundidad objetivo considerada a reponer en humedad mediante el método de riego, se calculó la Eficiencia de aplicación potencial según el manejo del riego (EAP_M) según la ecuación 47 y la Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable ($EAPMr$) según la ecuación 48.

$$EAPM = \frac{dropt}{dbopt} \times 100 \quad (47)$$

Dónde:

EAP_M : eficiencia de aplicación potencial de manejo (%)

$dropt$: lámina de reposición óptima en la profundidad radicular (mm)

$dbopt$: lámina bruta optimizada de manejo potencial (mm)

$$EAPMr = \frac{dropt_{0-50}}{dbopt_r} \times 100 \quad (48)$$

EAP_{Mr} : eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (%)

$dropt_{0-50}$: lámina de reposición óptima para la profundidad 0 - 50 (mm)

$dbopt_r$: lámina bruta optimizada razonable al método de riego (mm)

3.4.5.3 Caudales unitarios y láminas brutas optimizadas

Los caudales unitarios obtenidos en los escenarios de optimización, fueron comparados con el caudal unitario registrado a campo (qu) y el caudal unitario máximo no erosivo ($qumáx$), tanto para surco como para melga.

El caudal máximo no erosivo en los surcos bajo estudio, se calculó según la ecuación 49 (FAO, 2001):

$$qmáx: \frac{C}{S_0} \quad (49)$$

Dónde:

$qmáx$: caudal máximo no erosivo (L/s)

S_0 : pendiente del surco (%)

C: 0,57 para suelos arenosos

C: 0,63 para suelos francos

C: 0,96 para suelos arcillosos

El caudal máximo no erosivo en las melgas bajo estudio, se calculó según la ecuación 50 (FAO, 2001, Pascual España, 2008):

$$qumáx = 0,1765 \times S_0^{-0,75} \quad (50)$$

Dónde:

S_0 : pendiente de la melga (m/m)

$qumáx$: caudal unitario máximo (L. s⁻¹. m⁻¹).

Por su parte, se obtuvo para cada caso bajo estudio una lámina bruta optimizada ($dbopt$) y la lámina bruta optimizada para un manejo razonable al método de riego ($dbopt_r$), a través del caudal unitario (qu) y el tiempo de aplicación (tap) optimizados bajo un manejo potencial del método, obtenidos a partir del módulo "Operations Analysis" del modelo de simulación WinSRFR 4.1.3 (Bautista *et al.*, 2012).

3.4.5.4 Análisis de la concesión de agua necesaria por hectárea de cebolla bajo distintos escenarios de manejo del agua.

En función de los resultados obtenidos, se elaboraron tres escenarios de manejo del agua de riego y hectáreas de concesión o dotación necesarias por hectárea de cebolla:

Escenario 1 Manejo promedio. EAP: 46% (EAP_r promedio) y ECI: 79 % (cuartil 1 de ECI)

Escenario 2 Mejoras en el manejo del riego. EAP: 62% (EAP_{mr} promedio) y ECI: 85 % (cuartil 2 de ECI).

Escenario 3 Manejo optimizado del agua. EAP: 72% (EAP_{Mr} promedio) y ECI: 92 % (cuartil 3 de ECI)

Para la discusión de los distintos escenarios se utilizó una ET_c de 7 mm/día y una dotación de 0,28 L.s⁻¹. ha⁻¹ en compuerta del establecimiento, según la dotación promedio de 0,35 L.s⁻¹. ha⁻¹ que se entregará en compuerta de canal secundario para la campaña 2019 – 2020 y una eficiencia de conducción en canal secundario del 80% (CORFO).

3.4.6 Oportunidad de riego.

Mediante la información obtenida a campo sobre las características físicas de suelo y su contenido hídrico previo y posterior al riego, más los datos de la Estación Meteorológica que posee la EEA Hilario Ascasubi del INTA, se calculó para cada caso bajo estudio la fracción de agua consumida (*fc*) según la ecuación 50.

$$fc = \frac{dc}{AU} = \frac{d2 - d1 + n \times ETc}{AU} \quad (51)$$

Dónde:

fc: factor de agotamiento de la humedad del suelo (0 a 1)

d_c: lámina consumida (mm)

AU: Agua útil (mm)

d₁: lámina de agua en el suelo antes del riego (mm)

d₂: lámina de agua en el suelo después del riego (mm)

ET_c: evapotranspiración del cultivo (mm.d⁻¹)

n: días que media entre los muestreos de humedad para el cálculo de *d₁* y *d₂*

Teniendo en cuenta que la condición de Capacidad de Campo (CC) es más un rango que un punto, que su definición exacta es un tanto subjetiva (Grassi,1998), que se debe considerar con precaución el empleo de las ecuaciones ajustadas para su estimación (Erik Zimmermann y Basile,2001; Mastromauro, 2014) y que el cultivo de cebolla en el valle rara vez se riega en déficit, el AU en este estudio se estimó para cada caso como la diferencia entre la humedad registrada luego del riego y la humedad en Punto de Marchitez Permanente, más la evapotranspiración ocurrida durante el período de *n* días que media entre ambos muestreo (ecuación 52).

$$AU = d2 - dpmp + n \times ETc \quad (52)$$

Dónde,

AU: agua útil (mm)

d_2 : lámina de agua en el suelo después del riego (mm)

d_{pmp} : lámina de agua en el suelo en Punto de Marchitez Permanente (mm)

ETc : evapotranspiración del cultivo ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

n : días que media entre los muestreos de humedad para el cálculo de d_1 y d_2

El Punto de Marchitez Permanente (pmp) se estimó mediante la ecuación propuesta por Rawls *et al.*, (1982), citada como una de las más precisas en distintos suelos del país (ecuación 53).

$$\theta - 1500 (pmp) = 0,026 + 0,005 \times Carc + 0,0158 \times MO \quad (53)$$

Dónde:

$\theta_{-1500} (pmp)$: Punto de Marchitez Permanente ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)

$Carc$: contenido de arcilla (%)

MO : contenido de materia orgánica (%)

De igual manera que con los anteriores indicadores, la fracción de agua consumida (fc) registrada a campo, fue agrupada según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación del año.

Para el análisis de la oportunidad del riego se calculó el factor de agotamiento (p) según Noreno (1976) mencionado por Grassi (1998) según la ecuación 54.

$$p = [ra \times s \times (1 - ETc)]^{\frac{1}{3}} \quad (54)$$

Dónde:

p : umbral óptimo del riego, expresado como fracción de agotamiento de humedad (0 a 1)

r_a : coeficiente de densidad de enrizamiento

s : coeficiente hidrodinámico del suelo

ETc : evapotranspiración del cultivo ($\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$)

Se utilizó un coeficiente de enraizamiento de 0,3 indicado para el desarrollo radicular de hortalizas y para cada evaluación se calculó el coeficiente hidrodinámico del suelo según la textura del suelo correspondiente (Figura 10).

También se calculó el factor de agotamiento (p) propuesto por FAO (Allen, 2000), según la ecuación 55.

$$p = p_{\text{cuadro 22}} + 0,04 \times (5 - ETc) \quad (55)$$

Dónde:

p : umbral óptimo del riego, expresado como fracción de agotamiento de humedad (0 a 1)

p_{cuadro22} : facto de agotamiento de referencia del cultivo para $ETc = 5 \text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$ (cuadro 22, manual FAO 56)

ETc : evapotranspiración del cultivo ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$)

Los valores de ET_c , fueron calculado a partir de la Evapotranspiración de referencias (E_{to}) de Penman Monteith, solicitados al área de agrometeorología de la EEA Hilario Ascasubi del INTA, elaborados a partir de la Estación Meteorológica que posee dicha Estación Experimental y al K_c del cultivo de cebolla calculado por Sánchez (2013) según la metodología de FAO (Allen, 2000).

3.4.6.1 Lámina de reposición óptima y frecuencia de riego.

Considerando el momento óptimo de riego y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, se calculó la lámina de reposición óptima. Para esto se utilizó el factor de agotamiento (p) según FAO (Allen, 2000) y según Noreno (1976) mencionado por Grassi (1998). Una vez obtenida las láminas de reposición óptimas y con los valores de ET_c calculados para cada fecha de evaluación, se estimaron las frecuencias de riego óptimas para cada etapa de cultivo, según la ecuación 56.

$$Fr = \frac{dropt}{ET_c} \quad (56)$$

Dónde:

Fr : frecuencia de riego (días)

$dropt$: lámina de reposición óptima (mm)

ET_c : evapotranspiración del cultivo ($mm \cdot d^{-1}$)

3.4.7 Requerimientos de lixiviación de las sales en el suelo.

La fracción de lavado (RL) para cada evento de riego se calculó según la ecuación 57 propuesta por Rohades *et al.* (1992) para riego por superficie ajustada por la *eficiencia de lavado* (f) propuesta por Van der Molen según la clase textural. Luego, para realizar un análisis del ciclo y estimar la lámina para lixiviar sales, dicha fracción de lavado (RL) se aplicó a la diferencia entre la ET_c del cultivo y PP (precipitaciones).

$$RL = \frac{CE_i}{(5 \times CE_{em} - CE_i) \times f} \quad (57)$$

Dónde:

RL : fracción de lavado

CE_i : conductividad eléctrica del agua de riego

CE_{em} : conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo máximo permisible si se pretende obtener el rendimiento potencial del cultivo.

f : eficiencia de lavado

Por otro lado, para cada caso bajo estudio se calculó la lámina necesaria para lixiviar las sales del suelo para el ciclo completo mediante la ecuación 58 sugerida por Van der Molen (1973). Para el análisis del ciclo se consideró una profundidad del suelo explorado por las raíces de 500 mm y la ET_c del cultivo y PP (precipitaciones) total durante el ciclo del cultivo.

$$dper = \frac{(ETc - PP) \times CEagua - 2 \times (Wcc \times D) / 100 \times (CEesf - CEesi)}{f \times (CEesf + CEesi - CEagua)} \quad (58)$$

Dónde:

dper: altura de agua necesaria para lixiviar las sales disueltas en el agua de riego y/o el perfil de suelo explorado por las raíces de los cultivos, para garantizar un adecuado nivel productivo (mm)

ETc: evapotranspiración de cultivo (mm año⁻¹)

PP: precipitaciones (mm año⁻¹)

CEi: conductividad eléctrica del agua de riego (dS m⁻¹)

Wcc: capacidad de campo del suelo (g%g)

D: profundidad de suelo explorado por las raíces del cultivo (mm)

CEesf: conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo final, luego del ciclo de riego (dS m⁻¹)

CEesi: conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo inicial del ciclo de riego (dS m⁻¹)

f: eficiencia de lavado.

Por otro lado, se estimó mediante la ecuación de Van der Molen y en cada caso bajo estudio, el requerimiento de lavado para la etapa de cultivo, trabajando con la profundidad del suelo explorado por las raíces correspondiente a cada etapa (150 mm; 300 mm; 500 mm), la *ETc* del cultivo y *PP* (precipitaciones) también correspondiente para cada etapa y los valores de *Wcc*, *CEesi*, *CEi* y *f* correspondiente a cada caso bajo estudio. De esta manera para cada caso bajo estudio se obtuvo un requerimiento de lavado por etapa de cultivo.

Los datos de evapotranspiración potencial y precipitación se obtuvieron de la estación meteorológica de Hilario Ascasubi, en un intervalo mensual y para un período de 10 años. Posteriormente se procedió a obtener la evapotranspiración del cultivo (*ETc*) mediante los valores de *Kc* de la cebolla (Sánchez, 2013). Se trabajó con una probabilidad de ocurrencia del 50% para la *ETc* y la precipitación durante el ciclo del cultivo. Como valor de *CEesf* se utilizó el valor de referencia de FAO que garantice una productividad del 90% (Ayers y Wescot, 1987).

3.4.8 Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs)

La EAPs (Morábito, 2003) se calculó según la ecuación 59.

$$EAPs = \frac{ETc - PP}{dbs} \quad (59)$$

Dónde:

EAPs: eficiencia de aplicación potencial según balance salino (%).

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm)

PP: precipitación (mm)

dbs: altura de agua aplicada al suelo mediante el riego necesaria para satisfacer las necesidades netas de los cultivos y la percolación en profundidad de las sales presentes en el agua y en el suelo (mm) (ecuación 60)

$$dbs = ETc - PP + dper \quad (60)$$

Dónde:

ETc: evapotranspiración del cultivo (mm)

PP: precipitación (mm)

dper: altura de agua necesaria para la percolación en profundidad de sales presentes en el agua y en el suelo (mm).

La EAPs se calculó en relación a la altura de agua necesaria para lixiviar las sales del suelo estimada para el análisis general del ciclo de cultivo según la ecuación propuesta por Van Der Molen (1983) y por Rohades *et al.*, (1992). Luego se calculó el valor de EAPs para cada etapa de cultivo según el caso bajo estudio. De esta manera se obtuvo un valor medio de EAPs para E₁, E₂ y E₃.

2.4.9 Análisis del desempeño considerando usos benéficos y racionales.

Para un análisis del desempeño del riego que considere otros usos benéficos o racionales del agua, se usaron los siguientes indicadores propuestos por (Burt *et al.*, 1997):

- Eficiencia de riego parcelaria (IE): cociente entre el agua de riego usada beneficiosamente y el volumen de agua aplicada, considerando que la variación de agua de riego almacenada en la rizósfera entre el inicio de un ciclo agrícola y el comienzo del próximo se aproxima a “0” (ecuación 61).

$$IE (\%) = \frac{\text{Vol. de agua de riego beneficiosamente usado}}{\text{Vol. de agua de reigo aplicada} - \Delta \text{ almacenada}} \times 100 \quad (61)$$

Se contabilizó como agua beneficiosamente usada: (a) la gastada en el proceso de evapotranspiración, medida como lámina consumida (*d_c*) (b) la usada para cumplimentar el requerimiento de lixiviación hasta alcanzar una productividad del 90%, medida como *dper* según Van der Molen y Rhoades (se consideró un valor promedio de ambas ecuaciones y (c) la contenida en los tejidos vegetales, estimada en 0,2 % del volumen aplicado. Como volumen total aplicado, se consideró el valor medio de lámina bruta aplicada según registros a campo y 21 riegos totales durante el ciclo del cultivo.

- Índice de sagacidad del riego parcelario (IS): cociente entre el volumen de agua beneficiosamente usado más otros volúmenes utilizados racionalmente en la producción y el volumen de agua aplicada, considerando que la variación de agua de riego almacenada en la rizósfera entre el inicio de un ciclo agrícola y el comienzo del próximo se aproxima a “0” (ecuación 62).

$$IS (\%) = \frac{\text{Vol. de agua de riego beneficiosamente y racionalmente usado}}{\text{Vol. de agua de riego aplicada} - \Delta \text{ almacenada}} \times 100 \quad (62)$$

Para calcular IS, se consideró como agua racionalmente utilizada, la aplicada para mantener niveles de humedad de suelo durante el primer mes luego de la siembra que permitan una adecuada germinación, emergencia y establecimiento del cultivo. Se estimó como el 15 % del volumen total aplicado en el ciclo.

RESULTADOS

Y

DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Evaluaciones a campo

Se realizaron 30 evaluaciones de riego a campo sobre el cultivo de cebolla de días largos, de septiembre de 2015 a febrero de 2016. La Tabla 56 del anexo detalla el número identificación de cada caso bajo estudio, la fecha de realización (día/mes/año) y la ubicación geográfica (latitud y longitud). Las evaluaciones realizadas en el valle (Figura 29), abarcan homogéneamente la superficie del VBRC y representan el riego de un total de 478 hectáreas de cebolla de días largos y un 4% del total de la superficie sembrada para la campaña correspondiente (Barbero *et al.*, 2016). La muestra resulta satisfactoria en relación al número de regantes, a la superficie irrigada por intendencia de riego (CORFO, 2018) y a la sembrada de cebolla para la campaña.

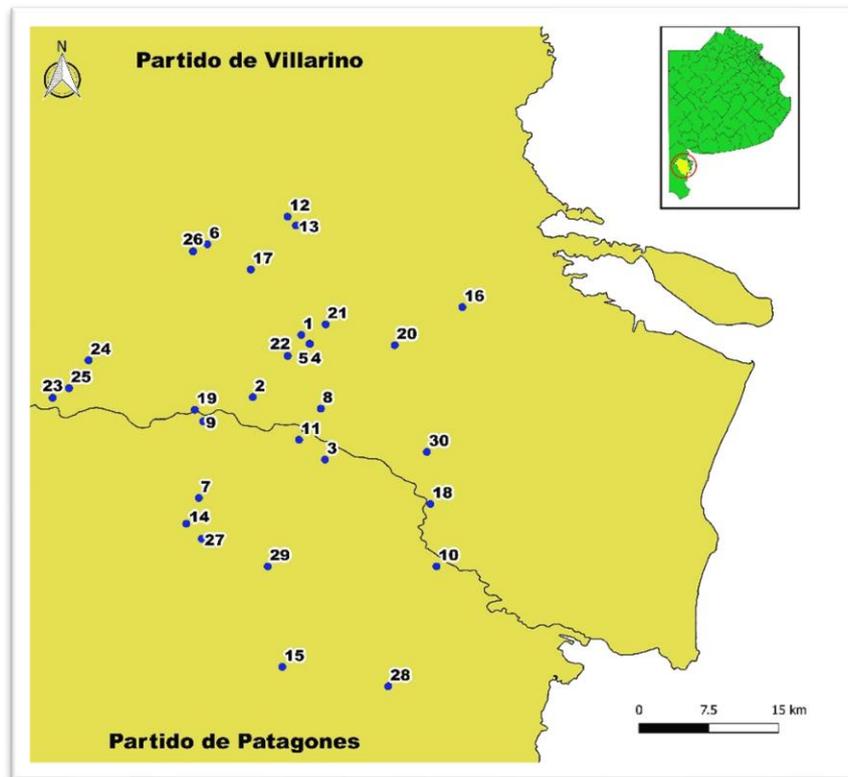


Figura 29. Localización de las evaluaciones de riego dentro del área de estudio.

La Tabla 8 detalla las evaluaciones de riego efectuadas en primavera y verano, desagregadas por intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo. La Tabla 57 del anexo brinda esta información para cada caso bajo estudio.

Tabla 8. Número de evaluaciones efectuadas en la estación primavera y verano, desagregadas por intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.

Variable	Estación			Total general
	Primavera	Verano	Total	

Intendencia de riego	Mayor Buratovich	9	6	15	30
	Pedro Luro	8	1	9	
	Villalonga	3	3	6	
Método de riego	Surco	3	2	5	30
	Melga	17	8	25	
Tenencia de la tierra	Propietario	8	5	13	30
	Arrendatario	12	5	17	
Entrega de agua	Con Turno	9	6	15	30
	Sin turno	11	4	15	
Derivación a parcela	Sifón	16	7	23	30
	Boquete	4	3	7	
Etapas de cultivo	E ₁	10	0	10	30
	E ₂	10	1	11	
	E ₃	0	9	9	
Total		20	10	30	

El total de casos bajo estudio corresponde al método de riego superficial sin desagüe al pie, ya que no se utiliza en el valle el riego con desagüe al pie. Un 83% corresponde a melgas y el 17% restante a surcos, coincidente con el aumento registrado en los últimos años de la superficie de cebolla sembrada en platabandas y regada por inundación en el valle.

Por otro lado, el 50% de las evaluaciones se realizaron en la intendencia de riego Mayor Buratovich, un 20% en Pedro Luro y el 30% restante en Villalonga. Estas diferencias guardan estrecha relación con el número de regantes que posee cada intendencia de riego, su superficie bajo riego y la estimación de la superficie sembrada de cebolla para la campaña evaluada (Barbero *et al.*, 2016) como se observa en la Tabla 58 del anexo.

En cuanto al tipo de derivación de agua a la parcela, predomina el uso de sifón de riego (77%) con respecto a boquete (23%). Esto deja en evidencia el alto grado de adopción del sifón para el riego del cultivo en la zona, lo que significa una ventaja para la implementación de mejoras en el riego, ya que permite manejar los caudales de riego con mayor precisión. Los boquetes se suelen emplear únicamente en melgas y en general en aquellos casos en los que no se logra buena carga hidráulica (h) en las acequias.

A su vez, todos los arrendatarios sembraron en platabanda y regaron por melgas. Esto puede estar relacionado a que el sistema de platabanda suele rendir entre 20 y 30% más que el cultivo de cebolla sembrado en surcos, siendo muchas veces motivo de decisión a la hora de elegir el método de siembra y riego, en especial para el productor arrendatario, quien debe pagar con parte de la producción el uso de la tierra.

Con respecto al resto de las variables, el estudio incluye aproximadamente partes iguales de propietarios y arrendatarios, con turno y sin turno de riego y evaluaciones por etapa de cultivo.

4.2 Parámetros del cultivo

4.2.1 Perfil de suelo explorado por las raíces

La profundidad promedio alcanzada por las raíces de cebolla según etapa de cultivo, fue: E₁: 15 cm, E₂: 30 cm y E₃: 50 cm (Tabla 9. Número de evaluación, fase de desarrollo y profundidad de suelo explorado por las raíces (D) según etapa de cultivo. Tabla 9 y Figura 30).

Tabla 9. Número de evaluación, fase de desarrollo y profundidad de suelo explorado por las raíces (D) según etapa de cultivo.

Etapa de cultivo	Evaluación	Fase de desarrollo	D (cm)
E ₁	1 a 11	Siembra – 2 HV	15
E ₂	12 a 21	2 HV – Bulb.	30
E ₃	22 a 30	Bulb. – Madurez	50

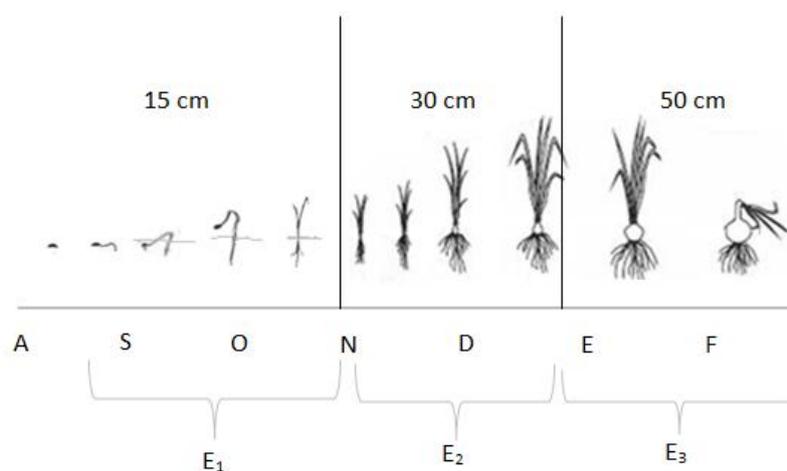


Figura 30. Fase de desarrollo (etapas de cultivo) y perfil de suelo explorado por las raíces (D) según etapa de cultivo.

4.3 Parámetros de suelo y agua.

4.3.1 Textura de suelo.

Con respecto a la clase textural de los suelos de las parcelas de riego evaluadas, en la Tabla 59 del anexo se detallan los resultados obtenidos de arena, limo y arcilla para cada caso y la clase textural correspondiente. En la Figura 31 se observa la clase textural cada caso bajo estudio discriminado por intendencia de riego.

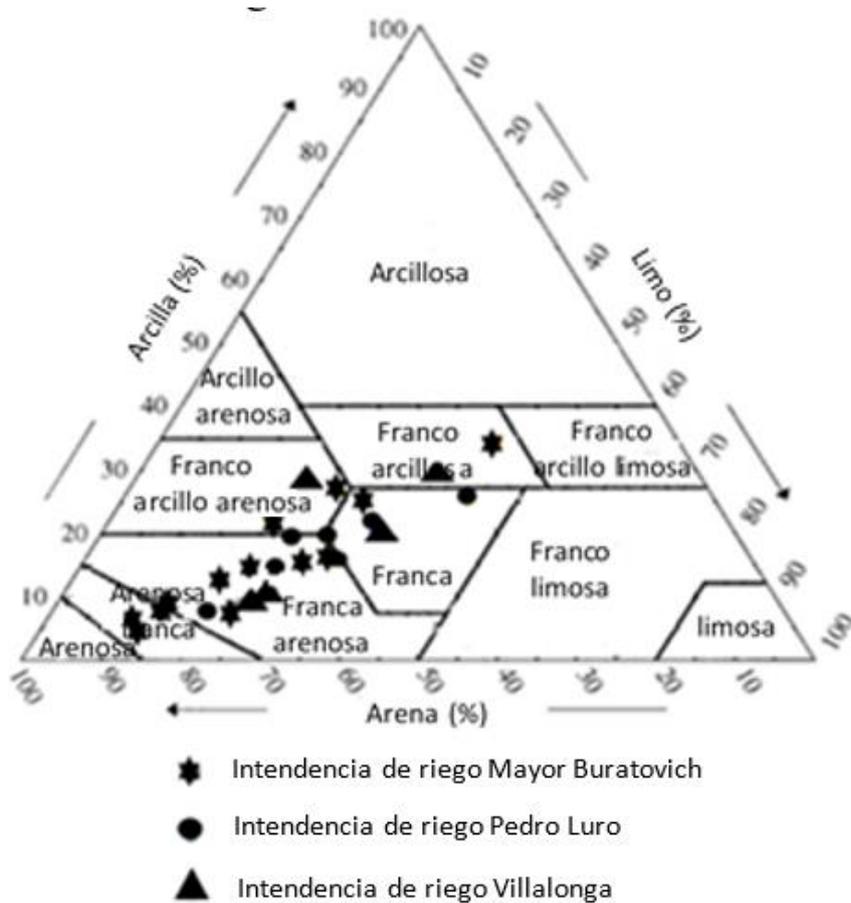


Figura 31. Clase textural de las parcelas evaluadas según intendencia de riego.

El 53 % de los suelos de las parcelas evaluadas corresponden a la clase textural Franco Arenosa, un 17% Franco arcillosa, 10% Franco, 10% Franco arcillo limosa y 10% Arenoso Franca. Esto demuestra que predominan las texturas franco arenosas en coincidencia con estudios anteriores (Sánchez, 1998). Por otro lado, aproximadamente la mitad de las parcelas bajo estudio tienen condiciones de textura similares en profundidad (en los primeros 50 cm) y a lo largo de la unidad de riego (en cabecera, medio y pie) y la otra mitad presentan horizontes de distinta clase textural. A su vez, se observa una tendencia general a aumentar el porcentaje de arcilla en profundidad para los suelos bajo estudio.

Las diferencias texturales dentro de una misma unidad de riego pueden deberse a las cortes de suelo efectuados en proyectos de nivelación y/o a la génesis de los suelos, ya que el río fue depositando distintos materiales durante sus crecidas en décadas pasadas.

4.3.2 Densidad aparente

El valor medio de densidad aparente (Dap) para el total de casos bajo estudio es $1,34 \text{ g/cm}^3$. El rango intercuartil es de $1,29$ a $1,43 \text{ g/cm}^3$ y los valores extremos son $1,13$ y $1,52 \text{ g/cm}^3$, con un valor atípico de $1,08 \text{ g/cm}^3$. En la Tabla 59 del anexo se detalla el valor de densidad aparente medio para cada evaluación de riego.

Las evaluaciones con suelos de textura Arenoso Franco, presentaron un valor medio de Dap significativamente superior con respecto a las restantes clases texturales encontradas en este estudio. En general, los valores de Dap resultan bajos para las clases texturales correspondientes según la bibliografía internacional. Esto puede estar relacionado a las labranzas que se realiza en los lotes previo a la siembra del cultivo, la cual aumenta el número de macroporos del suelo.

Este cambio en la porosidad afectará también la capacidad de almacenaje y aumentará especialmente la infiltración y el movimiento del agua en el suelo. La Tabla 10 detalla los valores medios de *Dap* agrupados por textura de suelo.

Tabla 10. Valores medios y error estándar (ES) para densidad aparente (*Dap*) según textura de los suelos.

VARIABLE	<i>Dap</i> (g/cm ³)		
	n	Media	ES
Franco (F)	3	1,26 a	0,05
Franco arcilloso (Fa)	5	1,27 a	0,04
Textura Franco arcillo arenoso (FaA)	3	1,34 a	0,05
Franco Arenoso (FA)	16	1,35 a	0,02
Arenoso Franco (AF)	3	1,5 b	0,05

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.3.3 Salinidad del suelo.

El valor de salinidad del extracto de saturación del suelo promedio para el total casos bajo estudio, es 1,79 dS/m. El rango intercuartil 1,03 a 2,08 dS/m. Los valores extremos 0,43 y 2,71 dS/m y se registraron valores atípicos de 4,05, 4,14 y 6,96 dS/m. En la Tabla 60 del anexo se detalla para cada evaluación de riego el valor de conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (*CEes*) a lo largo de la unidad de riego y para la profundidad 0 - 25 y 25 - 50 cm.

La Tabla 11 detalla los valores medios y el error estándar referidos a *CEes* en cabecera, medio y pie del lote evaluado, la Tabla 12 para las profundidades 0 - 25 y 25 - 50 y la Tabla 13 según intencionalidades de riego. No se encontraron diferencias significativas en los valores medios de *CEes* para estos criterios de clasificación.

Tabla 11. Valores medios y error estándar (ES) para la salinidad del extracto de saturación de suelo (*CEes*) en cabecera, medio y pie del total de lotes bajo estudio.

VARIABLE	<i>CEes</i> (dS/m)			
	n	Media	ES	
Posición	Cabecera	60	1,58 a	0,21
	Medio	60	1,94 a	0,21
	Pie	60	1,86 a	0,21

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 12. Valores medios y error estándar (ES) para la salinidad del extracto de saturación de suelo (*CEes*) en las profundidades 0 - 25 y 25 - 50 del total de lotes bajo estudio.

VARIABLE	<i>CEes</i> (dS/m)			
	n	Media	ES	
Profundidad	0-25	90	1,69 a	0,17
	25-50	90	1,89 a	0,17

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 13. Valores medios y error estándar para la salinidad del extracto de saturación del suelo (*CEes*) según intendencia de riego.

VARIABLE	<i>CEes</i> (dS/m)			
	n	Media	ES	
Intendencia	Mayor Buratovich	15	1,45 a	0,33
	Pedro Luro	9	2,04 a	0,43
	Villalonga	6	2,26 a	0,53

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.3.4 Salinidad del agua

El valor promedio de salinidad del agua de riego (CEi) para el total de las evaluaciones es 1,23 dS/m. El rango intercuartil 1,14 a 1,31 dS/m. Los valores extremos 0,97 y 1,47 dS/m y se registraron valores atípicos del orden de 0,79, 0,87, 1,59 y 1,68 dS/m. En la Tabla 60 del anexo detalla el valor de CEi para cada caso bajo estudio. Con respecto al RAS (relación de adsorción de sodio) el valor medio para el total de los registros a campo fue 3,39 meq/L, con un error estándar de 0,04.

La Tabla 14 detalla el valor de CEi promedio según intendencias de riego. No se encontraron diferencias significativas para este criterio de clasificación.

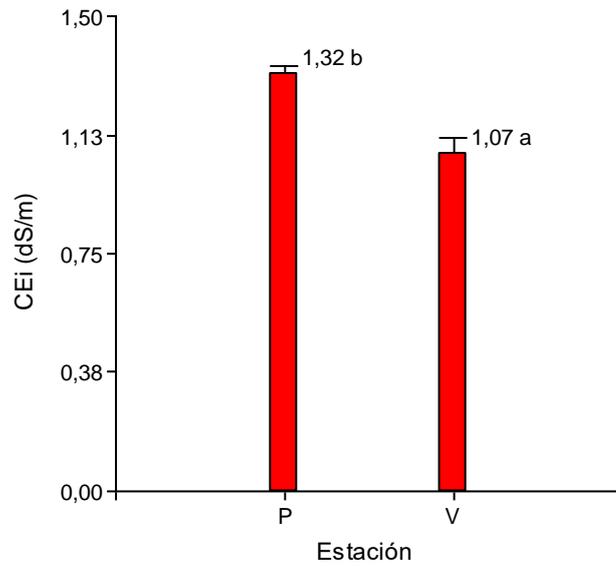
Tabla 14. Valores medios y error estándar (ES) para la salinidad del agua (CEi) según intendencias de riego.

VARIABLE	CEi (dS/m)		
	n	Media	ES
Mayor Buratovich	6	1,14 a	0,07
Intendencia Pedro Luro	15	1,25 a	0,07
Villalonga	9	1,27 a	0,06

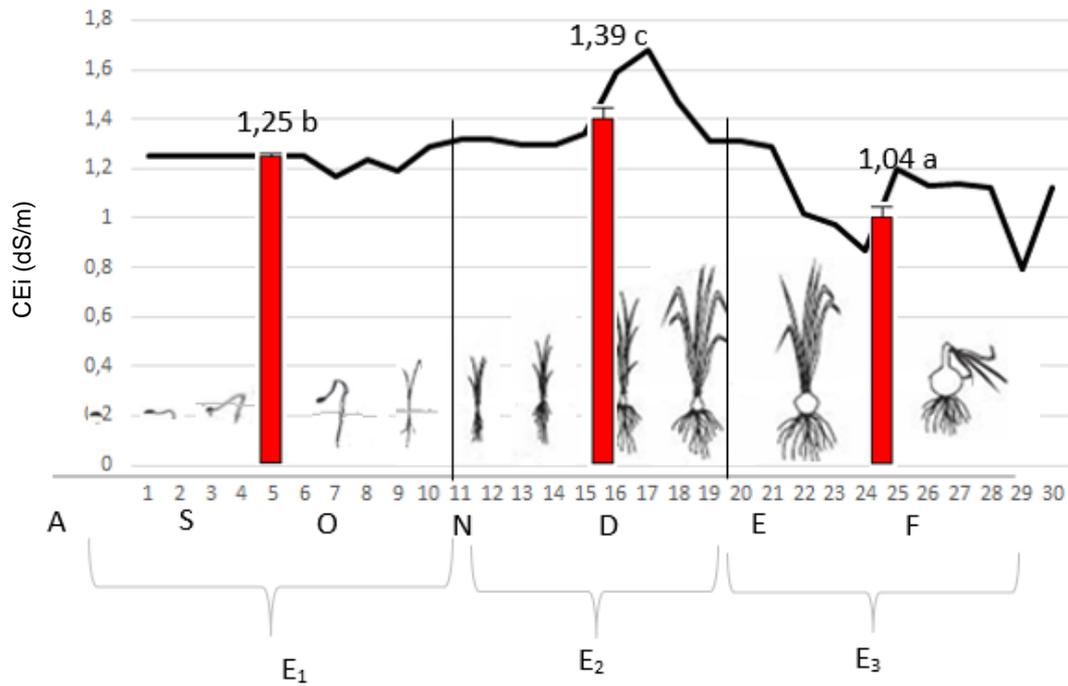
Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Por otro lado, el valor de CEi para la estación primavera es superior a la registrada en verano, con valores medios de 1,32 y 1,07 dS/m respectivamente y diferencias significativas (Figura 32). A su vez, si analizamos el valor de CEi en la primera etapa de cultivo (E₁) en la segunda etapa (E₂) y en la tercera (E₃), encontramos diferencias significativas para esta variable entre las etapas, con valores de 1,25 dS/m, 1,39 dS/m y 1,04 dS/m respectivamente. Esta tendencia coincide con los registros que lleva a cabo el INTA Hilario Ascasubi en convenio con Corfo Río Colorado durante cada campaña de riego (Figura 33), con los cuales se conforma la “Serie Histórica de Conductividad Media Mensual del Río Colorado” (CORFO, 2018).

La salinidad del río Colorado, aumenta durante el receso invernal debido a que, durante los meses, el río actúa como colector recibiendo los lixiviados de sales en su recorrido. Por tal motivo, es común que, las campañas de riego inicien con valores altos de CEi. A medida que aumenta el caudal del río, las sales se diluyen y baja su concentración salina (Figura 34). Esto explica el valor superior de salinidad registrado en la estación primavera con respecto a la estación verano. Por otro lado, el pico de salinidad del agua de riego registrado en E₂, guarda relación temporal con precipitaciones por encima de la media histórica para esa campaña durante los meses de diciembre y enero (Figura 35). La abundante lluvia para esos meses puede haber lavado los suelos y parte de esas sales haber terminado en las aguas del río o canales de riego. Se destaca que el valor medio de CEi para la campaña bajo estudio particularmente estuvo por debajo del valor medio registrado durante los 6 años, de 1,43 dS/m.



Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)
 Figura 32. Salinidad media del agua de riego (CEi) y error estándar para la estación primavera (P) y verano (V).



Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)
 Figura 33. Salinidad media del agua de riego y error estándar para cada caso bajo estudio y etapa de cultivo.

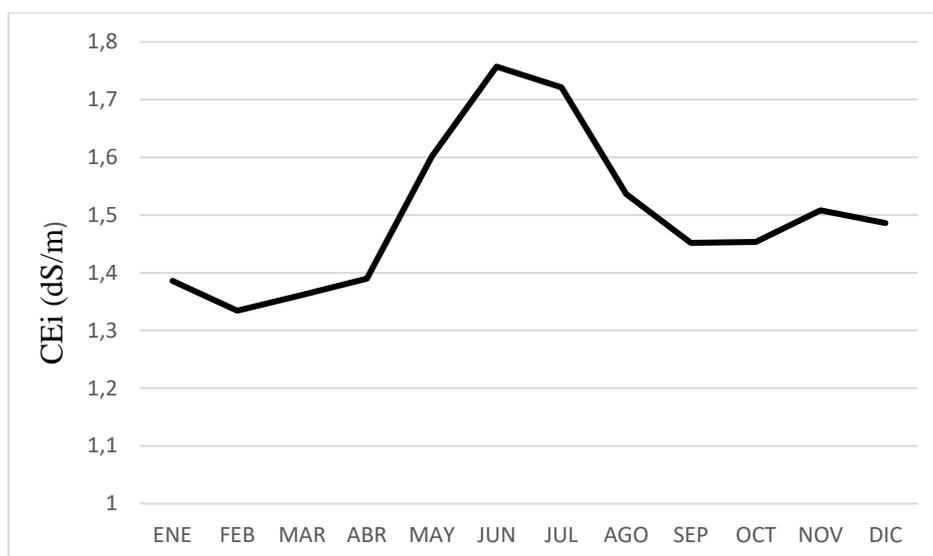


Figura 34. Salinidad media mensual del agua de riego del VBRC para el periodo 2013 – 2019.
Fuente: CORFO.

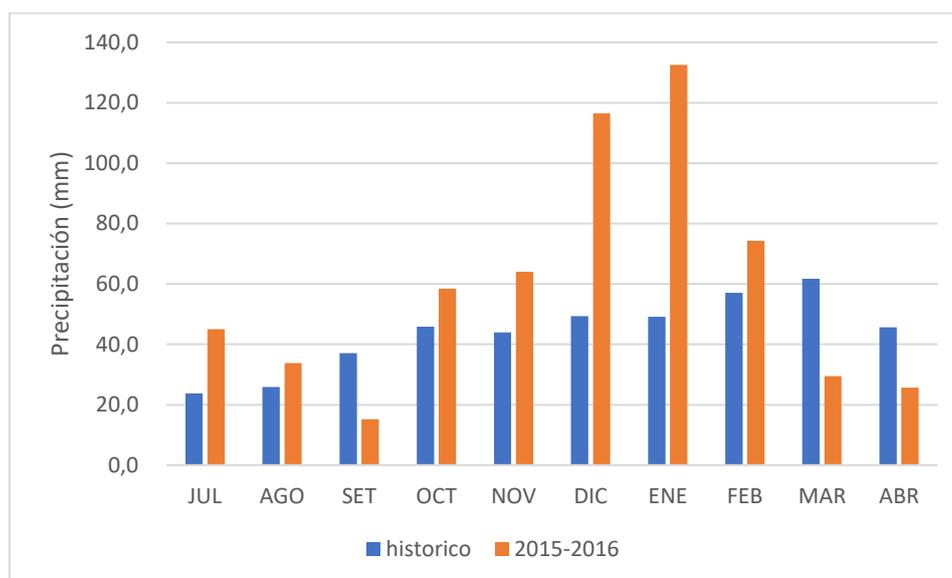


Figura 35. Precipitaciones mensuales históricas y para la campaña 2015 – 2016. Fuente: Estación meteorológica Hilario Ascasubi.

Según las normas de Riverside (1973) para evaluar la calidad de las aguas de riego, tanto el valor de CEi registrado en compuerta para cada caso bajo estudio, como el valor medio para el total de casos bajo estudio, califican en C3 S1: agua utilizable para riego, pero con precauciones. Se trata de aguas que pueden utilizarse para el riego de suelos con buen drenaje, empleando volúmenes de agua en exceso para lavar el suelo y/o cultivos muy tolerantes a la salinidad. Por otro lado, se trata de aguas con bajo contenido en sodio, en general apta para riego, aunque pueden presentarse problemas con cultivos muy sensibles al sodio.

4.3.5 Infiltración

Con un total de 56 curvas de infiltración, se obtuvo la ecuación que representa la curva de infiltración promedio para el total de casos bajo estudio (Figura 36) y la ecuación correspondiente (63). La curva obtenida del promedio de los parámetros de Kostiakov A y B de todas las ecuaciones fue muy similar a la curva obtenida analizando los datos según mínimos cuadrados ponderados y pendientes aleatorias (modelos mixtos). Por tal motivo se consideró esta ecuación como referencia, en vez ajustar una curva al total de pares de datos.

$$I_{cum} = A \times t^B = 9,7855 \times t^{0,5092} \quad (63)$$

La infiltración básica promedio obtenida a partir de esta ecuación es 18,36 mm/h.

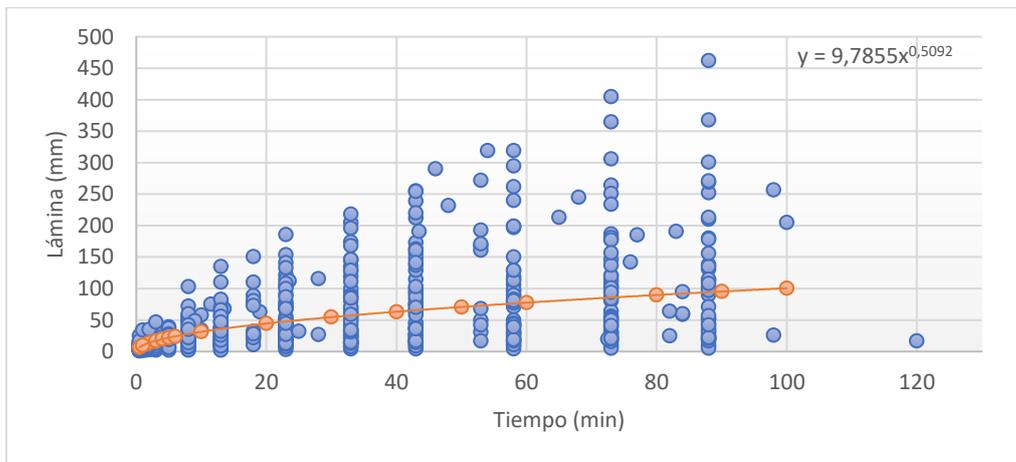


Figura 36. Ecuación de infiltración promedio para el total de ensayos con el Doble Anillo de Munz.

Por su parte, la ecuación 64 es la resultante del ensayo a campo con el doble anillo de Munz (DAM) ajustada según el perímetro mojado, ancho del surco o melga, y la lámina bruta aplicada e infiltrada, siendo:

$$I_{cumaj} = A \times t^B = 19,0374 \times t^{0,5092} \quad (64)$$

A partir del ajuste mencionado, la infiltración básica promedio es de 35,73 mm/h.

Por último, la ecuación 65 resulta de los parámetros y la infiltración básica que arroja el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3.

$$I_{cum} = A \times t^B = 8,2501 \times t^{0,5} \quad (65)$$

Según esta ecuación resultante, la infiltración básica promedio para el total de las evaluaciones es de 14,29 mm/h.

La Tabla 61 del anexo detalla para cada ensayo de infiltración, los parámetros de la ecuación de infiltración de Kostiakov (A y B), el valor de infiltración básica (I_b) y la familia de infiltración según: el Doble Anillo de Munz, el ajuste según la lámina bruta aplicada y el estimado por el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3. Como se observa en esta tabla, existen casos dentro del mismo lote con distinta familia de infiltración, por ejemplo, en cabecera

y pie de la unidad de riego. Esto se debe a diferencias en textura, compactación y/o cobertura del suelo.

Con respecto a la ecuación de infiltración promedio para los suelos, tanto la estimada con el método del Doble Anillo de Munz, como la ajustada según la lámina media aplicada a campo y la calculada por el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3, presentan valores normales para las texturas “franco arenosas” que predominan en el valle, y corresponden en la familia de infiltración Moderadamente lenta (Mod. L) a Moderada (Mod.). Los parámetros de infiltración que arroja el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3, son el promedio de lo que sucede en toda la parcela, por lo que puede considerarse el más adecuado. Sin embargo, se observa gran variabilidad en la tasa e infiltración de los suelos (incluso en un mismo lote) y baja correlación con la textura, lo que deja en evidencia la variabilidad que posee esta propiedad hidrofísica.

4.4 Parámetros físicos del riego

4.4.1 Avance y receso

Sobre los parámetros p y r de las 30 curvas de avance, se obtuvo la ecuación de avance del agua para el riego por superficie de cebolla en el valle (Figura 37). A su vez, se obtuvieron los parámetros medios de las ecuaciones de avance obtenidas para los casos de melgas y surcos, en forma discriminada (Figura 38 y Figura 39). Se obtuvieron ecuaciones similares al promediar los parámetros de avance, analizar los datos según mínimos cuadrados ponderados y pendientes aleatorias (modelos mixtos), por lo que se consideró esta ecuación como referencia en vez del ajuste de una curva al total de pares de datos.

La ecuación 66 representa la curva potencial de avance promedio del riego por superficie de cebolla en el valle bonaerense del río Colorado:

$$p \times t^r = 6,8174 \times t^{0,7681} \quad (66)$$

La ecuación 67 representa la curva potencial de avance promedio del riego por superficie de cebolla en melgas en el valle bonaerense del río Colorado:

$$p \times t^r = 6,9962 \times t^{0,7834} \quad (67)$$

La ecuación 68 representa la curva potencial de avance promedio del riego por superficie de cebolla en surcos en el valle bonaerense del río Colorado:

$$p \times t^r = 5,9234 \times t^{0,6916} \quad (68)$$

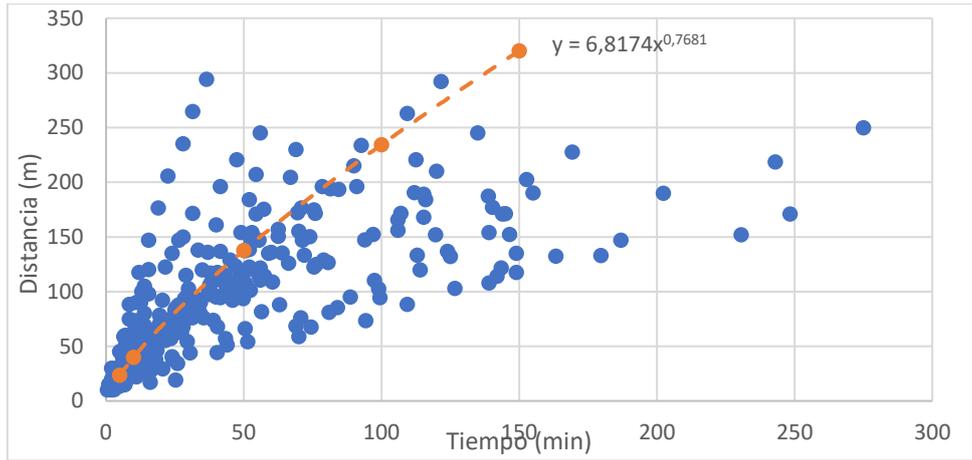


Figura 37. Distancia avanzada por el frente de agua en riego por superficie de cebolla para distintos tiempos en el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado.

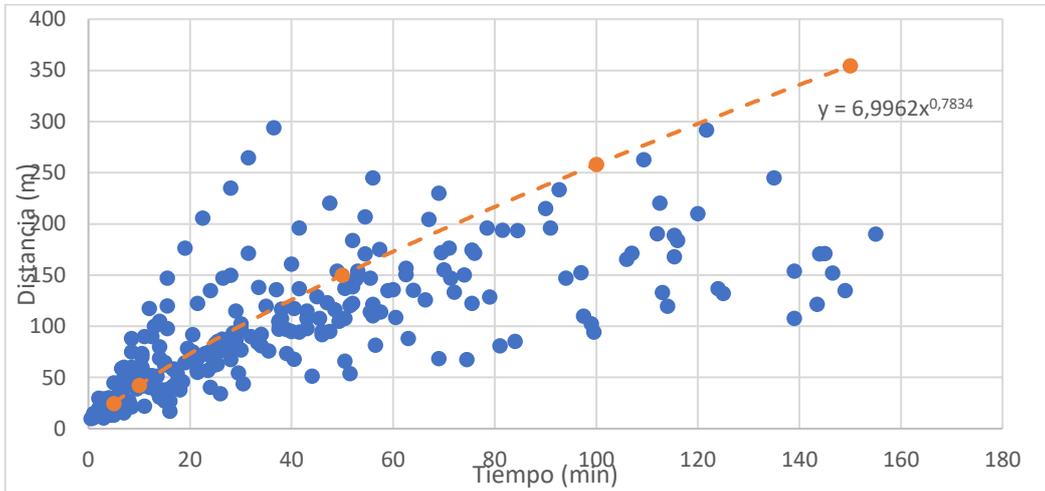


Figura 38. Distancia avanzada por el frente de agua en riego por superficie de melgas de cebolla para distintos tiempos en el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado.

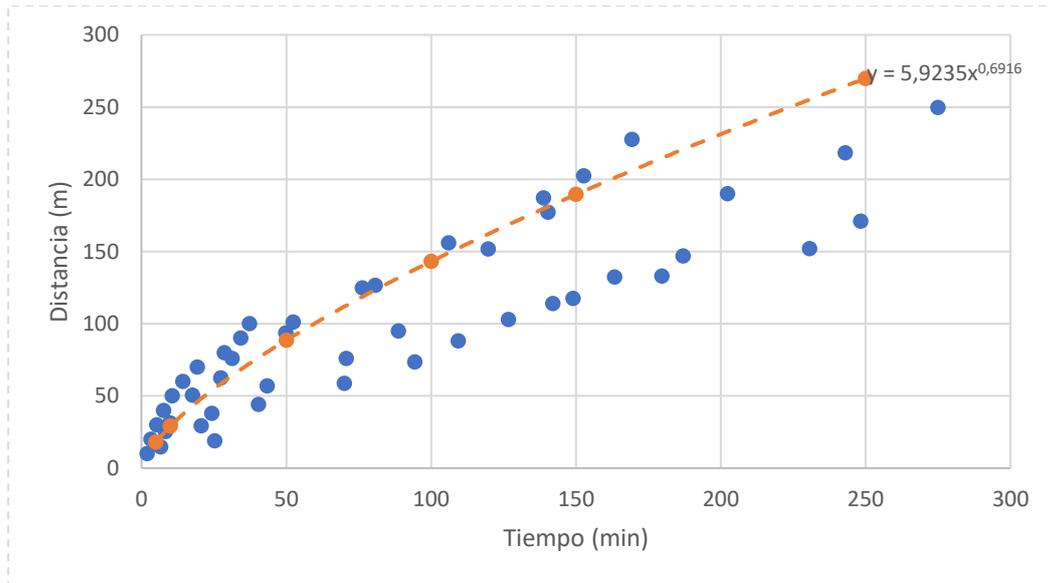


Figura 39. Distancia avanzada por el frente de agua en riego por superficie de surcos de cebolla para distintos tiempos en el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado.

De la misma manera en base a las 30 curvas de receso obtenidas en las evaluaciones de riego, se obtuvieron los parámetros a y s promedio para el total de las evaluaciones (Figura 40). Luego se realizó la misma operación con los casos evaluados de melgas y surcos de manera independiente (Figura 41 y Figura 42). Sin embargo, debido a la gran dispersión observada en los datos, no se sugiere el uso de estas ecuaciones de receso como representativas de esta fase del riego por gravedad del cultivo de cebolla en el valle.

La ecuación 69 representa el receso promedio para el total de evaluaciones de riego:

$$xr (m) = \dot{s} \times t (min) + \grave{a} = 0,631 \times t + 6,928 \quad (69)$$

La ecuación 70 representa el receso promedio de las evaluaciones de riego que regaron por melgas:

$$xr (m) = \dot{s} \times t (min) + \grave{a} = 0,6276 \times t + 2,0941 \quad (70)$$

La ecuación 71 representa el receso promedio de las evaluaciones de riego que regaron por surcos:

$$xr (m) = \dot{s} \times t (min) + \grave{a} = 0,5809 \times t + 28,827 \quad (71)$$

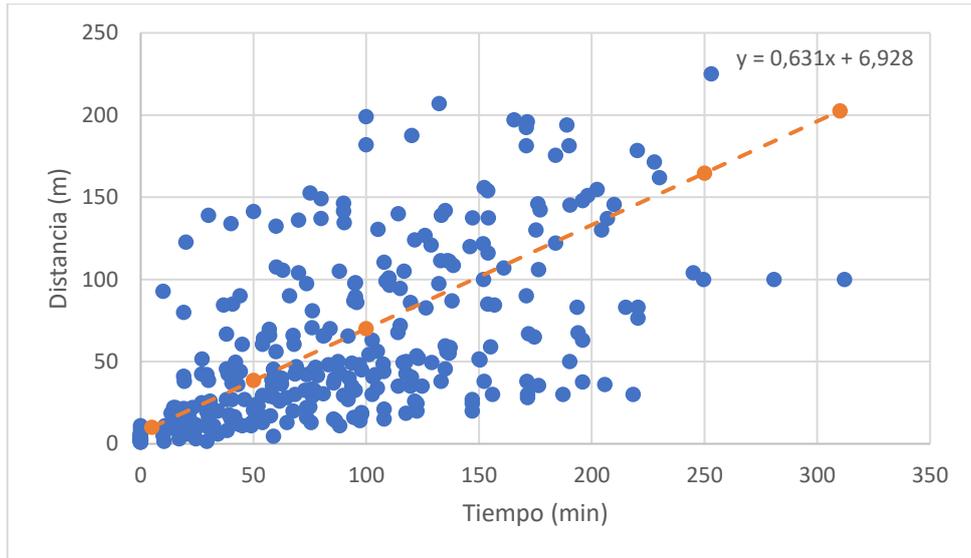


Figura 40. Distancia retrocedida por el frente de agua en riego por superficie de cebolla para distintos tiempos en el área irrigada del valle bonaerense del río Colorado.

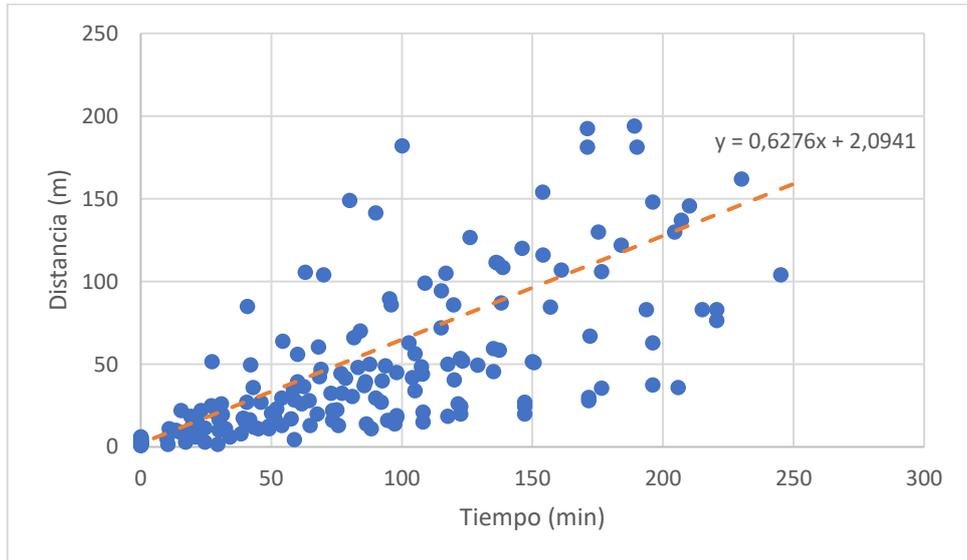


Figura 41. Distancia retrocedida por el frente de agua en riego por superficie de melgas de cebolla para distintos tiempos en el área irrigada del valle bonaerense del río Colorado.

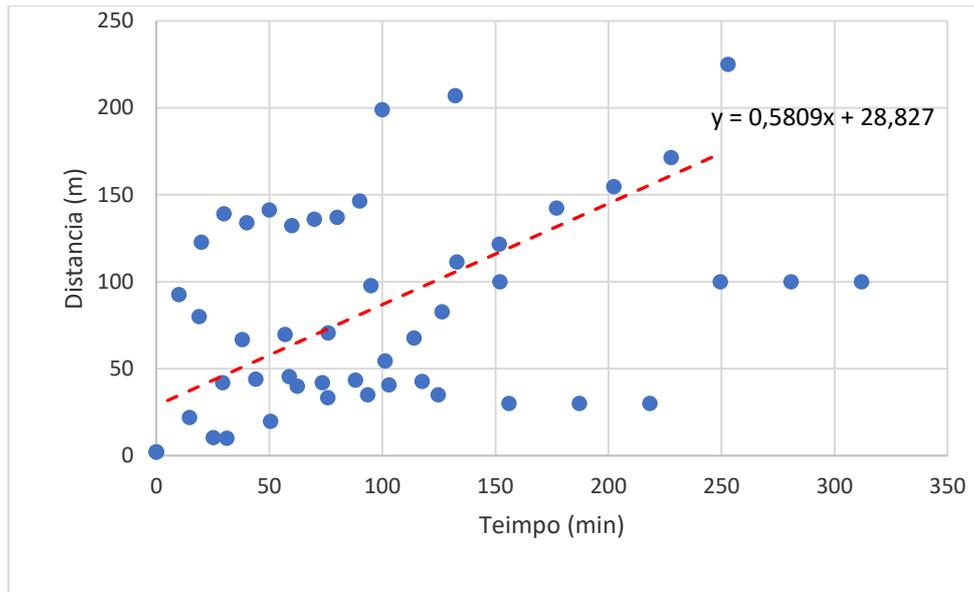


Figura 42. Distancia retrocedida por el frente de agua en riego por superficie de surcos de cebolla para distintos tiempos en el área irrigada del valle bonaerense del río Colorado.

En la Tabla 62 del anexo se detallan para cada evaluación de riego los parámetros p y r de la ecuación de avance y los parámetros a y s de la ecuación de receso.

Los valores obtenidos del coeficiente “ p ” y del exponente “ r ” de las ecuaciones de avance muestran valores normales con respecto a los mencionados en literatura nacional e internacional (Salatino *et al.*, 1992; Morábito 2003; Cuesta *et al.*, 2005; Walker et al, 2006). Con respecto al receso, las curvas medias obtenidas se consideran sólo una referencia de como retrocede el agua en un evento de riego, debido a la gran variabilidad de los datos.

4.4.2 Pendiente longitudinal

El valor medio de pendiente longitudinal para el total de las evaluaciones es $0,00114 \text{ m m}^{-1}$. El rango intercuartil es $0,00057$ a $0,00152 \text{ m m}^{-1}$ y los valores extremos son $0,00265$ y $0,00005 \text{ m m}^{-1}$. Se registraron dos valores atípicos de pendiente: $0,00374$ y $0,00322 \text{ m m}^{-1}$. La Tabla 63 del anexo detalla el valor de pendiente registrado en cada evaluación de riego.

La Tabla 15 detalla los valores medios y el error estándar referidos a la pendiente longitudinal (S_0) según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela. No se observan diferencias significativas de pendiente para ninguna de las variables de clasificación.

Tabla 15. Valores medios y error estándar (ES) referidos a la pendiente longitudinal (S_o) según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela.

VARIABLES		S_o (m m ⁻¹)	
		Media	ES
Intendencia	Mayor Buratovich	0,0010 a	0,0002
	Pedro Luro	0,0014 a	0,0003
	Villalonga	0,0009 a	0,0003
Método de riego	Surco	0,0018 a	0,0005
	Melga	0,0010 a	0,0002
Tenencia de la tierra	Propietario	0,0012 a	0,0003
	Arrendatario	0,0011 a	0,0002
Entrega de agua	Con Turno	0,0008 a	0,0002
	Sin turno	0,0014 a	0,0003
Derivación a parcela	Sifón	0,0011 a	0,0002
	Boquete	0,0012 a	0,0004
Media		0,00114	0,0002

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4.3 Longitud de la unidad de riego

El valor medio de Longitud de la unidad de riego (L) fue 185, similar a los valores medios registrados en otros valles irrigados y en cultivos hortícolas sin desagüe al pie (Schilardi, 2010). El rango intercuartil 136 a 223 m y los valores extremos 100 y 312 m. En la Tabla 63 del anexo se detalla el valor de Longitud de la unidad de riego registrado en cada caso bajo estudio.

La Tabla 16 detalla los valores medios y el error estándar referidos a longitud de la unidad de riego según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela. El valor medio de esta variable registrado en la intendencia de riego Mayor Buratovich fue menor al registrado en la intendencia de riego Villalonga, con diferencias estadísticamente significativas. Esto puede estar relacionado a que los suelos de la zona norte del valle suelen ser más arenosos, por lo cual resulta lógico que en el diseño de los lotes se busquen tiradas de riego más cortas. Por otro lado, los campos de la zona sur son en general de mayor tamaño, y también los lotes de uso agrícola ganadero, ya que históricamente han predominado allí los cultivos de girasol y las pasturas. No se observan diferencias significativas de L para el resto de las variables de clasificación.

Tabla 16. Valores medios y error estándar (ES) referidos a longitud de la unidad de riego (L), según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela.

VARIABLES		L (m)	
		Media	ES
Intendencia	Mayor	165 a	11
	Buratovich	191 ab	22
	Pedro Luro	224 b	28
	Villalonga		
Método de riego	Surco	200 a	38
	Melga	181 a	11
Tenencia de la tierra	Propietario	198 a	19
	Arrendatario	175 a	12
Entrega de agua	Con Turno	185 a	16
	Sin turno	184 a	16
Derivación a parcela	Sifón	181 a	13
	Boquete	195 a	22
Media		185	11

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4.4 Geometría y espaciamiento entre surcos, ancho de melgas y frente de riego.

Para el total de casos bajo estudio que regaron por surcos, el espaciamiento fue 0,80 m, el número promedio de surcos regados de manera simultánea fue 83 (con un valor mínimo de 17 y un máximo de 175) y el frente de riego (fr) promedio fue 62,9 m (

Tabla 17).

Tabla 17. Espaciamiento, número de surcos regados de manera simultánea y frente de riego (Fr) para el total de eventos de riego que regaron por surcos.

Método de riego	n	Espaciamiento (m)		surcos regados simultáneamente		Fr (m)	
		Media	ES	Media	ES	Media	ES
Surco	5	0,8	0	83	32,49	62,9	23,65

En término medio, la geometría de surcos bajo estudio fue: 0,40 m de ancho superior, 0,20 m de ancho medio, 0,10 m de ancho inferior y 0,10 m de tirante (Figura 43). Este tipo de surco, calificaría como “mediano”, según trabajos realizados en Mendoza (Schilardi, 2010).

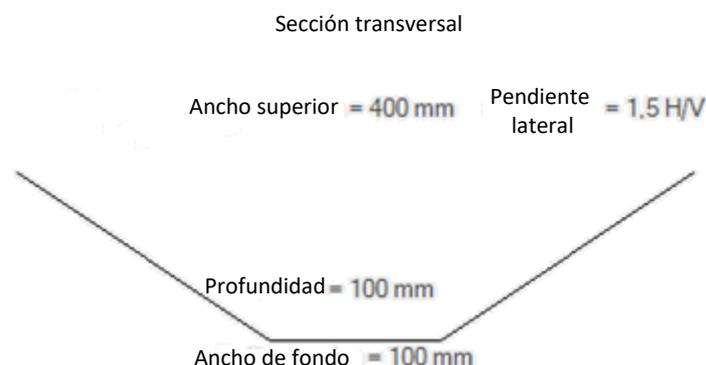


Figura 43. Sección transversal de surco promedio para los casos bajo estudio.

La geometría de los surcos de cebolla queda determinada a la siembra en gran parte por el conformador con rejas que posee el modelo de sembradora que comúnmente se utiliza en la zona para el cultivo de cebolla. Las medidas del surco dibujado en el conformador de la sembradora son: 0,45 m ancho superior, 0,30 m de ancho medio, 0,10 m de ancho inferior y 0,15 m de tirante. Sin embargo, generalmente no se trabaja a la máxima profundidad, quedando un tirante aproximadamente de 0,10 m en vez de 0,15 m. A su vez, labores como el aporque del cultivo en surco y el tránsito de maquinarias modifican la geometría de los surcos durante el desarrollo del cultivo.

Con respecto a las melgas, el ancho promedio fue 12,4 m, el rango entre cuartiles fue 11,3 a 13 m y los valores extremos 9 y 14,7 m, con dos valores atípicos de 7,2 y 24,9 m. Con respecto al número de melgas regadas de manera simultánea, el valor medio resultó ser 3. Por su parte, el frente de riego obtuvo un valor medio de 32,1 m. No se encontraron diferencias significativas entre ancho (w), número de melgas regadas de manera simultánea y frente de riego (fr) para las distintas variables de clasificación (

Tabla 18).

Tabla 18. Ancho de melga (w), número de melgas regadas de manera simultánea y frente de riego (fr) para el total de eventos de riego que regaron por surcos.

Variable		n	w (m)		Melgas regadas simultáneamente		fr (m)	
			Media	ES	Media	ES	Media	ES
Intendencia de riego	Mayor Buratovich	13	12,29 a	0,89	2 a	0,5	26,54	5,79
	Pedro Luro	7	12,30 a	1,21	3 a	0,69	32,94	7,89
	Villalonga	5	12,69 a	1,44	4 a	0,81	45,36	9,34
Tenencia de la tierra	Propietario	13	12,96 a	0,76	2 a	0,44	38,13	7,54
	Arrendatario	17	12,09 a	1,10	3 a	0,65	29,26	5,17
Entrega de agua	Con Turno	15	12,83 a	1,16	3 a	0,52	34,12	6
	Sin turno	15	11,88 a	0,31	3 a	0,54	184 a	16

Derivación a la parcela	Sifón	23	11,76 a	0,70	3 a	0,41	35,74	4,92
	Boquete	7	13,94 a	1,12	2 a	0,65	22,74	7,89
Media		30	12,37	0,62	3	0,36	32,1	4,26

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El ancho de melga (w) suele estar sujeto a las preferencias del productor sobre el manejo del cultivo: maquinaria disponible, riego, aporques, pulverizaciones, tipo de cosecha, etc.

4.4.5 Caudales

La Tabla 63 del Anexo detalla los caudales en compuerta (Q_c), de manejo en acequia (Q_m) y caudal unitario (qu) registrado en cada evaluación de riego.

4.4.5.1 Caudal en compuerta

El caudal medio registrado en compuerta (Q_c), para el total de las evaluaciones fue de 103 L s^{-1} . El rango intercuartil es de 54 a 146 L s^{-1} y los valores extremos son 12 y 206 L s^{-1} . La Tabla 19 detalla los valores medios y el error estándar referidos a Q_c según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación del año. El valor medio de Q_c registrado para surco es menor que para melga. Esto puede estar relacionado a los menores caudales unitarios que se utilizan en surco y a la flexibilidad propia del método con respecto al frente de riego (fr), ya que aún con bajos caudales de manejo se puede ajustar el número de surcos regados de manera simultánea. No se observan diferencias significativas de Q_c para el resto de las variables de clasificación.

Tabla 19. Valores medios y error estándar (ES) referidos a caudal en compuerta (Q_c), según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación.

Variables	n	Caudal en compuerta (Q_c) L s ⁻¹	
		Media	ES
Intendencia de riego	Mayor	13	
	Buratovich		88 a
	Pedro Luro	6	119 a
	Villalonga	5	116 a
Método de riego	Surco	5	65 a
	Melga	25	111 b
Tenencia de la tierra	Propietario	13	110 a
	Arrendatario	17	94 a
Entrega de agua	Con Turno	15	116 a
	Sin turno	15	90 a
Derivación a la parcela	Sifón	23	107 a
	Boquete	7	91 a
Etapa de cultivo	E ₁	11	107 a
	E ₂	10	92 a
	E ₃	9	111 a
Estación	Primavera	20	104 a
	Verano	10	102 a
Media		30	103

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4.5.2 Caudal de manejo en acequia

El caudal medio de manejo (Q_m) en acequia registrado para el total de las evaluaciones fue de 88 L s^{-1} . El rango intercuartil es de 49 a 142 L s^{-1} y los valores extremos son 9 y 170 L s^{-1} . La (

Tabla 20) detalla los valores medios y el error estándar referidos a Q_m según intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación. El valor medio de Q_m registrado para surco es menor que para melga, en línea con lo observado en el caudal en compuerta (Q_c). No se observan diferencias significativas de Q_m para el resto de las variables de clasificación.

Tabla 20. Valores medios y error estándar (ES) referidos a caudal de manejo en acequia (Q_m), según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y tipo de derivación a la parcela.

Variables		n	Caudal de manejo (Q_m) L s^{-1}	
			Media	ES
Intendencia de riego	Mayor	13	78 a	11
	Buratovich			
	Pedro Luro	6	100 a	18
	Villalonga	5	93 a	10
Método de riego	Surco	5	57 a	18
	Melga	25	94 b	8
Tenencia de la tierra	Propietario	13	93 a	12
	Arrendatario	17	81 a	10
Entrega de agua	Con Turno	15	100 a	10
	Sin turno	15	76 a	12
Derivación a la parcela	Sifón	23	107 a	9
	Boquete	7	84 a	20
Etapa de cultivo	E ₁	11	90 a	14
	E ₂	10	75 a	14
	E ₃	9	99 a	11
Estación	Primavera	20	86 a	10
	Verano	10	91 a	13
Media		30	88	8

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4.5.3 Caudal de los sifones de riego

Los casos bajo estudio que regaron por surcos utilizaron sifones de 1" PEAD (polietileno expandido de alta densidad) y 1" PVC (Policloruro de vinilo). Aquellos casos que sembraron en plano y regaron por melga, utilizaron sifones de 2" PEAD, 2" PVC y 3" PVC. El valor de carga hidráulica (h) promedio para el total de casos que regaron con sifones fue de 0,18 m, el rango entre cuartiles 0,09 a 0,25 m y valores extremos de 0,35 y 0,05 m. El valor de carga hidráulica promedio para surcos fue 0,12 m y para melga 0,19 m, sin encontrarse diferencias significativas (Tabla 21)

Tabla 21. Valores medios y error estándar (ES) referidos a carga hidráulica (h) en función del método de riego.

Variable	n	Carga hidráulica (m)		
		Media	ES	
Método de riego	Surco	5	0,12 a	0,02
	Melga	18	0,19 a	0,02

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Como resultado del aforo volumétrico a distintas cargas hidráulicas de los sifones utilizados para regar el cultivo de cebolla, se obtuvo una curva de gasto – carga para cada uno de ellos (Figura 44). Estas curvas ajustaron de manera independiente según el diámetro y el material de cada sifón.

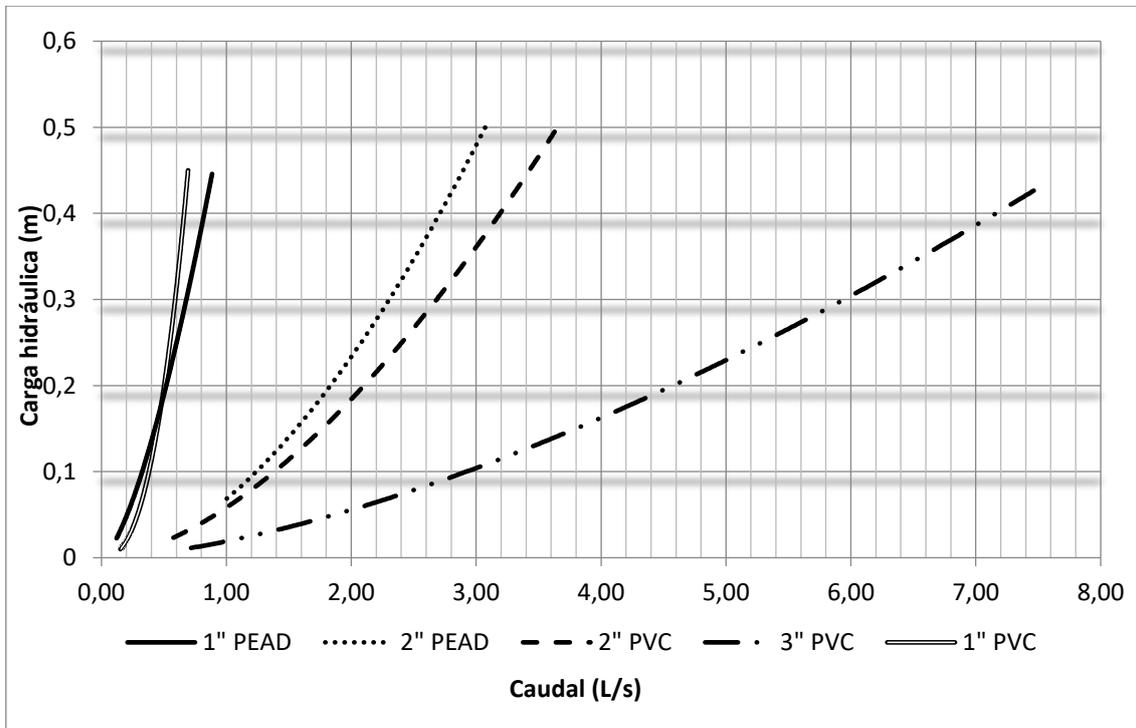


Figura 44. Curvas de gasto – carga de los sifones de riego utilizados para el riego de cebolla.

Con los resultados obtenidos, fue posible elaborar con precisión el instrumental de aforo de sifones a campo para el operario de riego, compuesto por una tabla de caudales en función del diámetro del sifón y la carga hidráulica, que se determina durante el riego a través de una manguera de nivel. Conocer el caudal que erogan los sifones de riego resulta fundamental para ajustar el caudal unitario (qu) y tiempo de aplicación del agua (tap) a los objetivos del riego.

4.4.5.4 Caudal unitario

El caudal unitario (qu) medio para el total de las evaluaciones de riego fue $3,04 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Sin embargo, con respecto al método de riego, el caudal unitario (qu) registrado en melga es significativamente mayor que en surco, como se observa en la Tabla 22 y en la Figura 45.

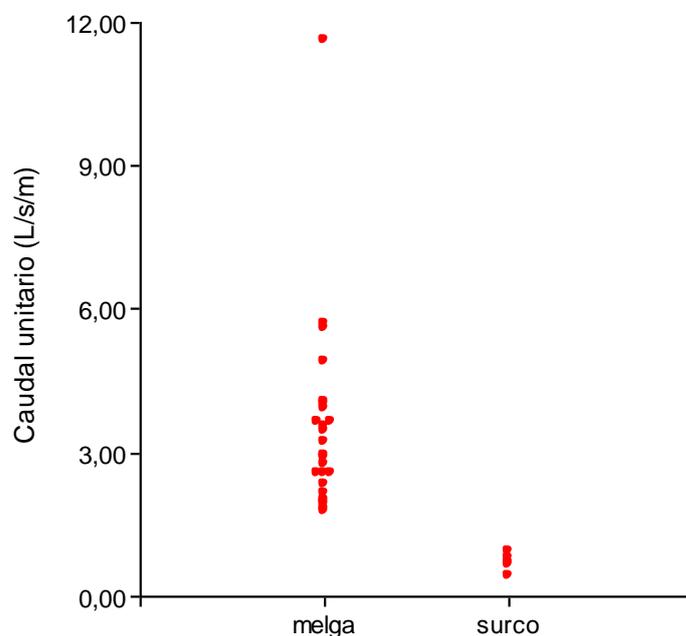


Figura 45. Caudal unitario (qu) registrados en melgas y en surcos.

Tabla 22. Valores medios y error estándar (ES) referidos al caudal unitario (qu) según método de riego

Variable		n	$qu \text{ (L s}^{-1} \text{ m}^{-1}\text{)}$	
			Media	ES
Método de riego	Surco	5	0,68 a	0,09
	Melga	25	3,5 b	0,4

Medias que comparten alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El caudal unitario medio registrado en melga es de $3,5 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. El rango intercuartil es de 2,2 a $4 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ y los valores extremos son $1,8$ y $5,7 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$, con un valor atípico de $11,6 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Por su parte, el caudal unitario medio registrado en surco es de $0,68 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ (equivalente a $0,54 \text{ L s}^{-1} \text{ surco}^{-1}$) con valores extremos de $0,44$ y $0,95 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Los valores de qu registrados en este estudio para el riego de cebolla son mayores, por ejemplo, a los registrados en cultivos hortícolas de la zona de cuyo (Morábito, 2003; Schilardi, 2010).

Si analizamos el caudal unitario utilizado en melga para cada etapa de cultivo, se observa un valor medio decreciente de E1 a E3, aunque sin diferencias significativas (

Tabla 23).

Tabla 23. Valores medios y error estándar (ES) referidos al caudal unitario (qu) en melga según etapa de cultivo.

variable	n	qu ($L s^{-1} m^{-1}$)		
		Media	ES	
Etapa de cultivo	E ₁	7	4,66 a	1,2
	E ₂	9	3,01 a	0,3
	E ₃	8	2,9 a	0,4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Lo mismo sucede si quitamos del análisis el valor atípico de qu $11,6 L s^{-1} m^{-1}$ para caudal unitario en melga en las distintas etapas de cultivo y en la estación primavera con respecto a verano, como se observa en la Tabla 24. Esto puede guardar relación con dos puntos: a) la mayor dotación de agua entregada al comienzo de la campaña de riego y b) las labores previo a la siembra aumentan la rugosidad de la superficie del suelo, provocando un avance del agua más lento, especialmente durante el primer riego, por lo que es común que el operario utilice mayores caudales para contrarrestar ese proceso.

Por otro lado, no se encontraron diferencias en caudales para los casos bajo estudio que se encuentran dentro de turnos de riego (ct) con respecto a aquellos con caudal continuo (st) en su establecimiento, lo que indica el éxito del turnado para el manejo de altos caudales instantáneos en establecimientos con pequeña concesión de agua. Tampoco hay evidencias estadísticas para inferir diferencias en los caudales unitarios (qu) de aquellos casos en que entregan el agua a la parcela mediante boquete con respecto a los que lo hacen con sifones, para las distintas intendencias de riego y con respecto a la tenencia de la tierra (Tabla 24).

Por último, el alto porcentaje de casos bajo estudio que utilizan la siembra en plano y el riego por inundación en cebolla, en coincidencia con lo que ha ocurrido durante los últimos años, deja en evidencia el cambio respecto al uso del agua y riego del cultivo: mientras la cebolla en surcos conserva el uso de sifones de pequeño diámetro y bajos caudales unitarios, el cultivo de cebolla en melgas se riega con sifones de mayor diámetro y altos caudales.

Tabla 24. Valores medios y error estándar (ES) referidos a caudal unitario (qu) en melgas, según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo

Variables		n	qu melgas ($L s^{-1} m^{-1}$)	
			Media	ES
Intendencia de riego	Mayor Buratovich	13	3,29 a	0,28
	Pedro Luro	6	3,60 a	0,77
	Villalonga	5	2,31 a	0,29
Tenencia de la tierra	Propietario	8	2,84 a	0,44
	Arrendatario	16	3,32 a	0,33
Entrega de agua	Con Turno	11	2,93 a	0,42
	Sin turno	13	3,40 a	0,30
Derivación a parcela	Sifón	18	3,10 a	0,28
	Boquete	6	3,34 a	0,63
Etapa de cultivo	E ₁	7	3,66 a	0,71
	E ₂	9	3,01 a	0,29
	E ₃	8	2,90 a	0,38
Estación	Primavera	20	3,29 a	0,31
	Verano	10	2,90 a	0,34

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4.6 Tiempo de aplicación

El valor medio de la variable tiempo de aplicación (tap) para el total de las evaluaciones es de 140 minutos. El valor de tap es significativamente superior para el método de riego por surcos respecto a melgas, como se observa en la Figura 46 y en la Tabla 25, guardando relación con el valor más bajo de caudal unitario (qu) utilizado en surco respecto melga. En la Tabla 63 del anexo se detalla el valor de tap para cada evaluación de riego.

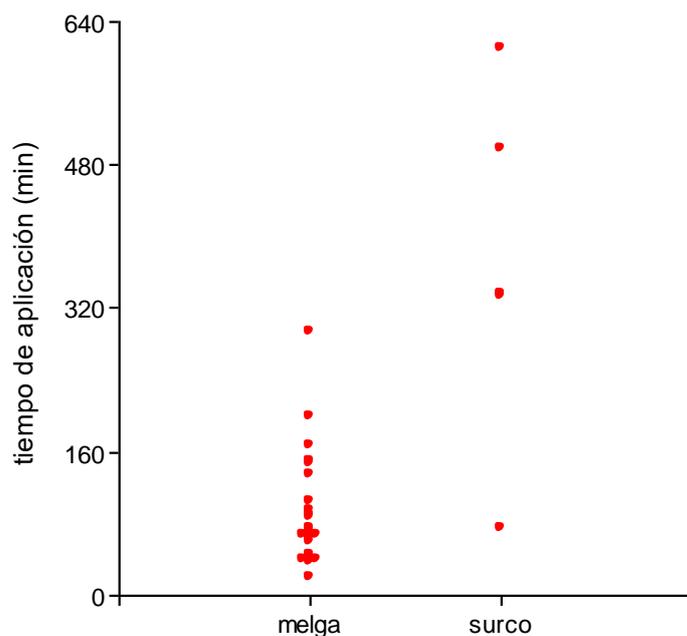


Figura 46. Diagrama de densidad de puntos para los tiempos de aplicación (*tap*) registrados en melgas y surcos.

Tabla 25. Valores medios y error estándar (ES) referidos al tiempo de aplicación (*tap*) según método de riego.

VARIABLE	<i>tap</i> (min)		
		Media	ES
Método de riego	Surco	370 a	91
	Melga	94 b	13

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El tiempo de aplicación (*tap*) medio registrado en melga es 94 min. El rango entre cuartiles es 45 a 140 min y los valores extremos son 21 y 199 min, con un valor atípico de 295 min. Por su parte, el tiempo de aplicación (*tap*) medio registrado para surco es de 370 min. Con valores extremos de 74 y 610 min. Esta diferencia en *tap* se observa también para la variable “tenencia de la tierra”, ya que el total de los casos que son arrendatarios regaron por melgas. Por otro lado, los altos tiempos de aplicación (*tap*) en surco pueden resultar una desventaja ante los turnados de riego, cada vez más común como sistema de entrega en la zona.

En la Tabla 26 pueden observarse los valores medios y desviación estándar referidos a *tap* en melgas según intendencia de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación y etapa de cultivo. No existen diferencias significativas en las medias para *tap* y dichas variables explicativas.

Tabla 26. Valores medios y error estándar (ES) referidos a tiempo de aplicación (*tap*) según intendencia de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.

VARIABLES	<i>tap</i> melgas (min)		
	Media	ES	
Intendencia	Mayor Buratovich	85 a	14
	Pedro Luro	86 a	20
	Villalonga	130 a	45
Tenencia de la tierra	Propietario	134 a	30
	Arrendatario	76 a	10
Entrega de agua	Con Turno	109 a	22
	Sin turno	79 a	13
Derivación a parcela	Sifón	98 a	16
	Boquete	85 a	18
Etapa de cultivo	E ₁	74 a	14
	E ₂	101 a	29
	E ₃	107 a	18
Estación	Primavera	89 a	69
	Verano	107 a	50

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.4.7 Láminas de riego

La lámina bruta aplicada (*db*) promedio para el total de las evaluaciones es de 87 mm. El 50% de los casos evaluados (ubicados en el rango intercuartil), aplicaron una lámina bruta entre 65 y 98 mm. Los valores extremos son 35 y 147 mm y se registró un valor atípico de 231 mm.

La lámina percolada (*dp*) promedio para el total de las evaluaciones es de 62 mm. El rango intercuartil es de 39 y 77 mm, con valores extremos de 11 y 113 mm y un valor atípico de 168 mm.

Por último, la lámina consumida (*dc*) en el perfil de suelo explorado por las raíces promedio para todo el ciclo y casos bajo estudio es 25 mm y el rango intercuartil es de 7 y 41 mm, con valores extremos de 3 y 72 mm.

En la Tabla 64 del anexo se detalla para cada evaluación de riego la lámina bruta aplicada (*db*), percolada (*dper*) y consumida (*dc*).

Al analizar las láminas de riego agrupadas según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo (Tabla 27), no se registraron diferencias significativas para *db* según etapa de cultivo y estación del año, lo cual indica que el riego por gravedad de cebolla en el valle se programa por frecuencia y no por lámina aplicada. Tampoco se encontraron diferencias para *db* entre surco y melga, debido a que las diferencias en los tiempos de aplicación (*tap*) se compensan con los caudales unitarios.

Si se encontraron diferencias significativas para *dc* según etapa de cultivo y estación del año, ya que esta lámina aumentó al avanzar las etapas de cultivo con diferencias significativas (8, 25 y 47 mm). Lo mismo sucede para la estación del año, siendo *dc* mayor en verano (47 mm) que en primavera (14 mm). Esto se correlaciona con el aumento del perfil del suelo explorado por las raíces del cultivo junto al aumento de la demanda evapotranspiratoria.

También se encontraron diferencias para *dper* según intendencia de riego, siendo en Pedro Luro mayor que en Mayor Buratovich. Esto puede estar relacionado a que casi el total de las evaluaciones de riego en Pedro Luro coincidieron con la estación primavera, por lo que el valor de *dc* es menor y, si bien no se encontraron diferencias significativas, el valor de *db* para esta intendencia de riego fue mayor.

No se encontraron diferencias en las láminas para las variables “tenencia de la tierra”, “entrega de agua” y “derivación a la parcela”.

Tabla 27. Valores medios y error estándar (ES) referidos a lámina bruta aplicada (*db*), lámina consumida (*dc*) y lámina percolada (*dp*) expresadas en mm, agrupadas según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, etapa de cultivo.

VARIABLES	LÁMINAS DE RIEGO (mm)						
	<i>db</i>		<i>dc</i>		<i>dp</i>		
	Media	ES	Media	ES	Media	ES	
Intendencia de riego	Mayor Buratovich	81 a	6	29 a	5	52 a	8
	Pedro Luro	101 a	18	20 a	6	81 b	10
	Villalonga	80 a	11	25 a	8	55 ab	13
Método de riego	Surco	74 a	12	20 a	9	54 a	15
	Melga	90 a	8	26 a	4	64 a	7
Tenencia de la tierra	Propietario	84 a	7	24 a	6	60 a	9
	Arrendatario	89 a	11	26 a	5	63 a	8
Entrega de agua	Con Turno	87 a	6	25 a	5	62 a	9
	Sin turno	87 a	12	25 a	5	62 a	9
Etapas de cultivo	E ₁	78 a	9	8 c	3	70 a	10
	E ₂	81 a	18	25 b	4	56 a	11
	E ₃	104 a	5	47 a	4	57 a	11
Estación	Primavera	81 a	6	14 b	3	67 a	7
	Verano	100 a	17	47 a	4	53 a	10
Derivación a parcela	Sifón	82 a	6	23 a	4	59 a	7
	Boquete	103 a	21	33 a	7	70 a	13
	Media	87	7	25	4	62	6

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.5 Indicadores de desempeño

En la Tabla 65 del anexo se detalla para cada evaluación de riego los indicadores de desempeño: Eficiencia de Conducción Interna (ECI), Eficiencia de distribución (EDI_q), Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación razonable al método de riego (EAP_r).

4.5.1 Estimación de error de muestreo para ECI, EAP y EDI_q

La Tabla 28 y la Figura 47 representan el tamaño de muestra para ECI, EAP, EDI_q, en función del error de estimación o muestreo para una confiabilidad del 95 %. El error de estimación se fija como un porcentaje de la media. Se considera para el cálculo de “n” el valor de la desviación típica de las 30 evaluaciones realizadas a campo.

Tabla 28. Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de muestra para ECI, EAP y EDIq ($1-\alpha = 0,95$)

Tamaño de muestra (n)			Erro de estimación (%)
EAPc	ECI	UDIq	
9750	457	408	1
2437	114	102	2
1083	51	45	3
390	18	16	5
97	5	4	10
43	2	2	15
24	1	1	20
16	1	1	25
11	1	0	30

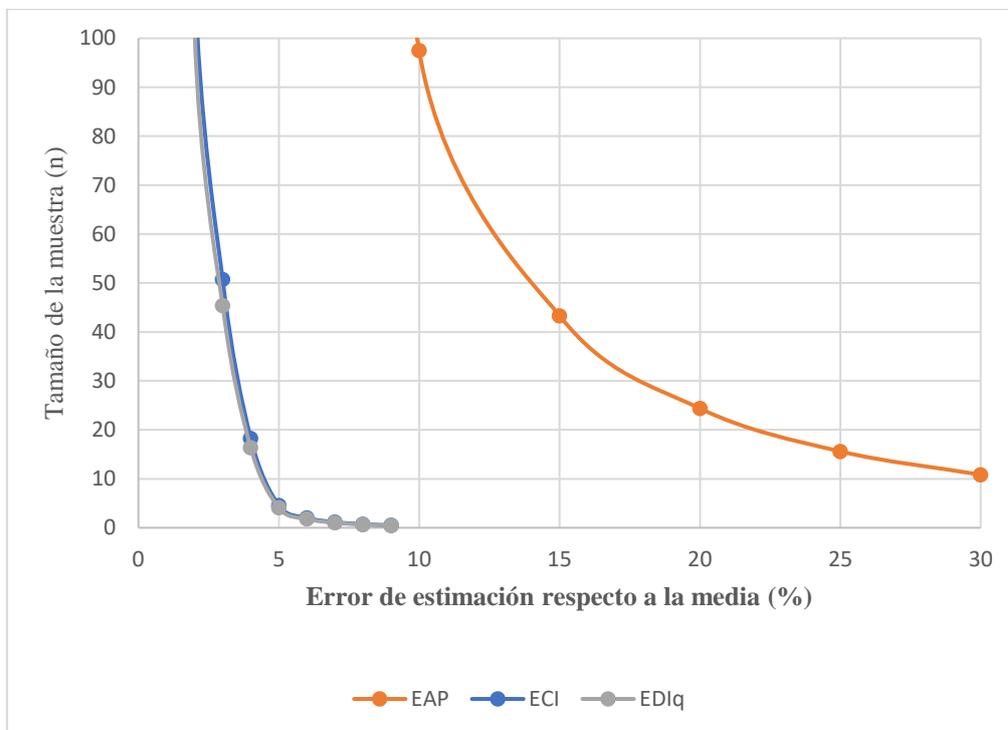


Figura 47. Variación del tamaño de muestra en función del error de estimación respecto a la media para ECI, EAP y EDIq ($1-\alpha=0,95$)

Para el tamaño de muestra utilizado ($n = 30$), corresponde una precisión en porcentaje respecto a la media de ECI = 4%, EAP = 18% y EDIq = 4%. Los resultados obtenidos, permiten planificar el tamaño de muestra adecuado para la precisión deseada en futuras evaluaciones de riesgo para el área bajo riego del valle bonaerense del río Colorado (VBRC).

4.5.2 Eficiencia de Conducción Interna (ECI)

El valor de ECI promedio para el total de las evaluaciones de riego fue 85%. El rango intercuartil 79% a 92%. Los valores extremos son 62 y 98%. Un tercio de los casos bajo estudio sufrieron pérdidas de agua significativas (mayores al 20%) en conducción dentro del campo.

En esos casos tal vez sea conveniente mejorar el mantenimiento de las acequias y analizar técnica y económicamente la posibilidad de revestir el tramo de conducción con materiales plásticos o mangas.

Al analizar los valores medios y el error estándar de ECI según las variables de clasificación, se encuentran diferencias significativas según el tipo de derivación a la parcela, siendo mayor para “boquete” con respecto a “sifón”, aunque por la independencia entre las variables, dichas diferencias se desestiman. No se encontraron diferencias según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua y etapa de cultivo (

Tabla 29).

Tabla 29. Valores medios y error estándar (ES) referidos a ECI (%) según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.

Variables		n	ECI (%)	
			Media	ES
Intendencia de riego	Mayor Buratovich	15	88 a	2
	Pedro Luro	9	81 a	3
	Villalonga	6	82 a	5
Método de riego	Surco	5	84 a	3
	Melga	25	85 a	2
Tenencia de la tierra	Propietario	13	84 a	3
	Arrendatario	17	85 a	2
Entrega de agua	Con Turno	15	86 a	3
	Sin turno	15	83 a	2
Derivación a la parcela	Sifón	23	83 a	2
	Boquete	7	92 b	2
Etapa de cultivo	E ₁	11	82 a	3
	E ₂	10	84 a	3
	E ₃	9	89 a	2

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.5.3 Eficiencia de distribución (EDI_q).

El valor de EDI_q promedio para el total de las evaluaciones de riego realizadas en el valle fue 86%, lo que califica como “satisfactoria” para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985). El rango intercuartil 82% a 92%. Los valores extremos de EDI_q son 69 y 95%. El 75 % de las evaluaciones realizadas tuvieron un valor de EDI_q “satisfactoria” o “buena” y el 25 % restante una EDI_q “mala”.

Dentro del cuartil número uno y para este indicador de uniformidad del riego, se encontraron casos con percolación en cabecera y casos con percolación al pie, como la evaluación de riego N° 19 y 23 respectivamente (Figura 48). Por su parte, en el cuartil 3 se encuentran eventos de riego con valores de EDIq superiores al 90%, como se indica en la Figura 49 para la evaluación 11 y 18.

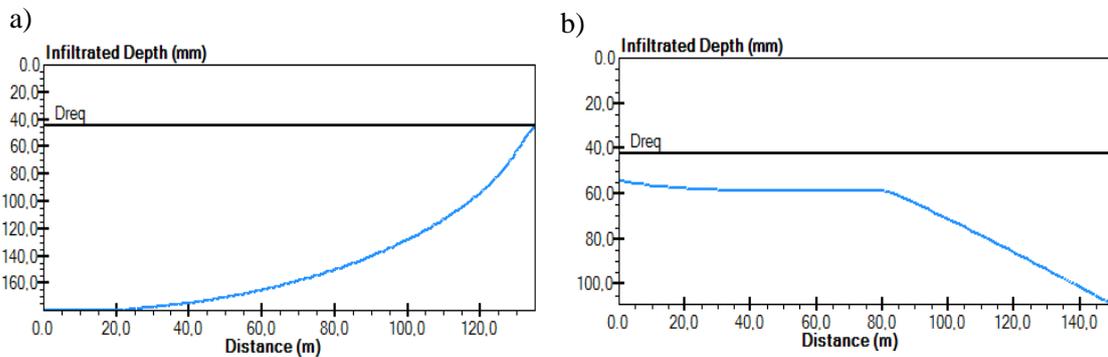


Figura 48. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°19 (a) y 23 (b).

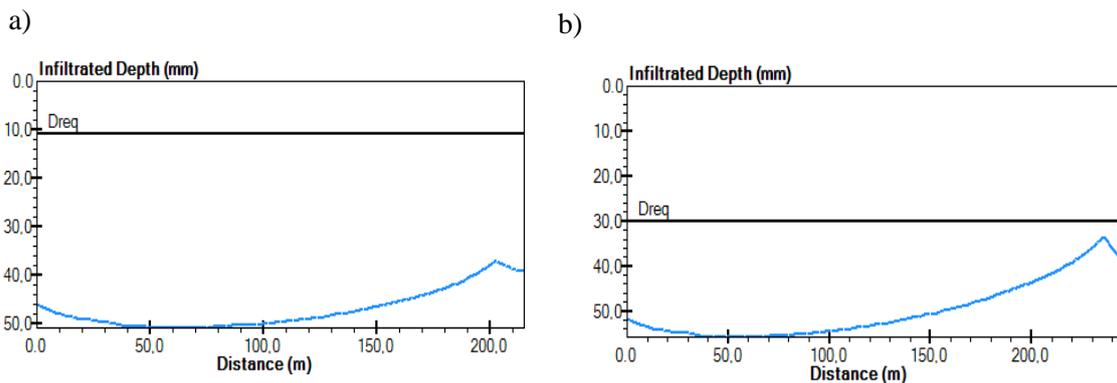


Figura 49. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°11 (a) y 18 (b).

Al analizar los valores medios y el error estándar de EDIq según las variables de clasificación, no se encontraron diferencias (Tabla 30).

Tabla 30. Media y error estándar (ES) de EDIq (%) según intendencia, método de riego, tenencia de la tierra, sistema de entrega de agua, tipo de derivación a la parcela y etapa de cultivo.

Variables		n	EDIq (%)	
			Media	ES
Intendencia de riego	Mayor Buratovich	15	85 a	2
	Pedro Luro	9	88 a	3
	Villalonga	6	84 a	4
Método de riego	Surco	5	89 a	2
	Melga	25	85 a	2
Tenencia de la tierra	Propietario	13	85 a	2
	Arrendatario	17	86 a	2
Entrega de agua	Con Turno	15	85 a	3
	Sin turno	15	86 a	2
Derivación a la parcela	Sifón	23	86 a	2
	Boquete	7	86 a	3
Etapa de cultivo	E ₁	11	88 a	3
	E ₂	10	86 a	3
	E ₃	9	82 a	3

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Siendo la uniformidad de riego fundamental para los cultivos hortícolas sería de gran importancia su mejora en aquellos casos que presentaron valores bajos de EDIq.

4.5.4 Eficiencia de aplicación

4.5.4.1 Eficiencia de aplicación actual (EAP)

La eficiencia de aplicación actual (EAP) promedio del riego por superficie para el cultivo de cebolla en el VBRC es de 30%, lo cual califica como “mala” para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985). Sin embargo, aumenta en cada etapa de cultivo (E₁ 10%, E₂ 34% y E₃ 51%) y con la estación del año (18% primavera y 54% verano), como se observa en la Tabla 31 y Figura 50. No se observan diferencias significativas para el resto de las variables de clasificación.

Al considerar la profundidad del sistema radicular del cultivo de cebolla como profundidad objetivo a humedecer mediante el riego, el valor de EAP en E₁ y en la estación primavera resultó muy baja. Lo contrario se observa en la estación verano y en la tercera etapa de cultivo (E₃), con evaluaciones de riego que obtuvieron un valor de EAP “satisfactorio”.

Tabla 31. Valores medios y error estándar (ES) para Eficiencia de aplicación (EAP) según estación del año y etapa de cultivo.

Variables	n	EAP (%)		
		Media	ES	
Etapa de cultivo	E ₁	11	10 a	2
	E ₂	10	34 b	7
	E ₃	9	51 c	5
Estación	Primavera	20	18 a	3
	Verano	10	54 b	6
Media	30	30	4	4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

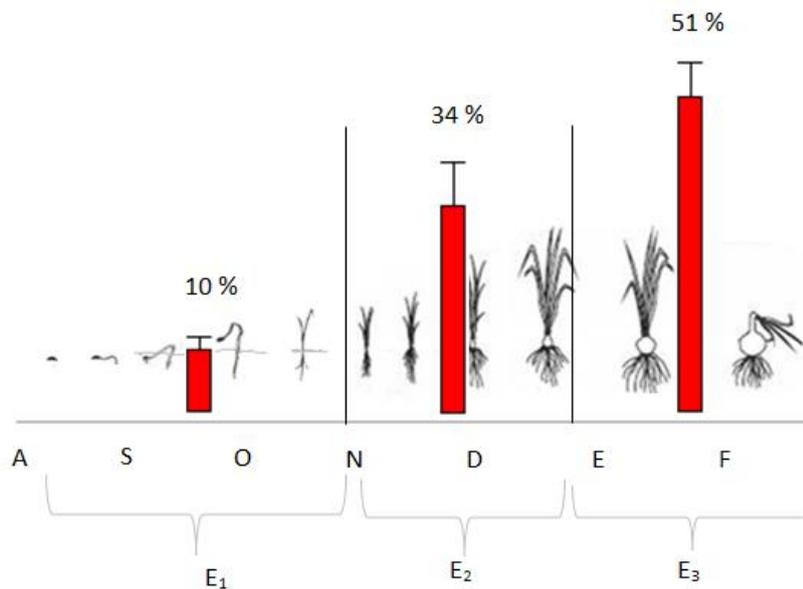


Figura 50. Eficiencia de aplicación según etapa de cultivo.

Los valores crecientes de EAP y sus diferencias de E₁ a E₃, coinciden con las diferencias encontradas en lámina consumida en el perfil de suelo explorado por las raíces (*dc*), para la misma variable de clasificación. Debido a que no se encontraron diferencias entre las láminas brutas aplicadas (*db*) entre etapas de cultivo (Tabla 32), el componente que determina en este caso la variación de la eficiencia de aplicación, es fundamentalmente la lámina consumida (*dc*).

Tabla 32. Valores medios y error estándar (ES) referidos a lámina bruta aplicada (*db*), lámina consumida (*dc*) expresadas en mm, y EAP (%) según etapa de cultivo y estación del año.

VARIABLES		<i>db</i>		<i>dc</i>		EAP	
		Media	ES	Media	ES	Media	ES
Etapa de cultivo	E ₁	78 a	11	8 a	3	10 a	5
	E ₂	81 a	12	25 b	4	34 b	5
	E ₃	104 a	12	47 c	4	51 c	5
Estación	Primavera	81 a	8	14 a	3	18 a	4
	Verano	100 a	12	47 b	4	54 b	5
Media		87	7	25	4	30	4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Considerar la profundidad radicular del cultivo de cebolla en cada etapa de cultivo como profundidad objetivo a humedecer mediante el riego, deja como resultado láminas a reponer muy pequeñas al inicio del cultivo (en la estación de primavera), debido a que se trata de un cultivo anual que se establece de semilla y presenta baja ETc en los primeros estadios de desarrollo. En esos estadios cumple con otros fines de emergencia y establecimiento del cultivo que únicamente cubrir la evapotranspiración.

Si bien existe la posibilidad técnica de aplicar pequeños riegos durante la primera fase de desarrollo del cultivo, en general humedecer de manera homogénea la superficie de la melga o el lomo del bordo donde se encuentra la semilla o plántula demanda en general de mayores maniobras con el agua y tiempos de aplicación. Posiblemente estas láminas de reposición estén más acordes a sistemas riego de alta frecuencia como el goteo o aspersión que a sistemas de riego por gravedad o superficie. Por este motivo los valores de EAP son especialmente bajos en los primeros riegos del cultivo.

La EAP calculada es equivalente al indicador que Burt (1997) define como Coeficiente de uso consuntivo de riego (ICUC %), el cual cuantifica el agua no recuperable o que ha sido usada por la planta en relación al agua aplicada mediante el riego. Este análisis de la eficiencia de aplicación no contempla otros usos benéficos o racionales, como el agua utilizada exclusivamente para la emergencia y establecimiento del cultivo o la fracción requerida para lixiviar sales.

4.5.4.2 Eficiencia de aplicación razonable al método de riego (EAP_r)

La EAP_r obtuvo un valor medio para el total de los casos bajo estudio de 46%, lo que la califica como “mala” para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985). Bajo este análisis, las láminas de reposición (en especial en E₁) y el resto de las variables de manejo del riego resultan más acordes al método de riego por superficie. Si bien esta eficiencia también califica como

“mala”, un tercio de los casos evaluados obtuvo un valor superior al 60%, calificando como “satisfactoria” y “buena”.

La Eficiencia de aplicación razonable para el método de riego, considera las limitaciones que posee el método de riego por superficie a la hora de reponer láminas extremadamente pequeñas con adecuada uniformidad. Aun así, se registró un valor mayor de EAP_r en verano con respecto a primavera y en E_2 y E_3 con respecto a E_1 . Teniendo en cuenta que no se encontraron diferencias estadísticas en la lámina bruta (db) aplicada entre etapas de cultivo (Tabla 33 y Figura 51), inferimos que los bajos valores de EAP_r en E_1 , son debido a la lámina consumida (dc) registrada a campo (al igual que sucede con la EAP), definida por la ET_c del cultivo y la frecuencia de riego (Fr). No se observan diferencias significativas para el resto de las variables de clasificación.

Como dijimos anteriormente, durante los primeros riegos es común mantener altos valores de humedad en el suelo que faciliten la germinación, la emergencia y el establecimiento de las plántulas.

Tabla 33. Valores medios y error estándar (ES) referidos a lámina bruta aplicada (db), lámina consumida 0 – 50 (dc 0-50) expresadas en mm, y EAP_r (%) según etapa de cultivo y estación del año.

VARIABLES		db		dc 0-50		EAP_r	
		Media	ES	Media	ES	Media	ES
Etapas de cultivo	E_1	78 a	11	26 a	5	33 a	4
	E_2	81 a	12	41 b	5	56 b	7
	E_3	104 a	12	47 b	4	51 b	5
Estación	Primavera	81 a	8	32 a	3	41 a	4
	Verano	100 a	12	48 b	5	56 b	7
Media		87	7	37	3	46	4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

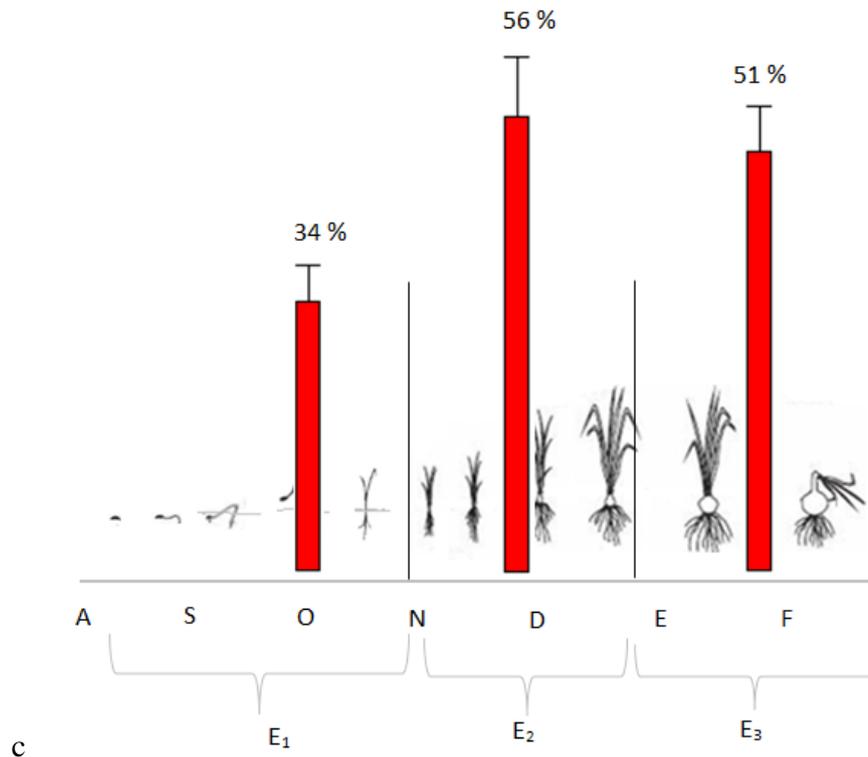


Figura 51. Eficiencia de aplicación razonable para el método de riego EAP_r (%) según etapa de cultivo.

En este caso, los valores de EAP_r no siguen con claridad la misma tendencia de aumento a medida que avanzan las etapas de cultivo, como en el caso de la EAP, ya que al considerar 50 cm como profundidad a reponer en humedad durante todo el ciclo de cultivo la lámina consumida (dc_{0-50}) resultó superior respecto a (dc) en especial en E₁ y E₂.

4.6 Escenarios de optimización del riego.

El modelo matemático de simulación de riego WinSRFR 4.1.3 resultó de utilidad para interpretar las evaluaciones de riego y para el planteo de los escenarios de optimización.

La Tabla 66 del anexo, detalla para cada evaluación de riego las eficiencias de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m y EAP_{mr}) y las eficiencias de aplicación potencial de manejo (EAP_M y EAP_{Mr}).

4.6.1 Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m)

El 90% del total de los casos bajo estudio mejoró el desempeño del evento de riego modificando el caudal unitario (qu) y el tiempo de aplicación (tap) en un rango factible de implementar durante la visita a campo. Sólo en uno de los casos hubo que resignar un 15% de eficiencia de aplicación (aumentando el tap) para no subirrigar un pequeño sector de la unidad de riego. La EAP_m promedio para el total de las evaluaciones fue 42%. Sin embargo, al igual que sucede con la EAP, la EAP_m aumenta a medida que avanza el ciclo del cultivo y/o la estación del año, con diferencias significativas (Tabla 34 y Figura 52), pasando de eficiencias que califican como “malas” a “buenas” para riego por superficie, cercanas al 70%.

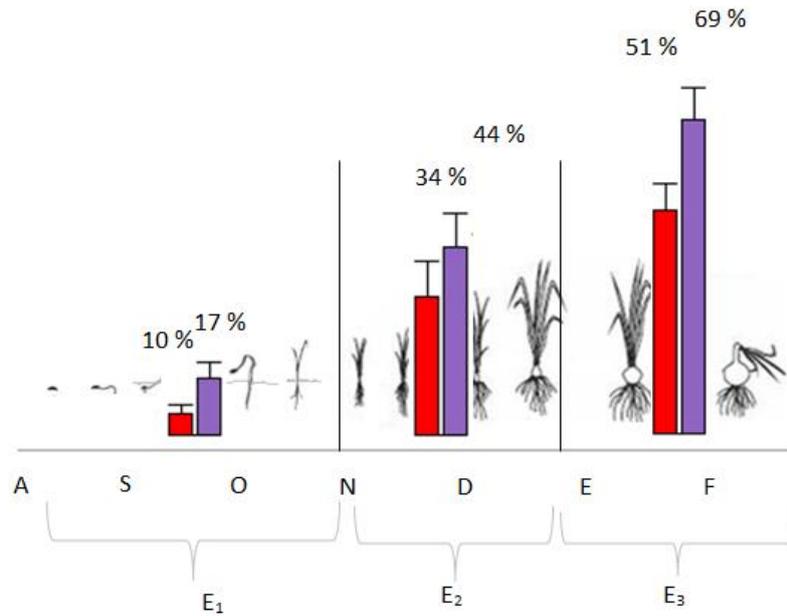


Figura 52. Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m) según etapa de cultivo.

Tabla 34. Valores medios y error estándar (ES) para EAP (%) y EAP_m (%) según etapa de cultivo y estación del año.

Variables	n	EAP (%)		EAP _m (%)		
		Media	ES	Media	ES	
Etapa de cultivo	E ₁	11	10 a	2	17 a	5
	E ₂	10	34 b	7	44 b	6
	E ₃	9	51 c	5	69 c	6
Estación	Primavera	20	18 a	3	28 a	4
	Verano	10	54 b	6	71 b	6
Media		30	30	4	42	4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.6.2 Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP_{mr})

La EAP_{mr} promedio para el total de las evaluaciones fue 62%, lo que la califica como “satisfactoria” para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985). Con respecto a las etapas de cultivo y estación del año, el valor de EAP_{mr} fue mayor en E_3 con respecto a E_1 y mayor en “verano” con respecto a “primavera”, con diferencias significativas, como se observa en la Tabla 35 y Figura 53.

Tabla 35. Valores medios y error estándar (ES) para EAP_r (%) y EAP_{mr} (%) según etapa de cultivo y estación del año.

Variables	n	EAP_r (%)		EAP_{mr} (%)		
		Media	ES	Media	ES	
Etapa de cultivo	E ₁	11	33 a	4	52 a	6
	E ₂	10	56 b	7	67 ab	6
	E ₃	9	51 b	5	69 b	7
Estación	Primavera	20	41 a	4	58 a	4
	Verano	10	56 b	7	71 b	6
Media		30	46	4	62	4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

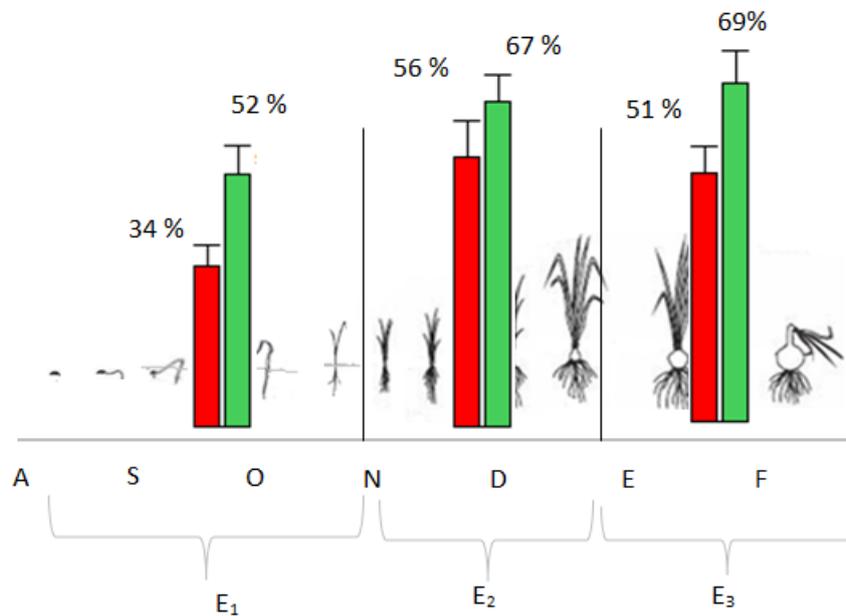


Figura 53. Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r) y Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP_{mr}) según etapa de cultivo.

Del total de casos bajo estudio, el 30% logró aumentar la eficiencia de aplicación únicamente con la reduciendo el tiempo de aplicación (tap), según las condiciones reales de campo y el 60% a través del aumento del caudal unitario (qu), reduciendo el frente de riego (fr), es decir, el número de surcos o melgas regadas de manera simultánea y de manera consecuente el tiempo

de aplicación (*tap*) (Figura 54). En total, el 90% del total de los casos bajo estudio mejoró el desempeño del evento de riego modificando el caudal unitario (*qu*) y/o el tiempo de aplicación (*tap*) en un rango factible de implementar durante la visita a campo.

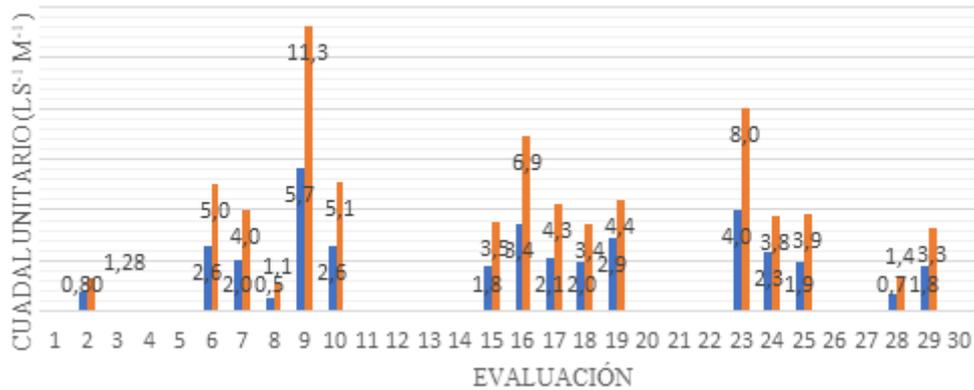


Figura 54. Caudal unitario (*qu*) y caudal unitario optimizado para el día del riego bajo un manejo razonable (*qumr*). Las evaluaciones que no poseen valor no sufrieron modificaciones.

En término medio, el valor obtenido de *qumr* fue un 50% superior al valor medio de *qu* registrado a campo. Sin embargo, si analizamos únicamente los casos en que los cuales se optimizó el caudal unitario aumentándolo, ese aumento fue mayor, alcanzo valores cercanos al 100%. Así es el caso de la evaluación de riego N°6, en tanto la eficiencia de aplicación pasó de 40% a 75%, es decir se obtuvo un aumento de la eficiencia de aplicación del 35 %, disminuyendo el frente de riego (*fr*) de riego a la mitad, con el consecuente aumento de *qu* de 2,6 L s⁻¹ m⁻¹ a 5.2 L s⁻¹ m⁻¹ y una disminución del *tap* de 149 a 39 minutos, con una EDI_q del 90 % (Figura 55).

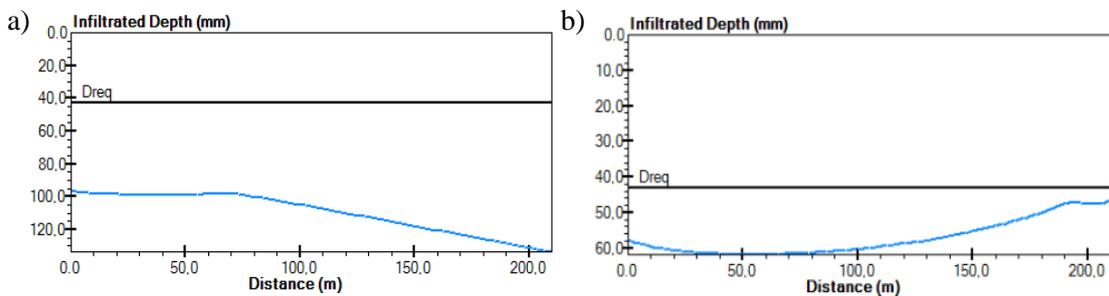


Figura 55. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°6, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).

La evaluación de riego N°19, presentó características similares: disminuyendo el *fr* de 3 a 2 melgas regadas de manera simultánea, el *qu* pasó de 2,92 L s⁻¹ m⁻¹ a 4,38 L s⁻¹ m⁻¹ y en conjunto con la reducción del *tap* de 40 a 21 minutos, la eficiencia de aplicación aumento un 19 % (de 69% a 88%) al reducir *db*, conservando la EDI_q del 90% (Figura 56).

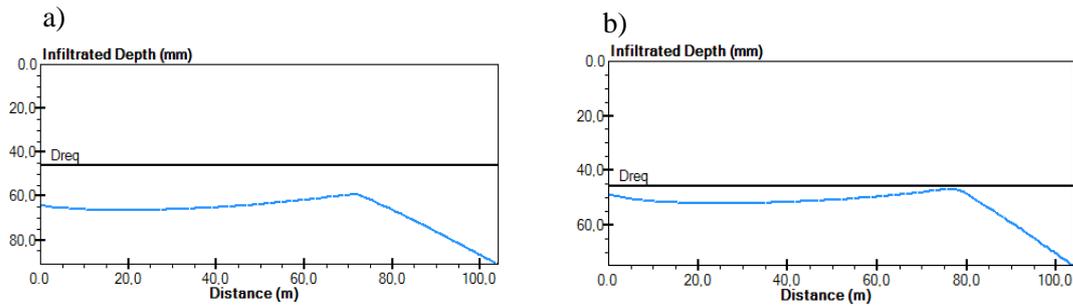


Figura 56. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°19, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).

Casos similares se registraron para el método de riego por surcos. Así, en la evaluación de riego N°8, la eficiencia de aplicación aumentó un 39% (pasó del 46 a 85%) aumentando el qu de 0,51 a 1,02 $L s^{-1} m^{-1}$ al reducir el fr a la mitad, es decir al regar de manera simultánea la mitad de surcos, con una reducción del tap de 333 minutos a 90 y conservando un valor de EDIq de 88 % (Figura 57).

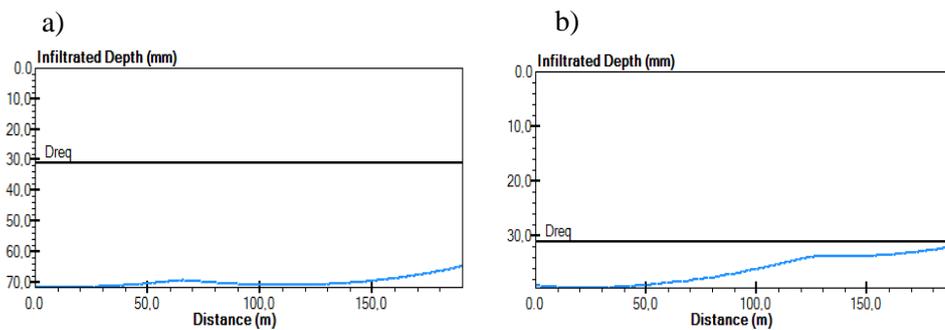


Figura 57. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°8, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).

Por su parte, un 30% logró un mejor desempeño del riego únicamente con la reducción del tiempo de aplicación (tap), según las condiciones reales de campo. Así es el caso de la evaluación de riego N° 26, que consiguió un aumento de la eficiencia de aplicación del 18% únicamente con la disminución del tap de 104 minutos a 77, conservando una adecuada EDIq (Figura 58).

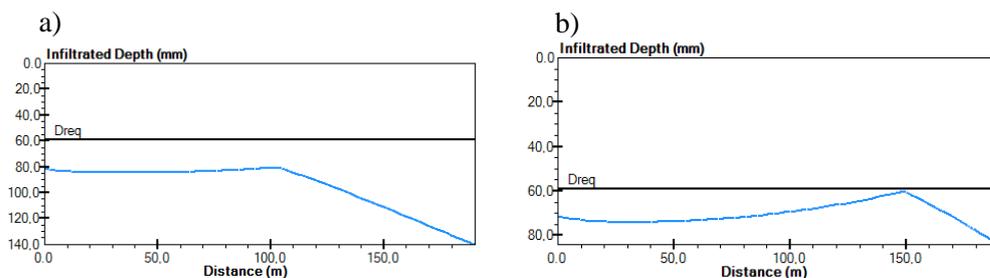


Figura 58. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°26, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).

Casos excepcionales fueron la evaluación N°21 y la 22. En la primera hubo que aumentar levemente el *tap* para corregir un pequeño sector en déficit (Figura 59) y en la segunda reduciendo el *qu* se obtuvo un mejor desempeño.

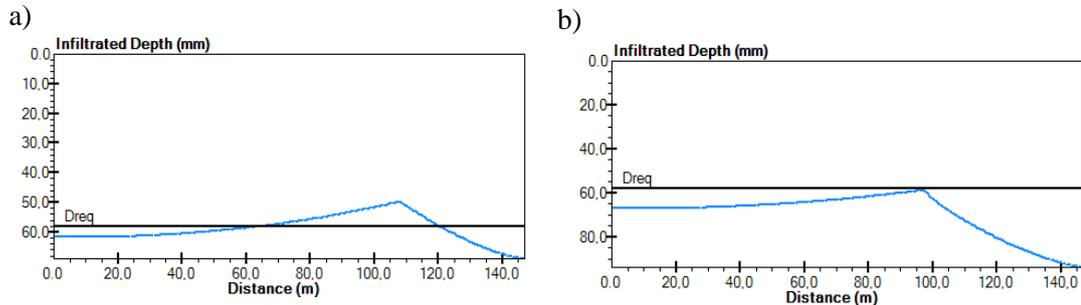


Figura 59. Gráfica obtenida con el módulo de simulación del riego del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 para la evaluación de riego N°22, en condiciones registradas a campo (a) y para un manejo óptimo el día del riego (b).

4.6.3 Eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP_M)

La EAP_M promedio para el total los casos bajo estudio fue 43%, calificando como “mala” para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985). Sin embargo, se encontraron diferencias significativas para EAP_M entre etapas de cultivo y estación del año (Tabla 36 y Figura 60), siendo mayor en E₃ (66%) que en E₂ (44%) y luego que en E₁ (24%) y en verano (31%) con respecto a primavera (67%).

Tabla 36. Valores medios y error estándar (ES) para EAP (%) y EAP_M (%) según etapa de cultivo y estación del año.

Variables		n	EAP (%)		EAP _M (%)	
			Media	ES	Media	ES
Etapa de cultivo	E ₁	11	10 a	2	24 a	5
	E ₂	10	34 b	7	44 b	6
	E ₃	9	51 c	5	66 c	6
Estación	Primavera	20	18 a	3	31 a	4
	Verano	10	54 b	6	67 b	6
Media		30	30	4	43	4

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

El 83 % de los casos bajo estudio obtuvo un aumento de la eficiencia de aplicación bajo las condiciones potenciales de manejo. El 17 % restante redujo el valor de este indicador de desempeño debido a la corrección en la oportunidad de riego. En estos casos la lámina de reposición óptima (*dropt*) era menor que la lámina consumida (*dc*) registrada a campo.

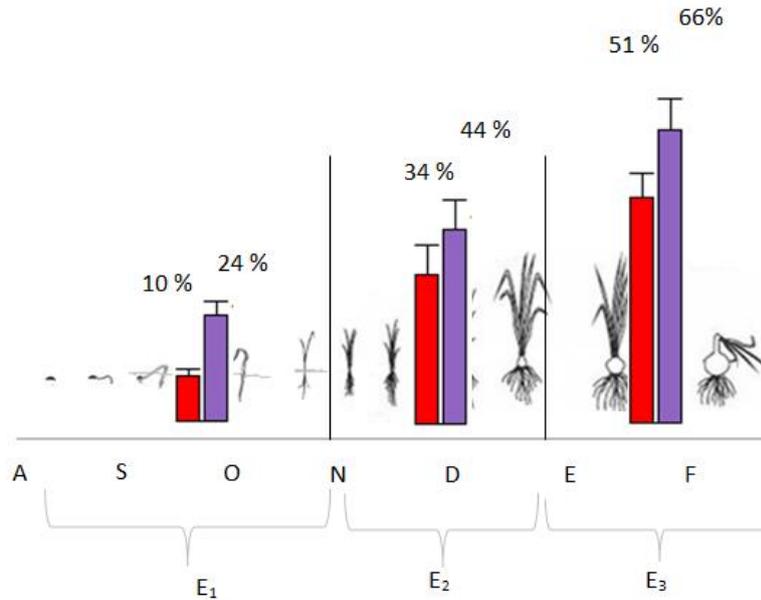


Figura 60. Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP_M) según etapa de cultivo.

La EAP_M superó a la EAP_m, cuando: a) la lámina de reposición óptima (*dropt*) fue mayor a la lámina consumida (*dc*) que se registró el día del riego b) el aumento de *qu* significó un aumento de la eficiencia de aplicación, pero sólo es posible si se dispone de un mayor caudal en compuerta (*Qc*). Los casos bajo estudio en los que EAP_M fue inferior a EAP_m, se debe a que *dropt* es significativamente menor lámina consumida (*dc*) registrada a campo, disminuyendo los valores de eficiencia independientemente de que se corrijan *qu* y/o *tap*. En un solo caso bajo estudio la EAP_M es igual a EAP_m, y se debe a que *dropt* es igual a *dc* y a que el escenario de optimización de manejo planteado para el día del riego es igual al potencial de manejo, reduciendo el *fr* a la mitad.

4.6.4 Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (EAP_{Mr})

La EAP_{Mr} promedio para el total de las evaluaciones fue 72% lo que la califica como “buena” para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985). En varios de los casos bajo estudio los escenarios de optimización obtenidos para el día del riego fueron similares a los obtenidos para un manejo potencial, con la diferencia que, en este último caso, la combinación óptima de caudal y tiempo de corte, no estuvo limitada a las condiciones reales observadas en la visita a campo, especialmente en lo referido a caudales de manejo.

A diferencia de los análisis anteriores, la EAP_{Mr} alcanza un valor del orden del 70% en cualquier fase de desarrollo del cultivo (Tabla 37 y Figura 61)

Tabla 37. Valores medios y error estándar (ES) para EAP_r y EAP_{Mr} (%) según etapa de cultivo y estación del año.

Variables	n	EAP_r		EAP_{Mr}	
		Media	ES	Media	ES
E ₁	11	34 a	4	77 a	4
E ₂	10	56 b	7	72 a	4
E ₃	9	51 b	5	66 a	7
Primavera	20	41 a	4	75 a	3
Verano	10	56 b	7	68 a	7
	30	46	4	72	3

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

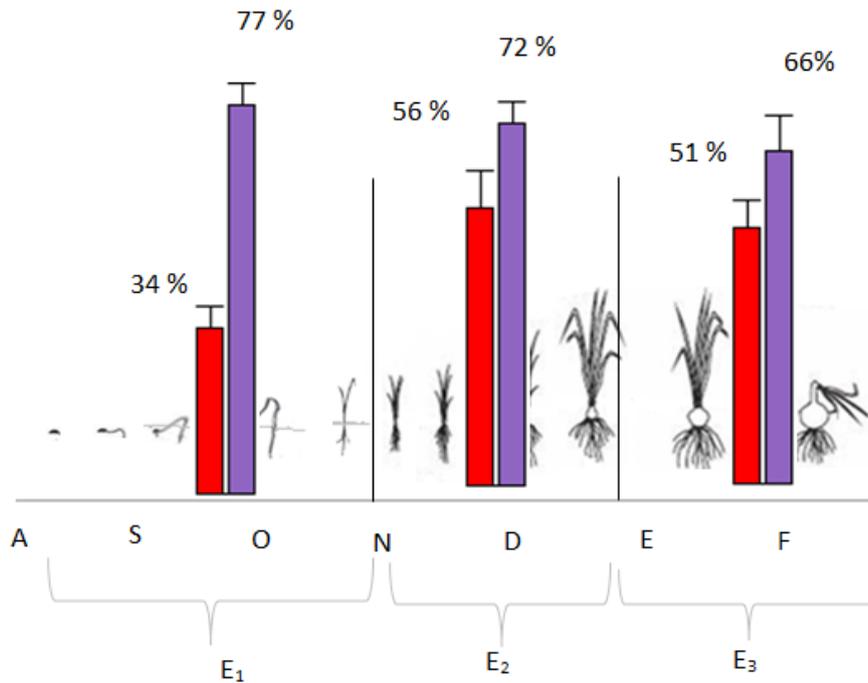


Figura 61. Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r) y Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (EAP_{Mr}) según etapa de cultivo

Aquellos casos que el aumento de qu signifique un aumento de la eficiencia de aplicación, pero se encuentren limitados por el caudal recibido en compuerta (Q_c) debido a la concesión que posee el establecimiento, sería factible pensar en la conveniencia de ingresar en un turno de riego para disponer de mayores caudales. Tal es el caso de la evaluación de riego N°13, en la que se dispone en compuerta (Q_c) 45 L s^{-1} y en acequia (Q_m) 39 L s^{-1} , caudal que entrega a una sola melga durante un tap de 66 minutos, obteniendo un valor de EAP_r de 28%. Sin embargo, si en acequia dispusiese de un caudal (Q_m) cercano a los $68,5 \text{ L s}^{-1}$ y entregara ese caudal a la misma melga durante un tap aproximado de 22 minutos, corrigiendo además la oportunidad de

riego, alcanzaría valor de EAP_{Mr} de 84%, manteniendo la $EDIq$ por encima del 80%. Es decir, aumentaría la eficiencia de aplicación en un 56%.

4.6.5 Caudales unitarios optimizados

La tabla Tabla 67 del anexo detalla el caudal unitario optimizado para el día del riego ($qumr$) y para el manejo potencial ($quMr$), ambos bajo un manejo razonable al método de riego y el caudal unitario máximo no erosivo ($qumáx$) para cada caso bajo estudio.

Al analizar qu con respecto a $qumr$, observamos que el caudal unitario en surco aumentó de $0,68 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ a $1,04 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ y en melga de $3,5 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ a $4,66 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Por su parte con respecto a $quMr$, el valor de caudal en surco aumentó de $0,68 \text{ L/S/m}^{-1}$ a $0,96 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ y de $3,5 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ a $5,25 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ en melga (con un rango entre cuartiles para esta variable de 3,4 a $6,9 \text{ L/s/m}^{-1}$).

En términos medios, el caudal unitario (qu) obtenido en los escenarios de optimización fue 50% superior al registrado a campo, sugiriéndose, en términos generales, el uso de caudales del orden de $5 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ para melgas y de $1 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ para surcos (lo que equivale en este caso a $0,8 \text{ L s}^{-1} \text{ surco}^{-1}$). Si analizamos únicamente los casos en los que se optimizó el riego mediante un aumento de caudal unitario, y comparamos los valores medios, el aumento propuesto en esta variable se acerca al 100% con respecto a la condición original. Es decir, en muchos casos se recomienda reducir a la mitad el frente de riego.

Los caudales unitarios factibles de alcanzar el mismo día de riego, mediante el manejo del frente de riego (fr), se acercaron bastante a los propuestos para un manejo potencial. De hecho, el caudal optimizado hubiese sido factible de implementar el mismo día de riego, en el 80% de los casos, reduciendo el frente de riego (fr). El 20% de los casos restantes necesitó disponer de un caudal en compuerta (Qc) mayor al que se encontraba recibiendo el día de la visita. En ninguno de los casos el caudal unitario sugerido en los escenarios de optimización significó un caudal erosivo, debido a las bajas pendientes que poseen los lotes bajo riego de la zona de estudio (Tabla 38).

Tabla 38. Valores medios y error estándar (ES) referido a caudal unitario en $\text{L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$ según método de riego, registrado a campo (qu), obtenidos bajo un manejo razonable del método en los escenarios de optimización para las condiciones del día del riego ($qumr$), las potenciales de manejo ($quMr$) y el caudal máximo no erosivo de referencia ($qumáx$)

Variable	n	caudal unitario ($\text{L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$)								
		<i>qu</i>		<i>qumr</i>		<i>quMr</i>		<i>qumáx</i>		
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	Media	ES	
Método de riego	Surco	5	0,68 a	0,09	1,04 a	0,17	0,96 a	0,19	8,72 a	3,03
	Melga	25	3,50 b	0,40	4,66 b	0,48	5,25 b	0,46	60,62 b	13,95

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.6.6 Láminas brutas optimizadas

La optimización del caudal unitario (qu) y el tiempo de aplicación (tap) a los objetivos del riego a través módulo “*Operations Analysis*” del modelo matemático WinSRFR 4.1.3 (Bautista, 2014) generó una lámina bruta optimizada. La Tabla 64 del anexo detalla la lámina bruta optimizada de manejo potencial ($dbopt$) y la lámina bruta optimizada razonable al método de riego ($dboptr$) para cada caso bajo estudio.

El valor de $dbopt$ obtenida en promedio para el ciclo del cultivo de cebolla fue 45 mm, y el de $dboptr$ fue 56 mm. La Tabla 39 detalla los resultados obtenidos para db , $dbopt$ y $dboptr$ según etapas de cultivo y estación del año. Se encontraron diferencias significativas entre E_1 y E_3 y para la estación primavera con respecto a la estación verano. De este análisis se concluye que la lámina bruta optimizada es de 40 a 50 mm para las primeras dos etapas de cultivo o la estación primavera y de 60 a 70 mm para para la tercera etapa de cultivo o estación verano.

Tabla 39. Valores medios y error estándar (ES) para lámina bruta aplicada (db), lámina bruta optimizada de manejo potencial ($dbopt$) y lámina bruta optimizada razonable al método de riego ($dboptr$) según etapa de cultivo y estación del año.

Variables	n	db		$dbopt$		$dboptr$	
		Media	ES	Media	ES	Media	ES
E_1	11	78 a	11	42 a	6	56 a	3
E_2	10	81 a	12	48 ab	7	54 a	5
E_3	9	104 a	12	70 b	13	70 a	13
Primavera	20	81 a	8	45 a	21	56 a	14
Verano	10	100 a	12	67 b	37	68 a	37
Media	30	87	7	45	21	56	14

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

4.6.7 Incrementos absolutos y relativos de eficiencia alcanzados mediante los escenarios de optimización.

Los valores medios de EAP , EAP_m y EAP_M fueron 30%, 42% y 43% respectivamente, calificando estos valores de eficiencia de aplicación como “malos” para métodos de riego por superficie. Se registró un incremento absoluto cercano al 10% y en términos relativos del 40%, a partir de los escenarios de optimización. Si bien el incremento de eficiencia alcanzado en E_3 fue del 18% con diferencias significativas con E_1 y E_2 , en términos relativos se destaca el incremento de eficiencia obtenidos E_1 , que fue entre 70 y 140% (Tabla 40 y Tabla 41). Esto se debe a la baja ET_c del cultivo al inicio de su desarrollo y al ajuste del momento de riego y de la lámina de reposición, debido que se trata de una etapa en la que en general se regó con altos valores de humedad de suelo.

Tabla 40. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación (EAP), Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m), y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia para las distintas etapas de cultivo.

EFICIENCIA DE APLICACIÓN (%)								
Variables	N	EAP		EAP _m		Δ absoluta		Δ relativa
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	Media
E ₁	11	10 a	2	17 a	5	7 a	2	70
E ₂	10	34 b	7	44 b	6	10 a	2	29
E ₃	9	51 c	5	69 c	6	18 b	3	35
Primavera	20	18 a	3	28 a	4	9 a	2	50
Verano	10	54 b	6	71 b	6	17 b	3	31
	30	30	4	42	4	12	2	40

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 41. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación (EAP), Eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP_M), y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia de aplicación para las distintas etapas de cultivo.

EFICIENCIA DE APLICACIÓN (%)								
Variables	N	EAP		EAP _M		Δ absoluta		Δ relativa
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	Media
E ₁	11	10 a	2	24 a	5	14 a	4	140
E ₂	10	34 b	7	44 b	6	10 a	4	29
E ₃	9	51 c	5	66 c	6	15 a	4	29
Primavera	20	18 a	3	31 a	4	13 a	4	72
Verano	10	54 b	6	67 b	6	13 a	3	24
	30	30	4	43	4	13	2	43

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Por su parte, los valores medios de EAP_r, EAP_{mr} y EAP_{Mr} fueron 46%, 62% y 72% respectivamente, calificando la primera como “mala” y las siguientes como “satisfactorias” para métodos de riego por superficie. El incremento absoluto de eficiencia de aplicación obtenido con la mejora posible para el mismo día del riego fue del 16% y si consideramos un manejo potencial el incremento es del 26%. En términos relativos, el incremento medio de eficiencia fue del 50%. El incremento absoluto de eficiencia logrado a través de la optimización para el día del riego no mostró diferencias entre etapas de cultivo o estación del año. Con respecto a lo logrado bajo condiciones potenciales de manejo, los incrementos absolutos en E₁ son superiores a los obtenidos en E₂ y E₃, con diferencias significativas. También se destacan los incrementos relativos de eficiencia en la primera etapa del cultivo (E₁), con valores entre 50 y 130% (Tabla 42 y Tabla 43).

Estudios realizados en la provincia de Mendoza (Morábito, 2003; Schilardi, 2010; González *et al.*, 2017) coinciden en que los métodos de riego por gravedad tienen un potencial de optimización de un 20 al 25% respecto a la eficiencia de aplicación (manteniendo una adecuada uniformidad de distribución) a través del ajuste del caudal y tiempo de riego.

Tabla 42. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r), Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego bajo un manejo razonable (EAP_{mr}) y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia de aplicación.

EFICIENCIA DE APLICACIÓN (%)								
Variables	n	EAP _r		EAP _{mr}		Δ absoluta		Δ relativa
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	Media
E ₁	11	33 a	4	52 a	6	19 a	3	58
E ₂	10	56 b	7	67 ab	6	11 a	4	20
E ₃	9	51 b	5	69 b	7	18 a	3	35
Primavera	20	41 a	4	58 a	4	17 a	3	41
Verano	10	56 b	7	71 a	6	15 a	4	27
	30	46	4	62	4	16	2	53

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 43. Valores medios y error estándar referidos a Eficiencia de aplicación razonable (EAP_r), Eficiencia de aplicación potencial de manejo razonable (EAP_{Mr}) y variación absoluta (Δ absoluta) y relativa (Δ relativa) de eficiencia.

EFICIENCIA DE APLICACIÓN (%)								
Variables	n	EAP _r		EAP _{Mr}		Δ absoluta		Δ relativa
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	Media
E ₁	11	33 a	4	77 a	4	44 b	5	133
E ₂	10	56 b	7	72 a	4	17 a	6	30
E ₃	9	51 b	5	66 a	7	15 a	6	29
Primavera	20	41 a	4	75 a	3	34 b	4	83
Verano	10	56 b	7	68 a	7	12 a	6	21
	30	46	4	72	3	26	4	57

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

En ambos casos, los incrementos de eficiencia indican que se puede obtener una mejora de la eficiencia de aplicación a través de prácticas de manejo a campo modificando el caudal unitario (*qu*) a través del frente de riego (*fr*) y el tiempo de aplicación (*tap*). Por otro lado, bajo condiciones de manejo óptimas se podría lograr aún un mejor desempeño. Esto incluye, en

algunos casos, disponer de mayores caudales en compuerta (Q_c) (ingresando en turnados de riego, por ejemplo) o modificar el momento u oportunidad de riego.

Si analizamos incrementos de eficiencia logrados a lo largo del cultivo, los valores más altos se registran en E_1 o en su defecto en la estación primavera. Como el periodo comprendido en cada etapa de cultivo asignada en este trabajo contiene un número similar de eventos de riego sobre el total que recibe el cultivo cada campaña, también sería E_1 o la estación primavera el periodo con mayor potencial para el ahorro de agua de riego. Sin embargo, este periodo de cultivo contempla volúmenes de agua utilizados beneficiosamente y racionalmente: el mantenimiento de la humedad del suelo durante el primer mes luego de la siembra tiene como objetivo la germinación, emergencia y establecimiento del cultivo, además de prevenir la acumulación de sales en el suelo, ya que se trata una etapa crítica para obtener un buen stand de plantas y una buena cosecha. Entonces, si se mantuviese el manejo en E_1 y la mejora del riego se hiciese sólo sobre E_2 y E_3 , se alcanzaría un valor medio para este indicador de alrededor de 60%.

4.6.8 Hectáreas de concesión necesarias por hectárea de cebolla bajo distintos escenarios de manejo del agua.

Según los escenarios de manejo del agua de riego planteados a partir de los resultados obtenidos, para el escenario 1 se requieren 8,5 hectáreas de concesión de agua por hectárea de cebolla, para el escenario 2 se necesitan 5,5 hectáreas y para el escenario 3 se requieren 4,4 hectáreas (Tabla 44).

Tabla 44. Hectáreas de concesión o dotación necesarias por hectárea de cebolla bajo distintos escenarios de eficiencia.

	Escenarios de manejo del agua					
	1		2		3	
	EAP	ECI	EAP	ECI	EAP	ECI
Indicador %	46	79	62	85	72	92
Dotación en compuerta del campo ($L.s^{-1}.ha^{-1}$)	0,28		0,28		0,28	
Hectárea de concesión/hectárea de cebolla	8		5,5		4,4	

Los resultados obtenidos demuestran la influencia que tiene el manejo del riego en la superficie factible de regar de cebolla, con reducciones del 31 al 45% de la concesión de agua por hectárea de cebolla cultivada con mejoras en el manejo del agua de riego. Bajo la actual crisis hídrica que atraviesa el valle y la reducción año tras año de la superficie bajo riego, la mejora en el manejo del agua es la manera que tiene el productor de cebolla para continuar sembrando y regando adecuadamente una superficie determinada de cultivo. Además, teniendo en cuenta que la cebolla posee altos costos de producción y una rentabilidad generalmente incierta; que los sistemas de riego presurizados poseen un costo alto de inversión y la energía se encuentra en escenarios de suba y que los métodos de riego por superficie pueden alcanzar altos valores de eficiencias parcelarias con poca o ninguna inversión, resulta lógico optimizar el manejo de los sistemas tradicionales de riego por superficie que actualmente se utilizan en el valle.

4.7 Oportunidad de riego

La oportunidad del riego determina en parte, la lámina de agua que deberá ser cubierta mediante el riego y finalmente la eficiencia de aplicación. Aquellos casos que regaron antes de alcanzar el umbral óptimo, la eficiencia de aplicación aumentó al corregir la oportunidad del riego. Así es el caso de la evaluación N°3 que duplicó su desempeño en términos de eficiencia de aplicación razonable, al corregir la oportunidad (debido a que regó con valores altos de humedad de suelo). Casos similares son la evaluación N°4, que la EAP_r pasó de 20% a 71% y la evaluación N°14 que al corregir la oportunidad del riego alcanzó el 100% de EAP_r . También hubo casos en que la eficiencia de aplicación disminuyó al corregir la oportunidad de riego. Se trata de aquellos que regaron superado el umbral óptimo. Por ejemplo, en la evaluación de riego 21, al ajustar la lámina de reposición la eficiencia de aplicación pasó de 98% a 60% y en la evaluación 24 de 57% a 25%.

La fracción de agua consumida (fc) según los registros a campo promedio para el total de casos bajo estudio, fue 0,39. Por su parte, el factor de agotamiento calculado según FAO (Allen, 2000) es 0,34, y según Noreno (1976, mencionado por Grassi 1998) 0,44. Se destaca de este último la consideración en su cálculo de la textura del suelo, a través del coeficiente hidrodinámico (s). Los suelos del valle bonaerense del río Colorado presentan una gran variación en la textura (Whinchel, 2017), siendo relevante su consideración en este estudio. La Tabla 69 del anexo detalla, para cada evaluación de riego y según los registros de campo, el valor fc registrado a campo y p calculado por ambas ecuaciones.

El valor de fc registrado a campo para E_1 es menor que para E_2 y E_3 , y para la estación primavera con respecto a verano, con diferencias significativas. Lo inverso sucede al analizar los valores de p según etapas de cultivo y estación del año (Tabla 45).

Tabla 45. Factor de agotamiento (p) y fracción de agua consumida (fc) según etapa de cultivo y estación.

Variables	n	fc		p FAO		p Grassi		
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	
Etapa de cultivo	E_1	11	0,29 a	0,05	0,44 b	0,01	0,51 b	0,01
	E_2	10	0,43 ab	0,06	0,28 a	0,01	0,41 a	0,01
	E_3	9	0,47 b	0,06	0,27 a	0,01	0,40 a	0,01
Estación	Primavera	20	0,34 a	0,04	0,37 b	0,02	0,47 b	0,01
	Verano	10	0,50 b	0,06	0,27 a	0,02	0,40 a	0,01
Media		30	0,39	0,03	0,34	0,09	0,44	0,06

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

No se encontraron diferencias para fc según el sistema de entrega de agua, con turnos (ct) respecto a sin turnos (st) dentro de las estaciones primavera (P) y verano (V) y para las etapas de cultivo. Por lo tanto, podemos inferir que el sistema de entrega aparentemente no estaría explicando de manera significativa la oportunidad del riego del cultivo de cebolla en el valle (Tabla 46 y Tabla 47).

Tabla 46. Valores medios y error estándar (ES) para la fracción de agua consumida (fc) según la entrega de agua sea con turnos (ct) o sin turnos (st) para las estaciones primavera y verano.

Estación	Entrega de agua	fracción de agua consumida (fc)		
		n	Media	ES
Primavera	ct	9	0,29 a	0,06
	st	11	0,37 a	0,05
Verano	ct	4	0,49 a	0,08
	st	6	0,50 a	0,09

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 47. Valores medios y error estándar (ES) para la fracción de agua consumida (fc) según la entrega de agua sea con turnos (ct) o sin turnos (st) para las etapas de cultivo.

Etapa de cultivo	Entrega de agua	fracción de agua consumida (fc)		
		n	Media	ES
E ₁	ct	7	0,26 a	0,06
	st	4	0,33 a	0,07
E ₂	ct	2	0,42 a	0,16
	st	8	0,43 a	0,08
E ₃	ct	6	0,49 a	0,07
	st	3	0,43 a	0,10

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Si observamos la Figura 62, vemos que, el cultivo de cebolla durante E₁ se riega antes del umbral indicado por las ecuaciones propuestas por FAO y Grassi, ya que, durante E₁, el p calculado por las ecuaciones mencionadas se encuentra por encima de la fracción de agua consumida (fc) registrada a campo. Los valores de p que sugiere la bibliografía, son altos en E₁ debido a la baja ETC en esta primera fase de desarrollo, pero no consideran la particularidad de los cultivos anuales de semilla y las condiciones locales, en las que el agua ocupa otros usos racionales. Así, en la zona bajo estudio es común que, durante E₁ y en especial durante el primer mes luego de la siembra, el suelo se mantenga con niveles altos de humedad. Con esta práctica se busca favorecer la germinación y emergencia; aumentar la uniformidad del stand de plantas; reducir la voladura de suelo y pérdida de plantas en lotes arenosos por los fuertes vientos de primavera; reducir el encostramiento superficial en lotes con alto contenido de arcillas, y, por último, evitar el aumento de la concentración salina del suelo. Por otro lado, la zona y en particular el ciclo bajo estudio, se caracterizó por abundantes lluvias primaverales y no se suele suspender el riego de un lote de cebolla dentro de la “vuelta” con el agua en un establecimiento si la lluvia no es de gran milimetrage.

Durante E₂, varios casos bajo estudio regaron posterior al umbral óptimo, en especial si comparamos los registros a campo con el p calculado según FAO. Durante esta etapa la ETC

del cultivo se encuentra en pleno aumento, alcanzando su pico más alto al final de la etapa. Durante este periodo la tensión por el recurso en el valle es alta, lo que puede explicar en parte esta tendencia que continua hasta la mitad de la última etapa de desarrollo del cultivo (E_3). Luego, los registros a campo muestran una coincidencia alta con el factor de agotamiento (p) según Grassi, mientras siguen siendo posteriores al umbral óptimo si tenemos en cuenta el p que propone FAO. Es común en la zona un manejo más prudente del agua durante el final del cultivo, evitando los periodos prolongados de contacto del agua con el cuello de la planta, con el objetivo de reducir las condiciones predisponentes para la pudrición del bulbo por bacteriosis, enfermedad que afecta gravemente a los productores de cebolla durante los últimos años. Alcanzado el desarrollo del bulbo y aproximadamente 15 a 20 días antes de la cosecha, también es común suspender los riegos para que el cultivo vuelque su follaje por el quibre del cuello. El vuelco del follaje se conoce comúnmente como “plantas entregadas” y da inicio a las tareas de cosecha.

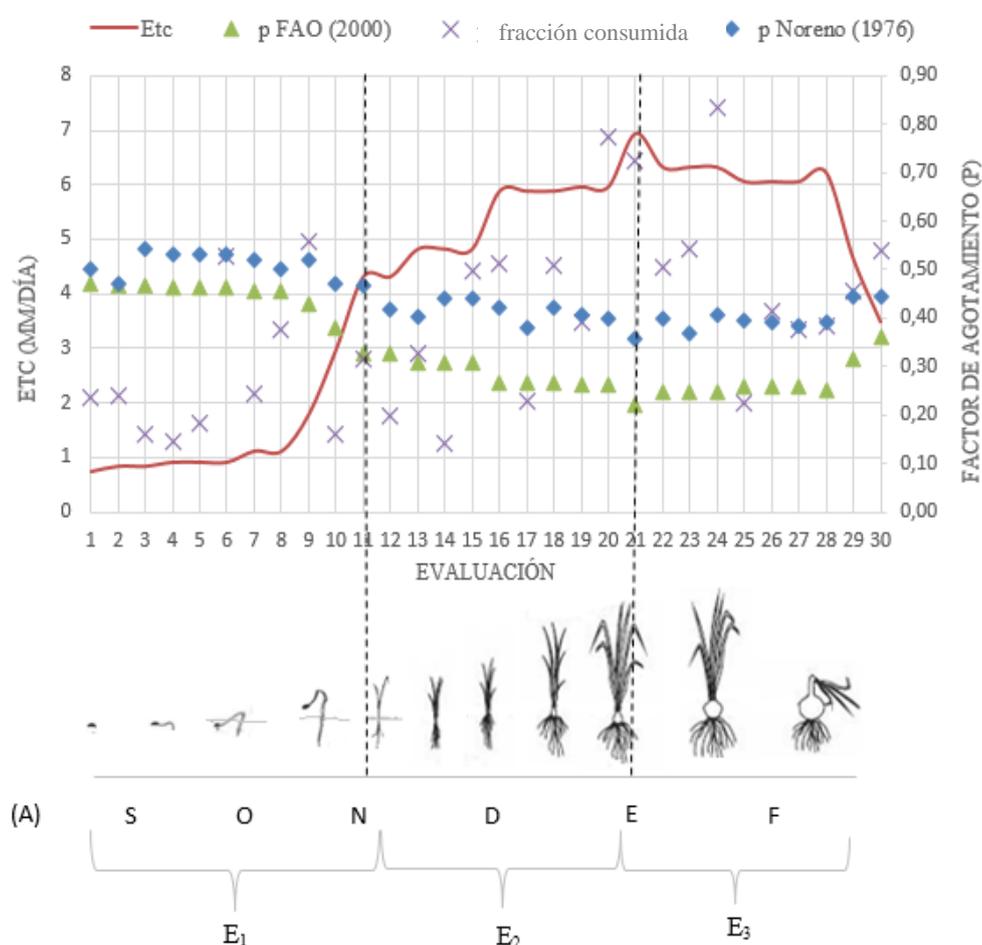


Figura 62. fracción de agua consumida (f_c), factor de agotamiento (p) según FAO (Allen, 2000) y según Noreno (1976) mencionado por Grassi (1998) y evapotranspiración del cultivo (ETC) durante el desarrollo del cultivo.

Si bien, el manejo del agua durante el ciclo del cultivo de cebolla en el valle es propia de un manejo razonable, al tratarse de un cultivo altamente sensible al déficit de agua y ante escenarios de crisis hídrica, es recomendable trabajar en su ajuste. Varios trabajos ya han demostrado que en la etapa de bulbificación, el agua juega un factor crítico para el rendimiento del cultivo, por lo que es recomendable ajustar la oportunidad del riego durante esa fase de desarrollo, en el periodo que va desde comienzo de diciembre a mitad de enero.

Si analizamos en términos generales la oportunidad de riego, aproximadamente un 30% del total de casos bajo estudio regó habiendo aún altos valores de humedad disponible en el suelo, en especial durante la primera etapa de cultivo (E_1); otro 20% regó superado el umbral de riego, con el cultivo en estado avanzado de desarrollo y con posibilidades de perjudicar el rendimiento. El 50% restante regó cercano al momento óptimo. Cabe mencionar que las precipitaciones en la campaña 2015 - 2016, fueron superiores a la media en noviembre, diciembre, enero y febrero. Pese a esto, a excepción del mes de noviembre, los resultados no indican humedad en exceso en los meses siguientes, indicando un manejo con criterio del agua de riego frente a eventos importantes de lluvias. Por otro lado, como la oportunidad del riego depende tanto de variables de manejo como de sistema, muchas veces es difícil de ser modificada.

4.7.1 Lámina de reposición óptima y frecuencia de riego.

La lámina de reposición óptima ($dropt$) promedio para el total de casos bajo estudio y etapas de cultivo, en la profundidad de suelo explorado por las raíces fue 15 mm si consideramos el p de FAO (Allen, 2000), y 25 mm si consideramos la ecuación propuesta por Noreno (1976) para el cálculo de p . En ambos casos, el valor de $dropt$ aumenta a medida que avanzan las etapas de cultivo o estación del año, con diferencias significativas. Si analizamos el valor medio de $dropt_{0-50}$ se obtiene un valor promedio de 31 mm según FAO y 41 mm según Noreno (1976). No se registran diferencias en $dropt_{0-50}$ estimada con el p calculado por Grassi y se registra un valor más alto de $dropt_{0-50}$ en E_1 , si se utiliza el p propuesto por FAO. Esto se debe a que, a igual profundidad objetivo para todo el ciclo, la evapotranspiración es menor al comienzo del cultivo y las ecuaciones permiten láminas mayores de reposición (Tabla 48). La Tabla 70 del anexo detalla la lámina de reposición según el análisis expuesto, para cada caso bajo estudio.

Tabla 48. Valores medios y error estándar (ES) para la lámina de reposición óptima ($dropt$)

Variables	n	$dropt$				$dropt_{0-50}$				
		"p" FAO		"p" Noreno		"p" FAO		"p" Noreno		
		Media	ES	Media	ES	Media	ES	Media	ES	
Etapa de cultivo	E_1	11	8 a	1	14 a	2	38 b	2	43 a	3
	E_2	10	12 b	1	24 b	2	26 a	3	38 a	3
	E_3	9	28 c	3	41 c	2	28 a	3	41 a	3
Estación	Primavera	20	10 a	1	18 a	2	32 a	2	41 a	2
	Verano	10	27 b	3	39 b	2	27 a	3	41 a	2
Media		30	15	2	25	13	31	2	41	2

según la profundidad objetivo definida en cada etapa de cultivo y $dropt_{0-50}$ calculadas a través del factor de agotamiento (p) según FAO y según Noreno, para cada etapa de cultivo y estación del año. Valores expresados en mm.

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Considerando el desarrollo radicular en cada etapa de cultivo como profundidad objetivo del riego, el agua útil allí almacenable y el factor de agotamiento (p) calculado según la ecuación de Noreno, mencionado por Grassi, la frecuencia de riego (Fr) óptima para el cultivo de cebolla en el valle, es de 11 días en E_1 , 5 días en E_2 y 7 días en E_3 . Las láminas de reposición óptimas y frecuencia de riego (Fr) obtenidas con dicha ecuación, parecen acordes al método de riego

por superficie y al sistema de distribución de agua en la zona. Los resultados obtenidos con la ecuación propuesta por FAO son factibles de implementar en sistemas de riego de alta frecuencia, como goteo o aspersión (Tabla 49).

Tabla 49. Frecuencia de riego (Fr) óptima para cada etapa de cultivo.

Variables		n	Fr óptimo (días)	
			Grassi	FAO
Etapa de cultivo	E ₁	11	11	6
	E ₂	10	5	2
	E ₃	9	7	5

4.8 Principales inconvenientes encontrados en el manejo del agua de riego

En la tabla Tabla 71 del anexo se indica para cada caso bajo estudio los principales puntos que se aconsejan mejorar o modificar para un adecuado manejo del agua por gravedad en el cultivo de cebolla en el VBRC.

Un tercio de los casos bajo estudio sufrió pérdidas significativas de agua por conducción dentro del campo. Esto, en general se debe a falta de mantenimiento de las acequias, altas tasas de infiltración del suelo o distancias muy largas que recorre el agua hasta el lote.

Uno de los principales problemas detectados en el riego por gravedad del cultivo en el valle, fue el exceso de agua percolada con impacto directo en la eficiencia de aplicación en el 50% de los casos bajo estudio. Esto fue debido principalmente al exceso en el tiempo de aplicación (tap) o menor caudal unitario (qu) que el recomendado.

Con respecto a la uniformidad de riego, un tercio de los casos obtuvo bajos valores de eficiencia de distribución, con partes iguales entre quienes sufrieron percolación en cabecera con respecto a los tuvieron alta percolación al pie. Fundamentalmente debido a un manejo no racional de los caudales unitarios (qu) y tiempo de aplicación (tap).

Con respecto a la oportunidad del riego, la mitad de los casos bajo estudio, mostró un momento de riego factible de ser ajustado si consideramos los valores del factor de agotamiento (p). De esos casos, el 65% coinciden con la primera etapa de cultivo y regaron habiendo aún altos valores de humedad disponible en el suelo; el 35 % restante regó superado el umbral de riego, con el cultivo en estado avanzado de desarrollo y con posibilidades de perjudicar el rendimiento. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, el manejo del agua en exceso durante E₁ tiene como objetivo el éxito en el establecimiento del cultivo.

4.9 Requerimientos de lixiviación de sales del suelo

La altura de agua necesaria para lixiviar las sales del suelo por ciclo de cultivo de cebolla y promedio para los casos bajo estudio según Van der Molen (1983) es de 458 mm (con un valor

mínimo de 206 y un máximo de 884 mm) y según Rhoades (1992) es de 214 mm (con un valor mínimo de 133 y un máximo de 305 mm), como detalla la Tabla 50.

Si bien, en ambos casos se considera la eficiencia de lavado (f), propuesta por Van der Molen, la ecuación propuesta por este autor realiza un balance integral para un periodo de tiempo específico o ciclo de cultivo, al incorporar en su ecuación la evapotranspiración (ETc) y precipitación (PP) y la eficiencia de lavado (f). La Tabla 72 del anexo, detalla el valor de $dper$ por ciclo calculado por ambas ecuaciones y para cada caso bajo estudio.

Tabla 50. Valor medio y error estándar (ES) referido a lámina de percolación ($dper$) o altura de agua necesaria para lixiviar las sales disueltas por ciclo de cultivo de cebolla según las ecuaciones de Van der Molen (1983) y Rhoades (1992).

$dper$ (mm) para el ciclo de cultivo			
Rhoades		Van der Molen	
Media	EE	Media	EE
214	6,59	458	24,14

Si analizamos el requerimiento de lixiviación por etapa de cultivo, siguiendo la ecuación de Van der Molen (1983), es decir, para cada caso bajo estudio se calcula un requerimiento de lixiviación por etapa de cultivo (Tabla 72 del anexo) el requerimiento de lixiviación para E_1 es significativamente bajo con respecto a las siguientes etapas de cultivo, como se observa en la Tabla 51. Esto se debe a las importantes lluvias primaverales que comúnmente ocurren en la zona y a las bajas tasas de evapotranspiración del cultivo en su primera fase de desarrollo. Lo contrario sucede para E_2 y E_3 , periodos de menores precipitaciones y alta evapotranspiración.

Sin embargo, los primeros estadios de desarrollo del cultivo de cebolla son más sensibles a la salinidad, por lo que se recomienda durante este periodo y todo el ciclo del cultivo, prevenir posibles aumentos de la concentración salina del suelo (en especial en años de bajas precipitaciones) un monitoreo anual de la salinidad de los suelos y mantener y operar adecuadamente los drenes parcelarios para evacuar las sales. Esto cobra aún más relevancia en años con valores de salinidad del agua superiores a los registrados en la campaña bajo estudio.

Tabla 51. Valor medio y error estándar (ES) para el requerimiento de lixiviación como lámina de percolación ($dper$) necesaria por etapa de cultivo según Van der Molen.

Requerimientos de lixiviación (mm)					
E₁		E₂		E₃	
Media	ES	Media	ES	Media	ES
9	17	203	18	238	19

4.9.1. Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs)

La EAPs promedio para según lámina requerida para lixiviar sales propuesta por Van Der Molen (1983) es 69% y según Rhoades (1992) 52% (Tabla 52). Estos valores representan la eficiencia de aplicación máxima que permitiría mantener un adecuado balance salino en la rizósfera del cultivo, según los fines productivos. La tabla Tabla 73 del anexo, detalla el valor de EAPs para un análisis del ciclo de cultivo según cada caso bajo estudio y ambas ecuaciones de cálculo de fracciones de lavado *dper*.

Tabla 52. Valor medio y error estándar (ES) referido a eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs) promedio para el total de casos bajo estudio, para *dper* calculada por Rhoades y Van der Molen.

EAPs			
Rhoades		Van der Molen	
Media	EE	Media	EE
69	0,66	52	1,3

Si a cada caso bajo estudio, le asignamos un valor de EAPs por etapa de cultivo según la *dper* calculada por Van der Molen (1983), vemos que el valor más alto corresponde a E₁, seguido por E₃ y E₂ (Tabla 53). Estas diferencias se deben a la precipitación y ETC del cultivo en cada periodo. La Tabla 73 del anexo, detalla los tres valores de EAPs para cada caso bajo estudio según etapa de cultivo.

Tabla 53. Valores medios y error estándar (ES) referidos a Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs) según Van der Molen para cada etapa de cultivo.

Variables		n	EAPs (%)	
			Media	ES
Etapa de cultivo	E ₁	11	76 b	7,58
	E ₂	10	52 a	1,37
	E ₃	9	55 a	1,74
Promedio		30	61	2,83

Medias que compartan alguna letra no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Según los valores de EAPs inferimos que, en E₂ y E₃ eficiencias de aplicación por encima de 55% podrían poner en peligro la productividad máxima del cultivo debido a la acumulación de sales en el suelo. De todas formas, el requerimiento de lavado y estos límites de eficiencia para no generar una acumulación de sales en el suelo y disminuir el rendimiento de cultivo merecen un estudio puntual y un desarrollo más profundo de la temática.

4.10 Análisis del desempeño considerando usos benéficos y racionales.

La eficiencia de riego parcelaria (IE) media para el cultivo de cebolla en el VBRC es 55%. Esta incluye el agua de riego usada beneficiosamente para lixiviar sales según la metodología propuesta por Burt (1997), aplicada al cultivo de cebolla en el valle.

Por su parte, el índice de sagacidad (IS), agrega a los componentes anteriores el porcentaje de agua aplicada que es utilizada racionalmente en E₁ para la germinación de semillas, emergencia y establecimiento del cultivo. De esta manera, el IS promedio para el cultivo de cebolla en el valle es de 70% (Tabla 54).

Tabla 54. Porcentaje del agua aplicada durante el ciclo del cultivo, discriminada por diferentes usos y eficiencia de riego parcelario (IE) e índice de sagacidad del riego (IS).

Parámetro (%)	Porcentaje del agua de riego aplicada en el ciclo del cultivo	
	Media	ES
Agua evapotranspirada	30	2
Remoción de sales (Van der Molen)	24,6	0,01
Agua cosechada en tejidos	0,2	----
Eficiencia de aplicación parcelaria (IE)	54,8	1
Agua para la germinación**	15	----
Índice de sagacidad del riego (IS)	70	----

**agua aplicada para la germinación y emergencia, prevención del encostramiento superficial y/o reducción de la voladura de suelo y daño de plántulas.

Por otro lado, la

Tabla 55 detalla, para cada etapa de cultivo, el porcentaje de agua aplicada, discriminada por diferentes usos, el valor de eficiencia de riego parcelario y el índice de sagacidad del riego. Como detallan los resultados, La IE mostró valores mayores al 70% E₂ y E₃ debido al porcentaje de agua aplicada que beneficiosamente se encarga de lixiviar sales del suelo en ese periodo. Al considerar el porcentaje de agua destinada en los primeros riegos del cultivo, a la germinación y emergencia de plántulas, prevención del encostramiento superficial y/o reducción de la voladura de suelo y daño de plántulas, el valor de IS es mayor al 50% en E₁.

Tabla 55. Porcentaje del agua aplicada en cada etapa de cultivo, discriminada por diferentes usos y eficiencia de riego parcelario (IE) e índice de sagacidad del riego (IS).

Parámetro (%)	Porcentaje del agua de riego aplicada por etapa de cultivo					
	E ₁		E ₂		E ₃	
	Media	ES	Media	ES	Media	ES

Agua evapotranspirada	10	2	34	2	51	2
Remoción de sales (Van der Molen)	2	0,01	39	0,01	31	0,01
Agua cosechada en tejidos	0,2	----	0,2	----	0,2	----
Eficiencia de aplicación parcelaria (IE)	12	1	73	4	82	3
Agua para la germinación	42	----	----	----	----	----
Índice de sagacidad del riego (IS)	54	----	73	----	82	----

Teniendo en cuenta que el VBRC se encuentra en una zona semiárida, con escenarios de escasas hídrica y salinidad creciente; que la cebolla en el valle se establece de semilla en grandes superficies y que los primeros riegos tienen por objetivo el establecimiento con éxito del cultivo, la eficiencia de riego parcelaria (IE) y el Índice de Sagacidad (IS) permiten una valoración más real del uso del agua a nivel de proyecto de riego o cuenca y enriquecen el análisis del uso del agua en el cultivo de cebolla, desde una mirada más moderna e integral. A su vez, fracciones de agua que comúnmente se consideran pérdidas (conducción, percolación profunda etc) son contribuciones al sistema hidrológico y/o forman parte del proceso productivo, siendo muchas veces re – usadas con otros fines.

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES.

Del trabajo realizado y de los resultados obtenidos se concluye que:

- La eficiencia de aplicación promedio para el riego de cebolla en el VBRC es menor al 50%.
- La eficiencia de aplicación aumenta a medida que avanzan las etapas de cultivo o estación del año. Este aumento guarda relación con la evapotranspiración del cultivo o lámina consumida (*dc*) y no con la lámina bruta aplicada (*db*). Esto indica que la programación del riego se realiza por frecuencia y no por lámina de reposición calculada y lámina aplicada.
- Si bien la lámina bruta aplicada promedio resulta razonable para métodos de riego por superficie, uno de los principales problemas detectados fue el exceso de agua percolada, con impacto directo en la eficiencia de aplicación. Esto, debido al exceso en el tiempo de aplicación (*tap*) o al manejo de un caudal unitario (*qu*) menor al óptimo.
- Si bien la eficiencia de conducción interna promedio fue 85%, existen casos con pérdidas de agua significativas en conducción dentro del campo (mayores al 20%), que demanda de su corrección para un mejor aprovechamiento del agua en tiempos de crisis hídrica.
- La uniformidad de riego por superficie de cebolla en el valle es “satisfactoria”, aspecto de gran importancia para los cultivos hortícolas. Sin embargo, existen casos con baja uniformidad de riego, lo cual podría mejorarse en gran medida a través del caudal unitario (*qu*) y tiempo de aplicación (*tap*).
- Durante la primera etapa el cultivo de cebolla se riega con valores altos de humedad, desde una perspectiva de balance hídrico. Sin embargo, en dicho periodo el mantenimiento de la humedad en los primeros centímetros de suelo tiene otros fines que deben ser considerados para una valoración más real del uso del agua. De esta manera se sugiere trabajar también con esmero en la optimización del riego en E₂ y E₃.
- La eficiencia de riego actual a nivel parcela para el cultivo de cebolla en el valle se incrementa, alcanzando valores promedios del 55 % si se considera beneficiosa la fracción de agua sobre aplicada que garantice un adecuado balance salino y el máximo desarrollo del cultivo hortícola y 70% si además se contempla como agua racionalmente utilizada la destinada, al inicio del cultivo, a favorecer la germinación y el establecimiento de las plántulas.
- En función de la eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs), valores de eficiencia de aplicación por encima del 60%, podrían provocar la acumulación de sales en el suelo y disminuir la productividad del cultivo. Se recomienda realizar estudios que profundicen esta temática, fundamental para la sostenibilidad del sistema.
- Es posible optimizar el desempeño del riego de cebolla a través de las variables de manejo a campo, como caudal unitario (*qu*) y tiempo de aplicación (*tap*). De esta manera la eficiencia de aplicación promedio podría alcanzar un valor de 62% durante el mismo día del riego a través de la reducción del frente de riego (*fr*). Estas variables de manejo resultan de gran importancia para la reducción de la percolación profunda durante el riego por

superficie de cebolla en el valle, ya que son factibles de ajustar sin una inversión en el método de riego.

- Si además se ajustara la oportunidad del riego y el caudal de manejo (mediante el turando, por ejemplo), sería posible alcanzar un valor de eficiencia de aplicación promedio para el riego del cultivo en la zona del 72%, manteniendo la uniformidad del riego por encima del 80%.
- De esta manera, según los escenarios de optimización obtenidos con el modelo de simulación hidráulica para las condiciones del día del riego, es posible una mejora de la eficiencia de aplicación en términos absolutos de 16% y bajo un manejo potencial del método, el incremento sería del 26%.
- Llevando a cabo las mejoras propuestas en este trabajo, la relación hectáreas de concesión por hectárea de cebolla cultivada podría reducirse entre un 31 y 45%.

RECOMENDACIONES

6. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos se presentan las siguientes recomendaciones para el mejor aprovechamiento del agua de riego en el cultivo de cebolla:

- Mantener limpias las acequias, reducir la distancia que debe recorrer el agua dentro del establecimiento y analizar técnica y económicamente la posibilidad de revestir el tramo de conducción con materiales plásticos o conducir el agua mediante mangas de polietileno. De esta manera, no sólo se lleva a cero las pérdidas por infiltración, sino que se reduce significativamente el tiempo destinado a la conducción de agua dentro del establecimiento, de gran importancia cuando se quiere aprovechar el turno de riego.
- Reducir el frente de riego, es decir, repartir el agua en pocos surcos o melgas a la vez asegurando una adecuada distribución del agua infiltrada a largo de la unidad de riego. Esta práctica aumenta el caudal unitario y reduce el tiempo de aplicación disminuyendo de manera consecuente las pérdidas por percolación profunda. Si bien, esto demanda de maniobras de cambios de agua más frecuentes por parte del operario del riego, en general se obtiene un mejor desempeño.
- Si existe un problema de uniformidad del riego debido a percolación en cabecera, se recomienda disminuir los tiempos de avance del agua aumentando el caudal unitario. Para aquellos casos con excesos de percolación al pie, en general se recomienda reducir el tiempo de aplicación.
- En términos generales, se sugiere caudales del orden de 4 a 5 L s⁻¹ m⁻¹ para melgas y de 1 L s⁻¹ m⁻¹ para surcos (lo que equivale en este caso a 0,8 L s⁻¹ surco⁻¹). Para conocer esta variable, el productor podrá emplear el instrumental de aforo de sifones elaborado a partir de los datos obtenidos del ensayo volumétrico realizado en este trabajo, compuesto por una tabla de caudales en función del diámetro del sifón y la carga hidráulica, que se determina durante el riego a través de una manguera de nivel. Cabe mencionar que estas son sólo referencias generales y cada caso demanda un estudio específico.
- Evaluar la conveniencia del ingreso en un turno de riego, en aquellos casos que el aumento del caudal unitario mejore el desempeño, pero se encuentren limitados por la concesión que posee el establecimiento
- Prestar especial atención el momento de riego de diciembre a mediados de enero, periodo en el cual el cultivo desarrolla el bulbo y el estrés hídrico por falta de agua reduce significativamente su rendimiento. Para esto se sugiere el monitoreo de la humedad del suelo, fundamentalmente en los primeros 30 a 40 cm, donde se encuentra el mayor porcentaje de raíces.
- Aplicar fracciones de lavado durante todo el ciclo del cultivo para prevenir posibles aumentos de la concentración salina del suelo, un monitoreo anual de la salinidad del suelo y mantener y operar adecuadamente los drenes parcelarios para evacuar las sales. Esto cobra

aún más relevancia en años con bajas precipitaciones y/o valores de salinidad del agua superiores a los registrados en la campaña bajo estudio.

- Prestar atención a posibles cambios en la salinidad del suelo que pongan en peligro la productividad del cultivo, en especial cuando se alcancen altos valores de eficiencia de aplicación en E₂ y E₃.

BLIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA.

- ABREU, T.A.S., A.A. MILLAR, E.N. CHOUDHURY, AND M.M. CHOUDHURY. 1980. Analise da produção de cebola sob diferentes regimes de irrigação. *Pesq. Agrop. Brasil.* 15:233–236.
- AHMAD, M.D., TURRAL, H., MASIH, I., GIORDANO, M. AND MASOOD, Z. 2007. Water saving technologies: Myths and realities revealed in Pakistan`s rice-wheat systems. Research report 108, IWMI, Colombo, Sri Lanka, 44 pp.
- AL-JAMAL MS, SAMMIS TW, BALL S, SMEAL D. 1999. Yield-based, irrigated crop coefficient. *Appl. Eng. Agric.* 15(6): 659-668.
- AL-JAMAL MS, SAMMIS TW, BALL S, SMEAL D. 2000. Computing the crop water production function for onion. *Agric. Water Manage.* 46: 29-41.
- AL-JAMAL, M. S., BALL, S., & SAMMIS, T. W. 2001. Comparison of sprinkler, trickle and furrow irrigation efficiencies for onion production. *Agricultural water management*, 46(3), 253-266.
- ALLEN, R. G. 2000. Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 27-41.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D & SMITH D.M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food & Agriculture Org.
- ALLEN, R.G., WILLARDSON, L. and FREDERIKSEN H. 1997. Water use definitions and their use for assesing the impacts of water conservation. *Proceedings ICID Workshop on sustainable irrigation in areas with scarcity and drought.* Oxford, England, Sep. 11 – 12, pp 77 – 82.
- ALLEN, R.G.; BURT, C.; CLEMMENS, A.J. AND WILLARDSON, L.S. 1996. Water conservation definitions from a hydrologic viewpoint. In: *Proceedings of the North American water and environment congress*, ASCE, Anaheim, CA, (CD-ROM), p 6.
- ANDRADE, F. H., TABOADA, M. A., LEMA, R. D., MACEIRA, N. O., ECHEVERRIA, H. E., POSSE BEAULIEU, G., & GAMUNDI, J. C. 2017. Los desafíos de la agricultura argentina: satisfacer las futuras demandas y reducir el impacto ambiental. Ediciones INTA.
- AQUASTAT. 2014. Global water information system. FAO.
- ARBOLEYA, J. 2005. Crecimiento y fisiología de la cebolla. *Tecnología de producción de cebolla.* Montevideo, UY, INIA, 17-30.
- ASAE, STANDARS. 2000. Evaluation of irrigation furrows. *America Society of Agricultural Engineering EP419.1.USA*, p893 – 898.
- ASCE, STADARS 1978. Describing irrigation efficiency and uniformity. *J. Irrigation And Drainage Engineering*, ASCE, 104(1):35-41.
- AYERS, RS & DW WESCOT. 1987. La calidad del agua en la agricultura. *FAO estudio Riego y Drenaje.* N° 29 Rev.1, Roma, 174pp.
- BAFFONI, P. A., VARELA, P. E., & ZELAYA, C. E. (2012). Estudio preliminar de dos sistemas de riego por gravedad y su efecto sobre el rendimiento y la incidencia de podredumbre blanda en cebolla. *Jornadas de Actualización en Riego y Fertirriego.* 6. 2012 11 07-09, 7, 8 y 9 de noviembre de 2012. Chacras de Coria, Mendoza. AR.
- BANDYOPADHYAY, P. K., MALLICK, S., & RANA, S. K. 2003. Actual evapotranspiration and crop coefficients of onion (*Allium cepa* L.) under varying soil moisture levels in the humid tropics of India. *TROPICAL AGRICULTURE-LONDON THEN TRINIDAD-*,80(2), 83-90.
- BARBERO, A., 2006. Los costos de transacción en la comercialización agropecuaria: un estudio de caso. *Estud. Econ.*, vol.23, n.46, pp. 25-72. ISSN 2525-1295.
- BARBERO, A., LUCANERA, G., & CASTELLANO, A. 2016. Banco de Datos Socioeconómico de la zona de CORFO-Río Colorado. Estimación del Producto Bruto Agropecuario

- Regional. UNS” Publicaciones anuales desde la Campaña, 1986. Base de datos socioeconómicos, departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur.
- BASÁN NICKISCH, M. 2008. Aforadores de corrientes de agua. Manual. INTA. EEA Santiago del Estero.
- BATRA, B.R. AND PANDITA, M.L. 1984. Response of onion to irrigation and nitrogen levels, Haryan J. Hort. Sci. 13 51–61.
- BATTALANI, A. Y LANZONI, L. 1987. Onion irrigation determination of watering volumes and intervals, *Irriazione Drainaggio* 34 11–16.
- BAUMGARTNER, F. 2016. Corfo Río Colorado. Comunicación personal.
- BAUTISTA, E., CLEMMENS, A. J., STRELKOFF, T. S., SCHLEGEL, J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management* 96:1146-1154.
- BAUTISTA, E., SCHLEGEL, J.L., AND STRELKOFF, T.S. 2012. WinSRFR 4.1 - User Manual. USDA-ARS Arid Land Agricultural Research Center. 21881 N. Cardon Lane, Maricopa, AZ, USA.
- BAUTISTA, E.; CLEMMENS, A.; STRELKOFF, T.; NIBLACK M. 2009b. Analysis of surface irrigation with WinSRFR-example application. *Agricultural Water Management* 96 1162–1169.
- BAUTISTA, E.; CLEMMENS, A.; STRELKOFF, T.; SCHLEGEL J. 2009a. Modern analysis of surface irrigation with WinSRFR. *Agricultural Water Management* 96 1146– 1154.
- BAUTISTA, E.; SCHLEGEL, J.L.; STRELKOFF, T.; CLEMMENS, A.J. 2007. Simulation, and design and evaluation of surface irrigation systems with WinSRFR. *Meeting Proceedings*. p. 395-408. United States Department of Agriculture.
- BEKELE, S. Y TILAHUN, K. 2007. Programación regulada de riego por déficit de cebolla en una región semiárida de Etiopía. *Gestión agrícola del agua*, 89 (1-2), 148-152.
- BETTONI, M. M., MÓGOR, Á. F., DECHAMPS, C., DA SILVA, V. C. P., SASS, M. D., & DOS SANTOS FABBRIN, E. G. 2013. Crescimento e produção de sete cultivares de cebolla em sistema orgânico em plantio fora de época. *Semina: Ciências Agrárias*, 34(5), 2139-2152.
- BLUEMING, B., YANG H., PAHL-WOSTL, C. 2007. Making water productivity operational. A concept of agricultural water productivity exemplified as a wheat-maize cr
- BOOHER L.J. 1974. El riego superficial. FAO, Roma, 162 pp.
- BOS, M. AND NUGTEREN, J. 1990. On irrigation efficiencies. Publication 19 ILRI. The Netherlands 9-116.
- BOS, M.; BURTON, M.; MOLDEN D. 2005. Irrigation and drainage performance assessment, practical guidelines. *Internacional Water Management Institute*. 158 p.
- BOS, M.G. 1980. Irrigation efficiencies at the crop production level. *ICID Bull* 29(2):18– 26.
- BOSH SERRA, A. 1999. Bases ecofisiológicas de la producción de cebolla (*Allium cepa* L.): Aportaciones para la mejora de las técnicas de cultivo en el Pla d'Urgell (Lleida). Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. Lleida, España. p325.
- BOSSIE, M., TILAHUN, K. Y HORDOFA, T. (2009). Coeficiente de cultivo y evapotranspiración de cebolla en Awash Melkassa, Valle Central del Rift de Etiopía. *Sistemas de riego y drenaje*, 23 (1), 1-10.
- BREWSTER, J. L. 2008. Onions and other vegetable alliums (No. 15). CABI. p456
- BREWSTER, J.L. 1994. Onions and Other Vegetable Alliums, Wallingford, U.K., CAB International.
- BUCKS, D. A., ERIE, L. J., FRENCH, O. F., NAKAYAMA, F. S., & PEW, W. D. 1981. Subsurface trickle irrigation management with multiple cropping. *Transactions of the ASAE*, 24(6), 1482-1489.
- BURMAN, R.D., NIXON, J.L. WRIGHT Y W.O. PRUITT. 1983. Water requirements. Chapter 6 *Design and Operation of Farm Irrigation systems ASAE*.
- BURT, C.M.; CLEMMENS, A.J.; STRELKOFF, T.S.; SOLOMON, K.H.; BLIESNER, R.D.; HARDY, L.A.; HOWELL, T.A.; AND EISENHAUER, D.E, 1997. Irrigation performance

- measures: Efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123:423-442.
- CAPPANNINI, D. A. Y LORES, R. R. 1966. Los suelos del Valle Inferior del Río Colorado. Colección Suelos N° 1. INTA.
- CARACOTCHE, V., & GARCÍA, D. 2009. Siembra de cebolla en platabandas. Hoja informativa. EEA Hilario Ascasubi, (94), p2.
- CARDOSO PRIETO, C. 2016. Evaluación de abonos orgánicos en el cultivo biológico de la cebolla (*Allium cepa* L.) en el sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Tesis de doctor en ciencia y tecnología de alimentos. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- CELY REYES, G. E. 2010. Determinación de parámetros de riego para el cultivo cebolla de bulbo en el distrito de riego del alto chicamocha (Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia).
- CEPEDA, J. Y ZURA, G. 2018. Área de meteorología, EEA Hilario Ascasubi, INTA.
- CHAMBOULEYRON J. 1977. Evaluación de la eficiencia de uso del agua de riego a nivel zonal. INCyTH – CRA, Mendoza – Argentina (18 pp).
- CHAMBOULEYRON J. 2005. Riego y drenaje, técnicas para el desarrollo de una agricultura regadía sustentable. Universidad Nacional de Cuyo, Ediunc. Tomo I. 470 p. Tomo II. 470 p.
- CHAMBOULEYRON J. L. Y MORÁBITO, J. A. 1982 Evaluación de riego en fincas. INCYTH-CRA. Mendoza. Argentina. 36 p.
- CHAMBOULEYRON, J., SALATINO, S., MORÁBITO, J. y FORNERO, L. 1993. “Diseval: modelo para el diseño y evaluación del riego por superficie. Diseval: A model for the design and evaluation of surface irrigation”. Presentado en el Workshop of Crop Models, en el Congreso Mundial de Riego y Drenaje. La Haya. Holanda.
- CHOPAIDE, S. O., BANSODE PN, HIWASE SS. 1998. Studies on fertilizer and water management to onion. *PKV Res. I. 22: 44-47.*
- CHRISTIANSEN, J. E. 1942. Irrigation by sprinkling. University of California. *Agr. Exp. Sta. Bull.* 610, 120 p.
- CHUNG, B. 1989. Irrigation and bulb onion quality. In *Research and Development Conference on Vegetables, the Market and the Producer* 247 (pp. 233-238).
- CLINTON C. S., B.G.F. ERIK.AND D.S. LAMONT. 2000. Irrigation criteria for drip-irrigated onions. *HortScience* 35:63-66.
- COELHO, E.F., V.A.B. DE SOUZA AND M.A.F. Conceição. 1996. Onion yields under three water regimes and five spacings. *Pesquisa Agrop. Bras.* 31:585–59.
- CORFO R.C. 2018. Corporación de fomento del Valle Bonaerense del rio Colorado. Registros de Aforos y conductividad. Pedro Luro, Buenos Aires.
- COROMINAS, J. 2010. Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del agua*, 17:219-233.
- CRIDDLE, W.; DAVIS, S.; PAIR, C.H. AND SHOCKLEY, D.G. 1956. Methods for evaluating irrigation systems. U.S. Department of Agriculture Handbook 82, 24 p.
- CUENCA-ADAME, E., D. Riestra-Díaz, J.M. PÉREZ-MANGAS Y A. ECHEGARAYALEMÁN. 2003. Evapotranspiración y calendarización del riego para cebolla con aguas residuales del Río Apatlaco, Morelos, México. *TERRA Latinoamericana* 21:373-379.
- CUESTA T., NEIRA X., ALVAREZ C., CANCELA J. 2005. Evaluation of water-use in traditional irrigation. An application to the Lemos Valley irrigation district, northwest of Spain. *Agricultural Water Management* 75 137-151.
- CURRAH, L. 1998. CEBOLLA *Allium cepa* L. *FCA.* 20: 1
- DELAWARE SANTA OLALLA, F. M., DE JUAN VALERO, J. A., & CORTÉS, C. F. 1994. Growth and production of onion crop (*Allium cepa* L.) under different irrigation schedulings. *European Journal of Agronomy*, 3(1), 85-92.
- DESALEGNE, L., & AKLILU, S. 2003. Research experience in onion production. *Earo, report*, (55).

- DOORENBOS, J., KASSAM, A.H., 1986. Yield response to water. FAO Irrigation and drainage paper 33, Rome, 144 pp.
- DRAGLAND S. 1974. Nitrogen and water requirements in onions. *Forskning og Forsøki Landbruket*. 26: 93-113.
- DRINKWATER WO, JANES BE. 1955. Effects of irrigation and soil water on maturity, yield and storage of two onion hybrids. *Proc. Am. Soc. Hortic. Sci.* 66: 267-279.
- DROST, D., P. GROSSL AND R. KOENIG. 1996. Nutrient management of onions: A Utah perspective. In: *Proceedings of the International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. ASAE, the International Commission on Irrigation and Drainage, San Antonio, TX. USA, pp. 54–59.
- DUARTE DÍAZ, C. E., ZAMORA HERRERA, E. I., & LEÓN FUNDORA, M. 2012. Efecto del coeficiente de estrés hídrico sobre los rendimientos del cultivo de cebolla. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(4), 42-47.
- ELLS, J. E., MCSAY, A. E., SOLTANPOUR, P. N., SCHWEISSING, F. C., BARTOLO, M. E., & KRUSE, E. G. 1993. Onion irrigation and nitrogen leaching in the Arkansas Valley of Colorado 1990-1991. *HortTechnology*, 3(2), 184-187.
- ENCHALEW, B., GEBRE, S. L., RABO, M., HINDAYE, B., & KEDIR, M. 2016. Effect of deficit irrigation on water productivity of onion (*Allium cepal.*) under drip irrigation. *Irrigation and Drainage Systems Engineering*, 5(172), 2.
- ENCISO, J., J. JIFON AND B. WIEDENFELD. 2007. Subsurface drip irrigation of onions: Effects of drip tape emitter spacing on yield and quality. *Agric. Water Manag.* 92:126–130.
- ERIE, L.J. 1968. Management: a key to irrigation efficiency. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 94(IR3):285–293.
- FACI, J.M., PLAYÁN, E., 1994. Principios básicos del riego por superficie. MAPA. Hojas divulgadoras, n. 10-11/94. 32 pp.
- FAO. 2001. Manual de Riego Parcelario. Temístocles Maldonado Rojas Desarrollo de Tierras y Aguas Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe Santiago de Chile.
- FAO. 2002. Agricultural drainage water management in arid and semiarid áreas. FAO Irrigation and Drainage paper N° 61. Roma. 188 pp.
- FEYEN, JAN Y ZERIHUM, DAWIT 1999. Assessment of the performance of border and furrow irrigation systems and the relationship between performance indicators and system variables. *Agricultural Water Management* 40 353-362.
- GAVIOLA, S., V.M. LIPINSKI, Y CL. GALMARINI. 1998. Efecto de diferentes regímenes de riego sobre cebolla para deshidratar. *Ciencia del Suelo* 16:115-118.
- GONZÁLEZ, M. D. R., SCHILARDI, C., BIONDI, R., SATLARI, G., MORÁBITO, J., & REARTE, E. 2017. Desempeño del riego por superficie en la cuenca del río Diamante, Mendoza, Argentina.
- GORENSTEIN S. 2006. Dinámicas en una trama hortícola y efectos territoriales. El caso del Valle Bonaerense del Río Colorado. *Revista Interdisciplinaria de Estudios Agrarios*, N° 24.
- GRASSI, C. J. 1998. Fundamentos del riego (No. 631.587 G769f). Mérida, VE: Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial.
- GRASSI, C. J. 2000. Diseño y operación de riego por superficie. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida-Venezuela. 391 p.
- GREENLAND, D.J AND BHUIYAN, S.I. 1980. Rice research strategies in selected areas: environment management and utilization. *Spec. international symposium on rice research strategies for the future*, 21–25 April, IRRI, Manila.
- GREENWOOD, D.J., GERWITZ, A., STONE, D.A. & BARNES, A. 1982. Root development of vegetable crops. *Plant and Soil*, 68, 75–96.

- GUZMÁN, R.S.C., C. VALENZUELA S., P. FÉLIX V., A. JIMÉNEZ T. Y S. RUIZ C. 2008. Necesidades hídricas de los principales cultivos en el estado de Baja California. SAGARPA. INIFAP. CIRNO. Campo Experimental Valle de Mexicali. Folleto Técnico No. 13. 30 p.
- HAISE, H. R.; DONNAN, W.W.; PHELAN, J.T., LAWHON, L.F. AND SHOCKLEY, D.G. 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. Publ. ARS 41-7, Agricultural Research Service and Soil Conservation Service, USDA, Washington DC.
- HALIM OA, AND ENER M. 2001. A study on irrigation scheduling of onion (*Allium cepa* L.) in Turkey. *J. Biol. Sci.* 1(8): 735-736.
- HALL, W.A. 1960. Performance parameters of irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 105(IR4):443-445.
- HANSEN, V.E. 1960. New concepts in irrigation efficiency. *Trans ASAE* 3(1):55-57, 61, 64.
- HANSON, B.R., D.M. MAY AND L.J. SCHWANKL 2003. Effect of irrigation frequency on subsurface drip irrigated vegetables. *HortTechnology* 13:115-120.
- HART, W.E.; PERI, G.; SKOGERBOE, G.V. 1979. Irrigation performance: an evaluation. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 105(IR3):275-288.
- HEDGE DM. 1986. Effect of irrigation regimes on dry matter production, yield, nutrient uptake and water use of onion. *Indian J. Agron.* pp. 343-348.
- HIDALGO A. 1971. Métodos modernos de riego de superficie. Aguilar. Madrid, 463 pp.
- HILLEL, D. 2000. Salinity management for sustainable irrigation. Integrating science environment and economics. The World Bank. Washington DC. p. 92.
- ICID (International Commission on Irrigation and Drainage) 1978. Standards for the calculation of irrigation efficiencies. *ICID. Bull* 27(1):91-101.
- ISRAELSEN, O. Y HANSEN, V. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Universidad del estado de Utah, Logan, Utah, Estados Unidos. 385 p.
- ISRAELSEN, O.W. y V. E. Hansen. 1962. Irrigation principles and practices. John Wiley, & Sons, Inc.
- ISRAELSEN, O.W. 1932 y 1950. Irrigation principles and practices, 1st edn. Wiley, New York.
- ISRAELSEN, O.W. 1932. Irrigation principles and practices, 1st edn. Wiley, New York.
- IURMAN, D. 2012. Aspectos del mercado de cebolla. Producción, exportación e importación. Proyecto Regional Sistemas de información productiva, socioeconómica y de fortalecimiento de la capacidad de gestión local de los territorios CERBAS. INTA. Pp. 22.
- IURMAN, D. 2018. Cebolla Argentina. 21 seminario de cebolla del Mercosur. Presentación Power point.
- JALDO D. 2017. Un análisis de la producción y comercio internacional de cebolla. Situación y perspectivas de la cadena de valor en Argentina. XLVIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria. AAEEA. Talca, Chile.
- JARAMILLO, S. 1997. Estudio fenológico de tres tipos de cebolla de bulbo *Allium cepa* L. *Acta Agronómica* 47(3): 16-25 pp.
- JENSEN M. 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science* 25:233-245.
- JENSEN, M.E. 1967. Evaluating irrigation efficiency. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 93(IR1):83-98.
- JENSEN, M.E.; HARRISON, D.S.; KORVEN, H.C. AND ROBINSON, F.E. 1980. The role of irrigation in food and fiber production. In: Jensen ME (ed) Design and operation of farm irrigation systems, *Am. Soc. Agr. Eng.* pp 15-41 (revised printing, 1983, 841 pp).
- JENSEN, M.M.E., L.R. SWARNER Y J.T. PHELAN. 1967. Improving irrigation efficiencies. Chapter 61. Irrigation of agricultura Lands. *Agronomy* N° 11. American Society of Agronomy.
- JONES, S. T., & JOHNSON, W. A. 1958. Effect of irrigation at different minimum levels of soil moisture and of imposed droughts on yield of onions and potatoes. In *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci* (Vol. 71, pp. 440-445).

- JURRIENS M., D. ZERIHUM, J. BOONSTRA and J. FEYEN. 2002. Surface irrigation Software. Design, operation and evaluation of basin, border and furrow irrigation with SURDEV computer package. ILRI publication. Wageningen, The Netherlands.
- KADAYIFCI, A., TUYLU, G. İ., UCAR, Y., & ÇAKMAK, B. 2005. Crop water use of onion (*Allium cepa* L.) in Turkey. *Agricultural Water Management*, 72(1), 59-68.
- KELLER J., BLIESNER R.D. 1990. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York, 1-41; pp.603-625.
- KELLER, J. 1986. Irrigation system management. In: Nobe KC, Sampath RK (eds) *Irrigation management in developing countries, studies in water policy and management*, Westview Press, vol 8, pp 329–352.
- KIFLE, M., GEBREMICAEL, T. G., GIRMAY, A., & GEBREMEDIHIN, T. (2017). Effect of surge flow and alternate irrigation on the irrigation efficiency and water productivity of onion in the semi-arid areas of North Ethiopia. *Agricultural water management*, 187, 69-76.
- KIFLE, M., TILAHUN, K., & YAZEW, E. (2008). Evaluation of surge flow furrow irrigation for onion production in a semiarid region of Ethiopia. *Irrigation science*, 26(4), 325-333.
- KIPKORIR, E. C., RAES, D., & MASSAWE, B. (2002). Seasonal water production functions and yield response factors for maize and onion in Perkerra, Kenya. *Agricultural Water Management*, 56(3), 229-240.
- KLAR, E.A., J.F. PEDRAS AND J.D. RODRÍGUEZ. 1976. Effect of various soil and climatic conditions on water requirement of onion. I. Yield of bulbs. *Phyton* 34:9–25.
- KORIEEM, S. O., EL-KOLIEY, M. M. A., & WAHBA, M. F. (1994). Onion bulb production from (Shandweel 1) [Egyptian cultivar] sets as affected by soil moisture stress. *Assiut Journal of Agricultural Sciences (Egypt)*.
- LAMM, F.; T. TROOIEN. 2003. Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. *Irrigation Science* 22: 195–200.
- LEDIVOW, L.; D. ZACCARIA; R. MAIA; E. VIVAS; M. TODOROVIC. 2014. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. *Agricultural Water Management* 146: 84-94.
- LEVINE, G. 1982. Relative water supply: an explanatory variable. In: Technical note 1, the determinants of developing country irrigation problems project, Cornell and Rutgers University, Ithaca, NY.
- LIPINSKI, V.M. 1994. Efecto del riego y la fertilización fosfatada sobre el rendimiento de cebolla. 158 p. Jornadas de actualización sobre el cultivo de cebolla, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria La Consulta, Argentina.
- LÓPEZ-URREA, R., F.M. DE SANTA OLALLA, C. FABEIRO, A. MORATALLA A. 2009. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agric. Water Manag.* 85:15–26.
- LOSADA VILLASANTE, A.; ROLDAN CAÑAS, J. 2009. Riego por Superficie. Apuntes de curso de posgrado de Maestría en Riego y Drenaje. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias. Mendoza del 30 de marzo al 3 de abril de 2009. 143 p.
- LUCANERA, G.; CASTELLANO, A. & BARBERO, A. 2018. Banco de datos socioeconómicos de la zona de CORFO-Río Colorado. Estimación del producto bruto agropecuario regional (Campaña 2017/2018). UNS, Departamento de Economía.
- LUQUE, J. A., SÁNCHEZ, R. M., FIORENTINO, C. E., & PAOLONI, J. D. 1996. Lámina, intervalo y umbral hídrico del cultivo de la cebolla en suelos del valle bonaerense del río Colorado (provincia de Buenos Aires).
- MAAS EV Y HOFFMAN GJ, 1977. Crop salt tolerance: Current assessment. *J Irrig Drain E-ASCE* 103: 115-134.

- MARTÍNEZ A., ORTEGA J. F., DE JUAN J.A.; MEDINA D., Y TARJUELO J.M., 2010. Los servicios de asesoramiento en la gestión y uso del agua de riego. Segunda reunión internacional de riego “Sistemas y metodologías para asesoramiento a regantes”, EEA Manfredi, INTA 205p.
- MASTROMAURO, M. 2014. Evaluación de funciones de pedotransferencia para la estimación de constantes hídricas en tres suelos del centro de la provincia de Córdoba, Argentina.
- MAUGHAN, T., DROST, D., & ALLEN, L. N. 2015. Vegetable Irrigation: Onion. Extension, Utah State University.
- MERMOUD A, TAMINI TD, YACOUBA H. 2005. Impacts of different irrigation schedules on the water balance components of an onion crop in semi-arid zone. *Agric. Water Manage.* 77: 282-295.
- MERRIAM, J.; AND KELLER, J. 1978. Farm Irrigation System Evaluation. A guide for management. Department of Agriculture and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan, Utah, USA.
- MERRIAM, J.; KELLER, J. Y ALFARO, J. 1973. Irrigation system evaluation and improvement. Department of agriculture and Utah State University, Logan, Utah, USA.
- MOLDEN, D. 1997. Accounting for water use and productivity. SWIM Paper 1. International Water Management Institute (IWMI), Colombo, Sri Lanka.
- MOLDEN, D. and SAKTHIVADIVEL, R. 1999. Water accounting to assess use and productivity of water. *Int. Journal Water Resources Dev.* 15 (1/2), 55 – 77.
- MORÁBITO J., 2003. Desempeño del riego por superficie en el área de riego del río Mendoza. Eficiencia actual y Potencial. Universidad Nacional de Cuyo – Facultad de Ciencias Agrarias. Tesis de Maestría. 91 p.
- MORABITO, J. A., MIRABILE, C., & SALATINO, S. 2007. Eficiencia del riego superficial, actual y potencial, en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). *Ingeniería del agua*, 14:199-214. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 71 p.
- MORABITO, J. A., SALATINO, S. 2008. Evaluación de campo al riego de los agricultores: casos prácticos y ventajas para la difusión de la tecnología apropiada; asesoramiento a los regantes para la modernización de los regadíos y su ambientalidad Parte I.
- MORÁBITO, J., CHAMBOULEYRON, J., SALATINO, S. y FORNERO, L. 1991. “ERFIN Modelo para el cálculo de eficiencias de riego en finca”. En II Jornadas Internacionales Sobre Uso de Computadoras en Investigaciones Científicas y Técnicas. Facultad de Ingeniería Universidad de Mendoza. Mendoza. Argentina.
- MORÁBITO, J., SALATINO, S., & SCHILARDI, C. 2012. El desempeño del uso agrícola del agua en los oasis de los ríos Mendoza y Tunuyán a través de nuevos indicadores. *Actas del VI Jornadas de riego y fertirriego.*
- NARANG, R.S. Y DASTANE, N.G. 1969. Water use by *Allium cepa* L. (bulb onion) grown under different soil moisture regimes, *Indian J. Hort.* 26 176–180.
- NASSAR, A., & WALY, E. A. 1977. Yield and grade of onions as affected by irrigation frequency and stage of maturity [in Egypt]. *Annals of Agricultural Science Moshtohor.*
- NORENO, A. 1976. Evaporación y transpiración. Serie Suelo y Clima SC – 13, CIDIAT, Mérida, Venezuela.
- OLALLA FJ, DOMINGUEZ-PADILLA A, LOPEZ R. 2004. Production and quality of the onion crop (*Allium cepa* L.) cultivated under deficit irrigation.
- OLGUÍN, A. 2016. Evaluación integral de desempeño del método de riego por goteo en vid (*Vitis vinifera* L.), en la zona este y norte del oasis de Tulum, San Juan, Argentina. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Cuyo
- OLLIER Ch., POIREE M. 1981. Irrigation, les reseaux d'irrigation, theorie, technique et economie des arrosages. Eyrolles. Paris, 503 pp.
- ORTOLA, M. P., & KNOX, J. W. 2015. Water relations and irrigation requirements of onion (*Allium cepa* L.): A review of yield and quality impacts. *Experimental agriculture*, 51(2), 210-231.

- OSUNA CANIZALEZ, F. D. J., & RAMÍREZ ROJAS, S. 2013. Manual para cultivar cebolla con fertirriego y riego por gravedad en el estado de Morelos.
- PARASHAR, K.S. 1976. Effect of soil water stress at different stages of growth on yield of onion bulb, *Indian J. Agron.* 12 489–490.
- PASCUAL ESPAÑA B. 2008. Riegos por gravedad y a presión. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. ISBN: 978-84-8363-083-9.
- PAZZI, A. 2009. Sector agropecuario y desarrollo rural. El caso del Valle Bonaerense del Río Colorado (Argentina). *Universitat Rovira i Virgili*.
- PEJIĆ, B., GVOZDANOVIĆ-VARGA, J., MILIĆ, S., IGNJATOVIĆ-ĆUPINA, A., KRSTIĆ, D., & ĆUPINA, B. 2011. Effect of irrigation schedules on yield and water use of onion (*Allium cepa* L.). *African Journal of Biotechnology*, 10(14), 2644-2652.
- PELTER QG, MITTELSTADT R, LEIB BG 2004. Effects of water stress at specific growth stages on onion bulb yield and quality. *Agric. Water Manage.* 68: 107-115.
- PELUFFO, S. Y ARIAS, A. 2001. Crecimiento y Rendimiento de tres cultivares de cebolla de diferente ciclo en diferentes localidades y fechas de siembra. En Tesis Ingeniero agrónomo. Universidad de la Republica. Montevideo. Uruguay, p89
- PEREIRA LS, TROUT TJ. 1999. Irrigation Methods. In: HN van Lier, LS Pereira, FR Steiner (Eds.) *CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol. I: Land and Water Engineering*, ASAE, St. Joseph, MI: 297 – 379.
- PEREIRA, L. S., DE JUAN, J. A., PICORNELL, M. R., & TARJUELO, J. M. 2010. El riego y sus tecnologías. Albacete: CREA-UCLM. 296p.
- PEREIRA, L.; THEIB, O.; ABDELAZIZ. 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agricultural Water Management* 56 175-206.
- PEREIRA, LUIS S., I. CORDERY and I. IACOVIDES. 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management* 108, 39 - 51.
- PERRY, C. 2007. Efficient irrigation: inefficient communication; flawed recommendations. *Irrig. Drain.* 56 (4), 367 – 378.
- PICARDI, S., PÉREZ A., GIMÉNEZ M., 2007. Migración boliviana, mercado de trabajo hortícola y desarrollo local, XI Congreso Internacional sobre la integración regional, fronteras y globalización en el continente americano. Medellín – Colombia. Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.
- PIZARRO, F. 1996. Riegos localizados de alta frecuencia. 3ª Edición. Ed. Mundi Prensa. España.
- PLA, M. Y MARTÍNEZ R. 2007. Estudio del riego por surco en cebolla para tres caudales diferentes de aplicación. XXI Congreso Nacional del Agua. San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.
- PRASHAR, CR, SHARMA, GC Y GANDAH, M. 1994. Evapotranspiración de cebolla en el Sahel Níger. *Agricultura experimental*, 30 (4), 473-476.
- PROCISUR. 2010. El riego en los países del Cono Sur / IICA, PROCISUR. Montevideo: IICA 112p., ISBN 978-92-9248-269-5.
- RANA, D. S., & SHARMA, R. P. 1994. Effect of irrigation regime and nitrogen fertilization on bulb yield and water use of onion (*Allium cepa*). *Indian Journal of Agricultural Science*, 64(4), 223-226.
- RAWLS, W. J., D. L. BRAKENSIEK, AND K. E. SAXTON. 1982. Estimating soil water properties. *Transactions, ASAE*, 25(5):1316-1320 and 1328.
- RENAULT D. AND WALLENDER WW. 2000. Nutritional water productivity and diets. *Agric. Water Manage.* 45: 275-296.
- RHOADES J. D.; KANDIAH, A. AND MASHALL, A. M. 1992. The use of saline waters for crop production. Rome: FAO. FAO Irrigation and drainage. Paper 48: 133 pp.

- RICHARDS, L. 1954. Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos sódicos. USDA. Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos. Agric. Handbook N° 60, 172 pp.
- RONDÓN, S.; TORRES, N.; LAVERDE, H. 1996. Efecto de tres coberturas plásticas y dos sistemas de siembra en la fenología de la cebolla de bulbo (*Allium cepa*) en la Sabana de Bogotá. *Agronomía colombiana* 13(2): 142-151 pp.
- ROSCHER K, 1985. Surface Irrigation. Characteristics, design and performance. Department of irrigation and civil engineering. Agricultural University, Wageningen. The Netherlands.
- SALATINO, S; BAGINI, R.; SATLARI, G; MORÁBITO, J. 1992. "Parámetros y Eficiencia de riego en el área de influencia del Arroyo Claro en Tunuyán, Mendoza". Instituto Nacional del Agua, Departamento General de Irrigación e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- SAMMIS, TW, AL-JAMMAL, MS, BALL, S. Y SMEAL, D. 2000. Uso de agua de cultivo de cebolla. En el VI Congreso Internacional de Microirrigación (Micro 2000), Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 22-27 de octubre de 2000 (pp. 1-9). Comisión Internacional de Riego y Drenaje (ICID).
- SÁNCHEZ R. M.; DUNEL GUERRA L. 2017. Salinidad y sodicidad de suelos bajo riego en zonas áridas y semiáridas y su efecto sobre los cultivos. *Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina: recurso y aprovechamiento productivo*. Editores Edith Talesisnik- Raul S. Lavado. Sección 2 – 10, pág. 227 – 248.
- SÁNCHEZ RM, PEZZOLA N, CEPEDA J. 1998. Caracterización edafo-climática del área de influencia de la. INTA EEA Hilario Ascasubi. Partidos de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires. *Boletín de divulgación* N°18.
- SÁNCHEZ, R. M. 2010. Evaluación de las aplicaciones de agua de riego por gravedad en el sur de Buenos Aires. Reunión Internacional de Riego. Manfredi, Córdoba. AR.
- SÁNCHEZ, R. M. 2013. Estimación de los requerimientos hídricos de los principales cultivos en el valle bonaerense del río Colorado. INTA Hilario Ascasubi. Informe Técnico 40.
- SCHILARDI C., 2010. Desempeño del riego por superficie en el área de riego de la cuenca del río Tunuyán Superior. Universidad Nacional de Cuyo – Facultad de Ciencias Agrarias. Tesis de Maestría. 138 p.
- SCHILARDI, C., MORÁBITO, J. A., & VALLONE, R. 2009. Modelación matemática del riego por superficie como una alternativa superadora para el manejo del riego en finca. Instituto Nacional del Agua-Centro Regional Andino y la Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo, Mendoza, Argentina.
- SCHILARDI, C., REARTE, E., MARTÍN, L., & MORÁBITO, J. 2015. Diagnóstico prospectivo del desempeño de métodos de riego en la provincia de Mendoza. Puntos de atención y estrategias de optimización. Conagua.
- SCHUURMANS, W. 1989. Impact of unsteady flow on irrigation water distribution. In: Rydzewski JR, Ward CF (eds) *Irrigation: theory and practice*, Pentech Press, London.
- SHARMA, O. L., KATOLE, N. S., & GAUTAM, K. M. 1994. Effect of irrigation schedules and nitrogen levels on bulb yield and water use by onion (*Allium cepa* L.). *Agricultural Science Digest Karnal*, 14, 15-18.
- SHOCK, C. C., FEIBERT, E. B. G., & SAUNDERS, L. D. 1998b. Onion yield and quality affected by soil water potential as irrigation threshold. *HortScience*, 33(7), 1188-1191.
- SHOCK, C. C., FEIBERT, E. B. G., JENSEN, L., & KLAUZER, J. 2010. Successful onion irrigation scheduling.
- SHOCK, C. C., FEIBERT, E. B., & SAUNDERS, L. D. 2000. Irrigation criteria for drip-irrigated onions. *HortScience*, 35(1), 63-66.
- SHOCK, C. C., FEIBERT, E. B., & SAUNDERS, L. D. 2007. Short-duration water stress decreases onion single centers without causing translucent scale. *HortScience*, 42(6), 1450-1455.
- SHOCK, C. C., FLOCK, R., FEIBERT, E., SHOCK, C. A., JENSEN, L., & KLAUZER, J. 2005. Drip irrigation guide for onion growers in the Treasure Valley.

- SILVA BUSO A. 2012. El valor estratégico de los recursos naturales. Prólogo capítulo 1. p. 15. Fundación TAEDA para la irrigación, el desarrollo y la equidad.
- STEDUTO, P., HSIAO, T. C., FERERES, E., & RAES, D. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO) Spa No. 66.
- SULERIA, H. A. R., BUTT, M. S., ANJUM, F. M., SAEED, F., & KHALID, N. 2015. Onion: nature protection against physiological threats. *Critical reviews in food science and nutrition*, 55(1), 50-66.
- SULLIVAN, M.D., B.D. BROWN, C.C. SHOCK, D.A. HORNECK, R.G. STEVENS, G.Q. PELTER AND E.B.G. FEIBERT. 2001. Nutrient Management for Onions in the Pacific Northwest. Pacific Northwest Extension Publication. Oregon State University. Washington State University. University of Idaho. USA. 26 p.
- SURYAWANGSI, S.N. AND BANGER, B.S. 1993. Effect of soil moisture stress at different growth stages on yield of onion crop, *J. Water Mgmt* 1 55–56.
- THORUP-KRISTENSEN, K. 2001. Root growth and soil nitrogen depletion by onion, lettuce, early cabbage and carrot. In *International Conference on Environmental Problems Associated with Nitrogen Fertilization of Field Grown Vegetable Crops* 563(pp. 201-206).
- VAN DER MOLEN, W.H. – 1983 – “Salt balance and leaching requirement”. In “*Drainage Principles and Applications: II Theories of field drainage and watershed runoff*”. Publication 16 – Vol. II. Pág. 59 – 100. International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). The Netherlands.
- VAN DER MOLEN, W.H. 1973. –Salt Balance and Leaching Requirement. In: *Drainage Principles and Application, II, Chapter9*, International Institute for land Reclamation and Improvement, Publication 16, Wageningen.
- VAN HALSEMA, G. E., & VINCENT, L. 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agricultural water management*, 108, 9-15.
- VARELA, P. E., BAFFONI, P. A., & BONGIOVANNI, M. (2013). Rendimiento de cebolla bajo 4 sistemas de riego en el valle bonaerense del Río Colorado. In *Congreso Argentino de Horticultura. 36. Congreso Internacional de Plásticos Agrícolas. 2. 2013 09 24-26, 24 al 26 de septiembre de 2013. Tucumán. AR.*
- VARELA, P; BONGIOVANNI, M; ARBIZU, S; L & SÁNCHEZ, R, 2014. Evaluación de la eficiencia del riego gravitacional en el cultivo de cebolla. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas” Bahía Blanca.
- VIDYAVATI, H. G., MANJUNATHA, H., HEMAVATHY, J., & SRINIVASAN, K. 2010. Hypolipidemic and antioxidant efficacy of dehydrated onion in experimental rats. *Journal of food science and technology*, 47(1), 55-60.
- VOSS, R. E. (1979). Onion production in California (Vol. 4097, pp. 49-49). University of California.
- VUČIĆ N. 1976. Irrigation of agriculture crops. Faculty of agriculture, Novi Sad (In Serbian).
- WALKER, R. 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Irrigation and Drainage Paper N° 45. 85 p.
- WALKER, R. 1993. “SIRMOD Surface Irrigation Simulation Software”. Biological and Irrigation Engineering Department. Utah State University. Logan. Utah 84322-4104. USA.
- WALKER, R. 2003. “Simulación, diseño y evaluación de riego por superficie. Guía del curso y documentación técnica”. Utah State University. Logan, Utah, USA. 63 p.
- WALKER, R. AND SKOGERBOE. 1987. *Surface Irrigation Theory and Practice*. Utah State University, Prentice – Hall.
- WALKER, R.; PRESTWICH, C.; SPOFFORD, T 2006. Development of revised USDANRCS intake families for surface irrigation. *Agricultural Water Management* 85. 157-164.
- WELLER, J.A.; PAYAWAL, E.B. AND SALANDANAN, S. 1988. Performance assessment of the Porac River irrigation system. In: *Asian symposium on the modernizations and rehabilitation*

- of irrigation and drainage schemes, Development Academy of the Philippines, ODU/Hydraulics Res. Ltd., Wallingford, UK, 13–15 February 1989.
- WILLARDSON, L.S.; ALLEN, R.G. AND FREDERIKSEN, H. 1994. Eliminating irrigation efficiencies. In: USCID 13th technical conference, Denver, CO, 19–22 October 1994, 15 p.
- WINSCHHEL, C. 2017. Integración por medio de geotecnologías de la información ambiental en estudios de degradación de los suelos para los partidos de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires, Argentina. Tesis de Doctorado en Geografía, Bahía Blanca, Argentina.
- WOLTERS, W 1992. Influences on the efficiency of irrigation water use. Publication 51 ILRI. The Netherlands.
- ZIMMERMANN, E.D. & BASILE, P.A. 2001. Estimation of hydraulic parameters in silty soils using different pedotransfer functions. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 1.
- ZINK, F. W. 1966. Studies on the growth rate and nutrient absorption of onion. *Hilgardia. Journal of agriculture science.* University of California. 37(8), 203213.

ANEXO

8. ANEXO

8.1 Evaluaciones de riego.

8.1.2 Fecha y ubicación geográfica.

Se detalla, número de identificación del estudio, fecha de realización (día/mes/año) y latitud y longitud de las evaluaciones de riego realizadas.

Tabla 56. Eventos de riego evaluados durante la campaña 2015-2016

Evaluación	Fecha	Latitud S	Longitud O	Evaluación	Fecha	Latitud S	Longitud O
1	10/9/2015	39°24'15.82"	62°38'37.83"	16	1/12/2015	39°22'0.21"	62°25'41.01"
2	15/9/2015	39°29'19.62"	62°42'32.06"	17	2/12/2015	39°18'56.38"	62°42'41.89"
3	16/9/2015	39°34'24.64"	62°36'43.49"	18	10/12/2015	39°38'1.60"	62°28'14.99"
4	29/9/2015	39°24'59.70"	62°37'56.39"	19	11/12/2015	39°30'20.91"	62°47'12.09"
5	29/9/2015	39°24'59.44"	62°37'58.98"	20	15/12/2015	39°25'5.49"	62°31'7.23"
6	30/9/2015	39°16'52.89"	62°46'11.07"	21	22/12/2015	39°23'24.31"	62°36'40.45"
7	8/10/2015	39°37'32.26"	62°46'52.66"	22	5/1/2016	39°25'57.91"	62°39'43.74"
8	9/10/2015	39°30'15.69"	62°37'4.02"	23	6/1/2016	39°29'22.93"	62°58'37.85"
9	13/10/2015	39°31'18.22"	62°46'31.86"	24	8/1/2016	39°26'19.60"	62°55'44.80"
10	27/10/2015	39°43'6.73"	62°27'45.41"	25	12/1/2016	39°28'35.47"	62°57'18.85"
11	4/11/2015	39°32'48.06"	62°38'49.34"	26	14/1/2016	39°17'27.71"	62°47'20.61"
12	5/11/2015	39°14'38.46"	62°39'44.49"	27	19/1/2016	39°40'52.03"	62°46'38.06"
13	11/11/2015	39°15'21.19"	62°39'3.38"	28	21/1/2016	39°52'53.43"	62°31'38.49"
14	17/11/2015	39°39'37.99"	62°47'52.88"	29	2/2/2016	39°43'6.99"	62°41'19.61"
15	19/11/2015	39°51'18.23"	62°40'9.72"	30	11/2/2016	39°33'47.22"	62°28'32.11"

8.1.3 Caracterización según las variables de clasificación.

Se detalla, número de identificación del estudio, intendencia de riego, método de riego, tenencia de la tierra, entrega de agua, tipo de derivación a la parcela, etapa de cultivo y estación del año.

Tabla 57. Caracterización de cada caso bajo estudio según las distintas variables de clasificación.

Evaluación	VARIABLE						
	Intendencia de riego	Método de riego	Tenencia de la tierra	Entrega de agua	Tipo de derivación	Etapa de cultivo	Estación del año
1	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₁	primavera
2	Pedro Luro	surco	propietario	turnado	sifón	E ₁	primavera
3	Pedro Luro	melga	propietario	turnado	sifón	E ₁	primavera
4	Mayor Buratovich	surco	propietario	turnado	sifón	E ₁	primavera
5	Mayor Buratovich	melga	propietario	turnado	sifón	E ₁	primavera
6	Mayor Buratovich	melga	propietario	turnado	sifón	E ₁	primavera
7	Villalonga	melga	arrendatario	turnado	sifón	E ₁	primavera
8	Pedro Luro	surco	propietario	continua	sifón	E ₁	primavera
9	Pedro Luro	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₁	primavera
10	Pedro Luro	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₁	primavera
11	Pedro Luro	melga	arrendatario	turnado	boquete	E ₁	primavera
12	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	continua	boquete	E ₂	primavera
13	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	turnado	sifón	E ₂	primavera
14	Villalonga	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₂	primavera
15	Villalonga	melga	propietario	turnado	sifón	E ₂	primavera
16	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	continua	boquete	E ₂	primavera
17	Mayor Buratovich	melga	propietario	continua	boquete	E ₂	primavera
18	Pedro Luro	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₂	primavera
19	Pedro Luro	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₂	primavera
20	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	continua	sifón	E ₂	primavera
21	Mayor Buratovich	surco	propietario	continua	sifón	E ₂	verano
22	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	turnado	sifón	E ₃	verano
23	Mayor Buratovich	melga	arrendatario	turnado	sifón	E ₃	verano
24	Mayor Buratovich	melga	propietario	turnado	sifón	E ₃	verano
25	Mayor Buratovich	melga	propietario	turnado	sifón	E ₃	verano
26	Mayor Buratovich	melga	propietario	turnado	boquete	E ₃	verano
27	Villalonga	melga	arrendatario	continua	boquete	E ₃	verano
28	Villalonga	surco	propietario	continua	sifón	E ₃	verano
29	Villalonga	melga	arrendatario	turnado	sifón	E ₃	verano
30	Pedro Luro	melga	arrendatario	continua	boquete	E ₃	verano

8.2. Número de regantes, superficie bajo riego y superficie sembrada de cebolla

Se detalla, número de regantes, superficie bajo riego y superficie sembrada de cebolla de días largos en la campaña 2015-2016, discriminado por intendencia de riego.

Tabla 58. Número de regantes, superficie bajo riego y superficie sembrada de cebolla de días largos en la campaña 2015-2016, discriminado por intendencia de riego (porcentajes expresados en paréntesis).

Intendencia de riego	Número de regantes	Superficie bajo riego (has)	Superficie sembrada de cebolla campaña 2015-16 (has)
Mayor Buratovich	789 (44%)	57321 (42%)	5732 (47%)
Pedro Luro	501 (28%)	45576 (33%)	2509 (20,5%)
Villalonga	523 (29%)	33844 (25%)	3967 (32,5%)
Total	1813 (100%)	136741 (100%)	12208 (100%)

8.3 Parámetros físicos de suelo y agua

8.3.1 Humedad, textura y densidad aparente

Se detalla, para cada caso bajo estudio los valores promedio a lo largo de la unidad de riego y para la profundidad 0 – 50 cm. De humedad gravimétrica, porcentaje de arena, limo y arcilla, clase textural y densidad aparente.

Tabla 59. Humedad gravimétrica antes y después del riego, textura y densidad aparente (*Dap*)

Evaluación	Humedad de suelo (g% g suelo seco)		Fracciones texturales (%)			Textura	<i>Dap</i> (g /cm ³)	Evaluación	Humedad de suelo (g% g suelo seco)		Fracciones texturales (%)			Textura	PEA (g /cm ³)
	antes	después	arcilla	limo	arena				antes	después	arcilla	limo	arena		
1	12,0	16,5	4	20	24	Fa	1,37	16	16	21	21	20	59	FaA	1,4
2	30,0	33,5	5	21	25	AF	1,29	17	19	23	7	13	80	AF	1,5
3	25,1	31,0	19	27	53	FA	1,18	18	21	27	16	30	54	FA	1,3
4	15,9	16,9	14	24	62	FA	1,35	19	21	27	21	33	46	F	1,2
5	15,7	17,9	15	20	66	FA	1,35	20	14	21	13	17	71	FA	1,3
6	20,5	27,4	26	25	49	FaA	1,27	21	12	19	11	14	75	FA	1,5
7	19,2	21,3	9	23	68	FA	1,30	22	16	22	15	26	59	FA	1,4
8	28,8	33,2	32	35	33	Fa	1,32	23	29	34	35	41	24	Fa	1,1
9	15,4	21,0	14	24	62	FA	1,35	24	17	26	16	29	54	FA	1,3
10	21,3	22,8	7	18	74	FA	1,50	25	26	28	26	28	46	F	1,3
11	17,9	19,1	19	24	58	FA	1,35	26	20	27	8	20	72	FA	1,3
12	16,3	18,9	6	10	84	AF	1,50	27	26	30	29	37	34	Fa	1,3
13	10,5	16,5	6	10	84	AF	1,52	28	14	18	11	23	66	FA	1,5
14	23,0	25,4	20	33	46	F	1,23	29	15	21	11	24	65	FA	1,4
15	20,2	22,8	28	20	52	FaA	1,31	30	28	37	28	40	32	Fa	1,2

8.3.2 Conductividad eléctrica de suelo y agua.

Se detalla, para cada caso bajo estudio los valores de conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (*CEes*) a lo largo de la unidad de riego y para la profundidad 0 - 25 y 25 – 50 cm y la conductividad eléctrica de las muestras de agua de riego (*CEi*).

Tabla 60. Conductividad eléctrica del suelo (*CEes*) 0 - 25 y 25 – 50 cm y agua de riego.

Evaluación	<i>CEes</i> 0 - 25			<i>CEes</i> 25 - 50			<i>CEi</i>
	cabecera	medio	pie	cabecera	medio	pie	
1	0,6	0,3	0,3	0,7	0,4	0,3	1,25
2	0,9	1,3	0,6	1,3	1,4	0,9	1,25
3	3,4	4,6	3,9	3,8	4,2	4,3	1,25
4	0,9	0,9	0,9	0,8	1,0	1,0	1,25
5	1,2	1,0	0,9	1,3	0,9	0,8	1,25
6	1,0	1,0	1,2	1,2	1,6	1,2	1,25
7	0,8	0,8	0,6	0,9	0,9	0,8	1,17
8	2,0	2,0	2,1	1,8	2,2	3,6	1,24
9	0,9	0,9	0,9	0,8	1,0	1,2	1,19
10	1,2	1,0	3,6	1,0	1,0	7,8	1,29
11	1,7	3,3	1,3	2,7	3,9	3,4	1,32
12	1,3	1,5	1,8	1,3	1,3	1,5	1,32
13	0,7	1,0	1,2	0,6	1,1	1,2	1,30
14	1,8	9,4	9,0	1,1	9,9	10,5	1,30
15	1,6	1,1	1,7	1,2	1,9	1,5	1,34
16	1,0	0,9	1,2	1,0	1,0	1,0	1,59
17	1,3	1,5	1,2	2,8	1,6	1,1	1,68
18	1,3	1,2	1,1	1,3	2,9	1,1	1,47
19	1,3	1,2	1,1	1,3	2,9	1,1	1,31
20	1,1	1,1	2,0	1,4	1,3	2,2	1,31
21	1,3	1,2	0,8	1,2	1,1	0,8	1,29
22	2,3	1,9	1,2	1,8	3,7	1,3	1,02
23	1,8	1,8	1,2	1,5	1,2	1,2	0,97
24	1,5	1,4	1,1	1,9	1,4	1,5	0,87
25	4,0	5,0	3,2	3,5	5,9	3,3	1,2
26	1,5	2,0	1,7	1,1	1,5	1,7	1,13
27	4,2	1,6	1,4	3,6	1,4	1,2	1,14
28	1,5	1,0	1,0	1,0	1,1	0,8	1,12
29	1,2	0,9	1,3	0,8	0,8	1,3	0,79
30	2,1	1,6	1,2	2,9	1,3	1,4	1,12

8.3.3 Infiltración

Se detalla para cada parcela evaluada, los parámetros de la ecuación de infiltración de Kostiakov (A y B), el valor de infiltración básica del suelo (Ib) y la familia de infiltración según el método del Doble Anillo de Munz (DAM), un ajuste según la lámina media aplicada a campo (DAMaj) y el estimado por el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3.

Tabla 61. Parámetros de la ecuación de infiltración de Kostiakov (A y B), infiltración básica del suelo (Ib) y familia de infiltración según el método del Doble Anillo de Munz, el método del Doble Anillo de Munz ajustado con los datos de campo y el estimado por el modelo de simulación de riego WinSRFR 4.1.3.

Doble Anillo de Munz					Doble Anillo de Munz ajustada					WINSRFR			
Evaluación	Posición	A (mm/min)	B	Ib (mm/h)	F	A (mm/min)	B	Ib (mm/h)	F	A (mm/min)	B	Ib (mm/h)	F
2	pie	7,4645	0,791	129,1	Ex.R	2,8779	0,791	49,8	Mod.R	10,4519	0,5	18,1	Mod.L
3	pie	9,4057	0,8046	179	Ex.R	1,491	0,8046	28,4	Mod.	4,4643	0,5	7,7	L
3	cabecera	6,255	0,4057	4,6	ML	18,1864	0,4057	13,5	Mod.L				
4	pie	15,165	0,6414	85	MR	2,456	0,6414	13,8	Mod.L	10,2763	0,5	17,8	Mod.L
4	cabecera	9,7535	0,5975	38,4	Mod.R	2,944	0,5975	11,6	Mod.L				
5	pie	13,927	0,7829	227,3	Ex.R	1,3042	0,7829	21,3	Mod.L	3,0855	0,5	5,3	ML
5	cabecera	22,417	0,4229	19,5	Mod.L	8,5608	0,4229	7,4	ML				
6	pie	13,927	0,7829	227,3	Ex.R	2,3343	0,7829	38,1	Mod.R	8,6755	0,5	15	Mod.L
6	cabecera	22,417	0,4229	19,5	Mod.L	11,1814	0,4229	9,7	L				
7	pie	5,6985	0,2987	1,5	ML	49,3541	0,2987	12,8	Mod.L	7,3199	0,5	12,7	Mod.L
7	cabecera	9,5044	0,5415	23,5	Mod.L	13,2976	0,5415	32,9	Mod.				
8	pie	12,901	0,2004	1,1	ML	27,2205	0,2004	2,4	ML	7,3974	0,5	12,8	Mod.L
8	cabecera	16,725	0,2135	1,7	ML	25,5362	0,2135	2,6	ML				
9	pie	1,9045	0,5319	4,3	ML	7,7768	0,5319	17,7	Mod.L	3,8213	0,5	6,6	ML
9	cabecera	5,5743	0,2824	1,2	ML	32,6593	0,2824	7,1	ML				
10	pie	13,706	0,396	9,3	L	13,5713	0,396	9,2	L	8,9879	0,5	15,6	Mod.L
10	cabecera	6,1899	0,665	41,8	Mod.R	4,7357	0,665	32	Mod.				
11	pie	7,6055	0,8755	233,5	Ex.R	1,2137	0,8755	37,3	Mod.	6,6628	0,5	11,5	L
11	cabecera	7,4176	0,2604	1,3	ML	19,8268	0,2604	3,4	ML				
12	pie	2,4821	0,1296	0,1	ML	57,243	0,1296	1,9	ML	13,6897	0,5	23,7	Mod.L
12	cabecera	5,1306	0,1642	0,3	ML	49,9947	0,1642	2,7	ML				
13	pie	10,535	0,3315	3,8	ML	209,5758	0,3315	75,8	R	9,0667	0,5	15,7	Mod.L
13	cabecera	13,855	0,4549	16,1	Mod.L	113,4889	0,4549	131,9	Ex.R				

14	pie	12,771	0,61	55,7	R	5,78	0,61	25,2	Mod.L	9,6308	0,5	16,7	Mod.L
14	cabecera	16,216	0,6227	78,3	MR	5,456	0,6227	26,4	Mod.				
15	pie	1,3811	0,4835	2,1	ML	4,0836	0,4835	6,1	ML	3,8459	0,5	6,7	ML
15	cabecera	5,6499	0,6902	46,4	Mod.R	1,6243	0,6902	13,3	Mod.L				
16	pie	2,5749	0,6005	10,4	L	4,1366	0,6005	16,7	Mod.L	5,6404	0,5	9,8	L
16	cabecera	25,953	0,3489	11,2	L	18,2288	0,3489	7,8	L				
17	pie	13,838	0,1703	0,8	ML	39,1887	0,1703	2,3	ML	12,5175	0,5	21,7	Mod.L
17	cabecera	6,8287	0,212	0,7	ML	33,8954	0,212	3,4	ML				
18	pie	13,17	0,4407	13,5	Mod.L	9,1296	0,4407	9,3	L	6,8849	0,5	11,9	Mod.L
18	cabecera	15,535	0,5021	27,4	Mod.	6,7863	0,5021	12	Mod.L				
19	pie	7,5532	0,9198	305,5	Ex.R	1,6017	0,9198	64,8	R	13,6381	0,5	23,6	Mod.L
19	cabecera	8,9039	0,8136	180,4	Ex.R	2,6655	0,8136	54	R				
20	pie	11,513	0,659	74,2	R	5,1246	0,659	33	Mod.	9,5017	0,5	16,5	Mod.L
20	cabecera	11,527	0,6759	84,7	MR	4,7968	0,6759	35,3	Mod.				
21	pie	9,5355	0,7539	126,2	Ex.R	2,9091	0,7539	38,5	Mod.R	8,2391	0,5	14,3	Mod.L
21	cabecera	14,874	0,7116	143,7	Ex.R	3,4603	0,7116	33,4	Mod.				
22	pie	6,0363	0,3982	4,2	ML	7,9701	0,3982	5,5	ML	3,3308	0,5	5,8	ML
22	cabecera	6,5735	0,3982	4,5	ML	7,9701	0,3982	5,5	ML				
23	pie	8,8826	0,536	21	Mod.L	4,4773	0,536	10,6	L	5,5255	0,5	9,6	L
23	cabecera	13,536	0,3306	4,9	ML	12,8139	0,3306	4,6	ML				
24	pie	6,2769	0,6205	29,8	Mod.	7,1308	0,6205	33,8	Mod.	10,6494	0,5	18,4	Mod.L
24	cabecera	3,4264	0,6402	19	Mod.L	6,513	0,6402	36,2	Mod.				
25	pie	9,7197	0,1222	0,3	ML	72,0551	0,1222	2,2	ML	9,3081	0,5	16,1	Mod.L
25	cabecera	10,6	0,188	0,8	ML	51,0527	0,188	3,8	ML				
26	pie	1,9349	0,5709	6,1	ML	3,497	0,5709	11,1	L	4,7573	0,5	8,2	L

26	cabecera	5,3914	0,627	27	Mod.	2,737	0,627	13,7	Mod.L				
27	pie	7,2466	0,6711	51,3	R	3,2397	0,6711	22,9	Mod.L	7,6233	0,5	13,2	Mod.L
27	cabecera	13,033	0,6185	60,9	R	4,2233	0,6185	19,7	Mod.L				
28	pie	9,2237	0,3736	5	ML	10,4389	0,3736	5,7	ML	5,7281	0,5	9,9	L
28	cabecera	2,1501	0,5612	6,3	ML	4,2951	0,5612	12,5	Mod.L				
29	pie	12,523	0,2854	2,8	ML	25,9353	0,2854	5,8	ML	4,1505	0,5	7,2	ML
29	cabecera	4,6156	0,5554	12,8	Mod.L	4,8718	0,5554	13,5	Mod.L				
30	pie	12,552	0,5585	35,8	Mod.	6,0702	0,5585	17,3	Mod.L	8,1139	0,5	14,1	Mod.L
30	cabecera	5,7958	0,6597	37,5	Mod.	3,7581	0,6597	24,3	Mod.L				
31	pie	27,03	0,6088	116,7	Ex.R	14,8604	0,6088	64,2	R	24,5186	0,5	42,5	Mod.R

8.4 Parámetros físicos del riego por superficie

8.4.1 Avance y receso.

Se detallan para cada evaluación de riego los parámetros p y r de la ecuación de avance y los parámetros a y s de la ecuación de receso.

Tabla 62. Parámetro p y r de la ecuación de avance y a y s de la ecuación de receso.

Evaluación	Avance		Receso		Evaluación	Avance		Receso	
	p	r	s	a		p	r	s	a
1	1,73	1,12	0,60	-1,03	16	10,91	0,62	0,07	7,91
2	6,80	0,67	0,88	-18,85	17	8,45	0,69	0,38	-12,86
3	2,84	0,99	0,84	-9,46	18	4,63	0,65	0,21	9,75
4	8,05	0,72	0,67	101,04	19	5,30	0,86	0,50	-0,73
5	13,70	0,69	1,89	-30,86	20	16,42	0,69	0,31	3,77
6	4,45	0,80	0,74	18,00	21	3,70	0,68	0,82	-0,84
7	4,85	0,75	0,50	31,98	22	12,46	0,59	1,51	1,16
8	2,45	0,78	0,70	27,06	23	4,62	0,82	0,96	3,95
9	6,60	0,93	0,23	0,70	24	4,28	0,70	0,62	37,46
10	3,42	0,93	0,35	8,73	25	6,63	0,75	0,23	25,14
11	11,15	0,93	0,20	-3,54	26	6,00	0,72	0,88	17,05
12	9,59	0,70	1,08	-27,59	27	5,08	0,75	0,94	6,33
13	9,31	0,70	0,64	-8,43	28	8,62	0,60	0,30	0,41
14	8,70	0,78	0,68	-4,27	29	6,17	0,68	0,17	15,36
15	6,35	0,80	0,71	1,25	30	1,25	0,97	0,45	-2,05

8.4.2 Pendiente, longitud, número de surcos o melgas regadas de manera simultánea, espaciamiento, caudales y tiempo de aplicación.

Se detallan para cada evaluación de riego: pendiente (m/m), longitud de la unidad de riego (m), caudal en compuerta (L/s), en acequia (L/s) y unitario (L/s/m) y tiempo de aplicación (min)

Tabla 63. Pendiente (m/m), longitud de la unidad de riego (m), número de surcos o melgas regadas de manera simultánea, espaciamiento, caudal en compuerta (L/s), en acequia (L/s) y unitario (L/s/m) y tiempo de aplicación (min).

EVALUACIÓN	Pendiente (m/m)	Longitud (m)	surcos / melgas regadas simultáneamente	Espaciamiento	Caudales			Tiempo de aplicación (min)
					compuerta (L/s)	acequia (L/s)	unitario (L/s/m)	
1	0,00156	154	1	13,6	55	50	3,64	65
2	0,00150	253	146	0,8	100	93	0,80	499
3	0,00265	115	1	11,2	50	39	3,53	86
4	0,00090	100	25	0,8	80	69	0,95	74
5	0,00010	100	1	9	80	69	5,59	21
6	0,00005	210	6	7,2	150	130	2,58	149
7	0,00022	136	5	12,1	141	106	2,01	95
8	0,00074	190	17	0,8	12	9	0,64	335
9	0,00176	245	2	12	175	120	5,68	46
10	0,00070	215	4	12,3	150	138	2,58	90
11	0,00097	294	1	14,6	187	170	11,64	40
12	0,00114	171	1	10	45	39	3,90	66
13	0,00099	196	1	10,3	45	42	4,08	74
14	0,00067	230	4	11,75	142	120	3,22	42

15	0,0003 8	292	4	12,7	145	90	1,76	295
16	0,0001 2	108	2	11,6	85	80	3,45	37
17	0,0010 2	245	2	12,9	49	48	2,13	147
18	0,0001 1	135	7	11,6	206	160	1,97	168
19	0,0013 9	104	3	13	130	114	2,92	40
20	0,0018 3	150	1	10,15	48	37	3,64	44
21	0,0037 4	147	52	0,8	23	18	0,44	333
22	0,0008 6	150,3	1	12,4	120	110	2,56	68
23	0,0010 7	135	2	11,2	122	90	4,03	59
24	0,0005 9	220,2	3	13,2	103	100	2,32	199
25	0,0005 2	194	6	12,6	169	146	1,93	71
26	0,0008 9	190,4	2	24,9	151	145	2,91	104
27	0,0013 9	184	2	12,2	56	50	2,76	68
28	0,0020 8	312	175	0,8	111	96	0,69	610
29	0,0009 5	190,3	3	14,7	102	97	1,81	150
30	0,0032 2	171	1	11,4	65	56	4,91	134

8.4.3 Láminas de riego

Se detallan para cada evaluación de riego: lámina aplicada, lámina consumida en el perfil de suelo explorado por las raíces, lámina consumida en 0 - 50 y lámina percolada.

Tabla 64. Lámina bruta aplicada (*db*), lámina consumida en el perfil de suelo explorado por las raíces (*dc*), lámina consumida 0 -50 y lámina percolada (*dp*) según evaluación de riego. Todos los valores expresados en mm.

Evaluación	<i>db</i>	<i>dc</i>	<i>dc 0 - 50</i>	<i>dp</i>	Evaluación	<i>db</i>	<i>dc</i>	<i>dc 0 - 50</i>	<i>dp</i>
1	92	5	33	87	16	71	23	43	48
2	94	6	24	88	17	77	17	37	60
3	79	4	36	75	18	147	34	56	113
4	42	3	8	39	19	67	23	46	44
5	70	3	16	67	20	64	43	50	21
6	110	11	43	99	21	59	48	58	11
7	84	7	17	77	22	70	51	51	19
8	67	12	31	55	23	106	38	38	68
9	64	15	40	49	24	137	72	72	65
10	65	7	16	58	25	42	24	24	18
11	95	12	15	83	26	95	63	59	32
12	90	14	25	76	27	61	40	40	21
13	92	19	51	73	28	108	32	32	76
14	35	7	21	28	29	86	45	45	41
15	107	21	26	86	30	231	63	63	168

8.5 Indicadores de desempeño del riego.

8.5.1 Eficiencia de Conducción Interna, Eficiencia de distribución, Eficiencia de aplicación y Eficiencia de aplicación razonable al método de riego.

Se detallan para cada evaluación de riego: Eficiencia de Conducción Interna (ECI), Eficiencia de distribución (EDIq), Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación razonable al método de riego (EAP_r)

Tabla 65. Eficiencias de conducción interna (ECI), Eficiencia de distribución (EDIq), Eficiencia de aplicación (EAP) y Eficiencia de aplicación razonable al método de riego (EAP_r). Todos los valores expresados en porcentaje

Evaluación	ECI	EDIq	EAP	EAP _r	Evaluación	ECI	EDIq	EAP	EAP _r
1	90	89	5	36	16	94	69	33	60
2	93	94	6	26	17	98	93	22	48
3	79	83	5	46	18	77	71	23	38
4	86	91	7	20	19	88	90	35	69
5	86	64	5	23	20	77	92	67	78
6	87	90	10	40	21	79	90	81	98
7	75	91	9	20	22	92	75	73	73
8	74	88	17	46	23	74	89	36	36
9	69	94	24	63	24	97	77	57	57
10	92	95	10	25	25	86	87	57	57
11	91	90	13	16	26	96	92	62	62
12	87	82	16	28	27	89	91	66	66
13	93	94	20	55	28	86	82	30	30
14	85	83	21	58	29	95	66	53	53
15	62	93	19	24	30	86	83	27	27

8.6 Desempeño potencial del riego

8.6.1 Eficiencias de aplicación máxima alcanzable el día del riego y potencial de manejo.

Se detallan para cada evaluación de riego el valor de la eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m) y bajo un manejo razonable del método de riego (EAP_{mr}) y la eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP_M) y de manejo razonable (EAP_{Mr}).

Tabla 66. Eficiencia de aplicación máxima alcanzable el día del riego (EAP_m) y bajo un manejo razonable del método de riego (EAP_{mr}) y la eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP_M) y de manejo razonable (EAP_{Mr}). Todos los valores expresados en porcentaje.

Evaluación	EAP_m	EAP_{mr}	EAP_M	EAP_{Mr}	Evaluación	EAP_m	EAP_{mr}	EAP_M	EAP_{Mr}
1	6	42	8	64	16	49	76	28	70
2	12	52	23	80	17	29	55	37	80
3	7	59	28	85	18	36	51	22	47
4	17	48	25	76	19	53	88	54	82
5	9	48	14	82	20	79	84	77	85
6	21	75	15	75	21	81	83	74	80
7	18	42	30	83	22	90	90	82	82
8	36	85	43	92	23	79	79	60	60
9	35	76	29	82	24	68	68	39	39
10	17	39	33	94	25	80	80	90	90
11	13	16	12	42	26	80	80	90	90
12	20	38	42	84	27	85	85	82	82
13	25	65	24	71	28	50	50	55	55
14	29	80	57	70	29	65	65	68	68
15	39	47	26	54	30	27	27	30	30

8.6.2 Caudales unitarios optimizados

Se detallan para cada evaluación de riego el valor de caudal unitario obtenido en los escenarios de optimización a través del modelo de simulación WinSRFR 4.1.3, bajo las condiciones del día del riego y las potenciales de manejo, con un manejo razonable del método de riego y el caudal máximo no erosivo.

Tabla 67. Caudal optimizado bajo las condiciones del día del riego (qu_{mr}), bajo las condiciones de manejo potenciales (qu_{Mr}), ambos para un manejo razonable del método de riego y caudal máximo no erosivo ($qu_{máx}$). Expresados en L s-1 m-1.

Evaluación	qu_{mr}	qu_{Mr}	$qu_{máx}$	Evaluación	qu_{mr}	qu_{Mr}	$qu_{máx}$
1	3,64	6,91	22,50	16	6,90	6,90	154,93
2	1,28	1,28	3,80	17	4,26	4,26	30,91
3	3,48	6,96	15,10	18	3,45	3,92	163,09
4	0,95	0,95	7,00	19	4,38	4,38	24,46
5	5,59	5,59	176,50	20	3,60	3,65	19,92
6	5,20	5,20	307,90	21	0,44	0,44	1,68
7	3,97	3,72	97,51	22	2,00	2,56	35,00
8	1,05	0,70	13,03	23	8,04	8,04	29,75
9	11,25	9,42	20,58	24	3,78	4,55	46,60
10	5,12	5,12	41,12	25	3,86	2,86	51,59
11	11,64	11,64	32,13	26	2,90	2,97	34,17
12	3,90	6,85	28,44	27	2,38	2,76	24,57
13	4,08	8,16	31,51	28	1,38	1,38	18,10
14	3,22	3,22	42,20	29	3,29	3,30	6,66
15	3,53	3,53	65,27	30	3,29	4,91	13,07

8.6.3 Láminas brutas optimizadas

Se detallan para cada evaluación de riego la lámina bruta optimizada y lámina optimizada bajo un manejo razonable del método de riego por superficie.

Tabla 68. Lámina bruta optimizada de manejo potencial (*dbopt*) y lámina bruta optimizada razonable al método (*dboptr*) para cada caso bajo estudio. Ambas expresadas en mm.

Evaluación	<i>dbopt</i>	<i>dboptr</i>	Evaluación	<i>dbopt</i>	<i>dboptr</i>
1	79	54	16	56	45
2	47	47	17	67	50
3	61	69	18	110	99
4	18	39	19	53	42
5	34	40	20	60	43
6	58	58	21	70	45
7	40	61	22	57	49
8	37	62	23	48	43
9	53	54	24	106	89
10	41	65	25	30	48
11	96	70	26	74	62
12	66	54	27	47	50
13	79	55	28	64	60
14	26	55	29	70	65
15	55	53	30	233	165

8.7. Oportunidad del riego

Se detalla para cada evaluación de riego, la fracción de agua consumida (fc) según los registros de campo y el factor de agotamiento (p) calculado según FAO (Allen, 2000) y según Noreno (1976), mencionado por Grassi (1998).

Tabla 69. Fracción de agua consumida (fc) y factor de agotamiento (p) según FAO y según Noreno.

Evaluación	fc	p FAO	p Noreno	Evaluación	fc	p FAO	p Noreno
1	0,23	0,47	0,50	16	0,51	0,26	0,42
2	0,24	0,47	0,47	17	0,23	0,26	0,38
3	0,16	0,47	0,54	18	0,51	0,26	0,42
4	0,15	0,46	0,53	19	0,39	0,26	0,41
5	0,18	0,46	0,53	20	0,77	0,26	0,40
6	0,53	0,46	0,53	21	0,72	0,22	0,36
7	0,24	0,45	0,52	22	0,50	0,25	0,40
8	0,37	0,45	0,50	23	0,54	0,25	0,37
9	0,56	0,43	0,52	24	0,83	0,25	0,40
10	0,16	0,38	0,47	25	0,22	0,26	0,40
11	0,32	0,33	0,47	26	0,41	0,26	0,39
12	0,20	0,33	0,42	27	0,37	0,26	0,38
13	0,33	0,31	0,40	28	0,38	0,25	0,39
14	0,14	0,31	0,44	29	0,45	0,31	0,45
15	0,50	0,31	0,44	30	0,54	0,36	0,44

8.7.1 Láminas de reposición óptimas.

Se detalla para cada evaluación de riego, la lámina de reposición óptima expresada en mm, según la profundidad objetivo definida en cada etapa de cultivo y para 0 – 50 calculadas a través del factor de agotamiento (p) según FAO y según Grassi.

Tabla 70. Lámina de reposición óptima según el perfil de suelo explorado por las raíces y para 0 – 50, según FAO y según Grassi.

Evaluación	Lámina de reposición óptima				Evaluación	Lámina de reposición óptima			
	Perfil de suelo explorado por las raíces		0 - 50			Perfil de suelo explorado por las raíces		0 - 50	
	FAO	Grassi	FAO	Grassi		FAO	Grassi	FAO	Grassi
1	5	10	32	34	16	23	19	20	32
2	6	12	37	37	17	17	28	27	40
3	4	15	51	59	18	34	28	28	46
4	3	10	26	30	19	23	24	22	35
5	3	10	29	33	20	43	22	24	37
6	11	11	38	44	21	48	24	22	36
7	7	16	43	50	22	51	40	25	40
8	12	16	51	57	23	38	26	18	26
9	15	14	36	44	24	72	35	22	35
10	7	20	49	61	25	24	43	28	43
11	12	18	20	29	26	63	56	37	56
12	14	30	35	45	27	40	41	28	41
13	19	23	30	39	28	32	33	21	33
14	7	23	27	39	29	45	44	30	44
15	21	18	20	29	30	63	52	43	52

8.8 Inconvenientes detectados en cada caso bajo estudio

Se detallan los indicadores de desempeño y variables de manejo y sistema más importantes a revisar en cada caso bajo estudio para un adecuado manejo del agua por gravedad en el cultivo de cebolla en el VBRC.

Tabla 71. Principales problemas encontrados sobre los indicadores de desempeño y variables de manejo y sistema para cada caso bajo estudio

caso	inconveniente observado								
	Indicadores				variables de manejo		variables de sistema		
	ECI	EAP	EDI		tc	q	Qm	Oportunidad*	
			PP	PC				S	H
1		x			x		x		x
2		x			x	x			x
3	x	x	x		x		x		x
4		x			x				x
5		x	x		x				x
6		x			x	x			
7	x	x			x	x			x
8	x					x			
9	x					x			
10	x	x				x			x
11							x		
12				x	x		x		x
13					x		x		

14		x	x		x				x
15	x					x			
16		x	x			x			
17		x			x	x			
18	x			x		x			
19						x			
20	x				x			x	
21	x				x			x	
22		x	x		x			x	
23	x				x	x		x	
24				x		x		x	
25						x			
26					x	x			
27		x			x				
28				x		x			
29		x		x		x			
30		x					x		

*“S” indica: regó habiendo superado ampliamente el umbral de riego (seco); “H” indica: regó considerablemente antes de alcanzar el umbral de riego.

8.9 Fracción de lixiviación

Se detalla para cada evaluación de riego la lámina de percolación (d_{per}) o altura de agua necesaria para lixiviar las sales disueltas durante el cultivo de cebolla y por etapa de cultivo para cada caso bajo estudio según Van der Molen (1983) y según Rhoades (1992).

Tabla 72. Lámina de percolación (d_{per}) o de lixiviación de sales para el ciclo y por etapa de cultivo según Van der Molen (1983) y Rhoades (1992).

Evaluación	Rhoades ciclo (mm)	Van der Molen ciclo (mm)	Van der Molen por etapa (mm)			Evaluación	Rhoades ciclo (mm)	Van der Molen ciclo (mm)	Van der Molen por etapa (mm)		
			E1	E2	E3				E1	E2	E3
1	190	639	0	255	248	16	246	884	0	376	414
2	275	433	0	148	91	17	261	683	0	310	379
3	206	403	53	212	311	18	305	555	0	245	285
4	206	488	0	199	202	19	254	443	0	193	221
5	206	481	0	201	212	20	219	471	0	211	251
6	225	450	0	185	189	21	219	538	0	233	263
7	206	469	0	191	192	22	215	304	1	142	182
8	253	552	20	266	354	23	214	294	0	113	101
9	204	434	0	177	179	24	151	231	0	99	109
10	194	377	10	180	237	25	133	377	50	198	291
11	215	409	20	200	269	26	196	365	0	164	196
12	204	463	0	208	250	27	242	492	18	237	315
13	204	554	0	242	279	28	184	402	0	171	187
14	217	389	73	214	330	29	180	206	0	81	76
15	236	513	0	226	264	30	158	455	0	205	247

8.10 Eficiencia de aplicación potencial según balance salino

Se detalla para cada evaluación de riego la eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs), calculada para el ciclo de cultivo según la *dper* estimada por Rhoades (1992) y Van der Molen (1983) y la EAPs por etapa de cultivo para cada caso bajo estudio según el requerimiento de lixiviación estimado a través de la ecuación propuesta por Van der Molen (1983)

Tabla 73. Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs), según el valor de *dper* calculado por Rhoades (1992) y Van der Molen (1983) para el ciclo de cultivo.

Evaluación	EAPs (%)		Evaluación	EAPs (%)	
	<i>Rhoades</i>	<i>Van der Molen</i>		<i>Rhoades</i>	<i>Van der Molen</i>
1	71	43	16	66	35
2	63	52	17	64	41
3	70	54	18	61	46
4	70	49	19	65	52
5	70	50	20	68	50
6	68	51	21	68	47
7	70	50	22	69	61
8	65	46	23	69	62
9	70	52	24	76	67
10	71	56	25	78	56
11	69	54	26	71	56
12	70	51	27	66	49
13	70	46	28	72	54
14	68	55	29	72	70
15	67	48	30	75	51

Tabla 74. Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAPs) en cada etapa de cultivo según el caso bajo estudio.

Evaluación	EAPs (%)			Evaluación	EAPs (%)		
	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>		<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>E3</i>
1	100	45	52	16	100	36	40
2	100	59	75	17	100	40	42
3	2	50	47	18	100	46	49
4	100	51	57	19	100	52	55
5	100	51	56	20	100	50	52
6	100	53	59	21	100	48	51
7	100	53	59	22	43	60	60
8	5	44	43	23	100	65	73
9	100	54	60	24	100	68	71
10	9	54	53	25	2	52	48
11	5	51	50	26	100	56	58
12	100	50	52	27	5	47	46
13	100	47	49	28	100	55	59
14	1	50	45	29	100	72	78
15	100	48	51	30	100	51	52

La cebolla es el cultivo hortícola de mayor relevancia del valle bonaerense del río Colorado (Argentina) y el principal demandante de agua. Durante los últimos diez años, la escasa acumulación de nieve en la cordillera redujo la disponibilidad y calidad del agua de riego.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar el riego por superficie de cebolla, calificar su desempeño actual y potencial a través de indicadores y detectar los puntos críticos sobre los cuales proponer alternativas de manejo que aumenten la eficiencia de riego.

En la campaña 2015 - 2016 se realizaron 30 evaluaciones de riego, abarcando homogéneamente el ciclo de cultivo y la superficie del valle. Se utilizó el software WinSRFR 4.1.3 para modelar el riego. Según los resultados obtenidos la eficiencia de conducción interna es 85% y la eficiencia de distribución 86%. Por su parte, la eficiencia de aplicación actual promedio es 30% y la eficiencia de aplicación razonable al método 46%, con incrementos a medida que avanzan las etapas de cultivo.

Durante la emergencia y establecimiento, el cultivo se riega antes de lo recomendado desde la perspectiva de balance hídrico, pero existen otros usos racionales del agua en ese periodo.

También se destaca la fracción de lavado como un volumen beneficioso para la sostenibilidad del sistema. Según los escenarios de optimización, la eficiencia de aplicación podría aumentar en términos absolutos un 16% para las condiciones del día del riego y 26% bajo un manejo potencial del método. Esto, mediante prácticas de manejo a campo que no requieren inversión, como el aumento del caudal unitario por reducción del frente de riego o el ingreso en turnados y la disminución del tiempo de aplicación. A través de las mejoras propuestas, podría reducirse entre 31 y 45% las hectáreas de concesión necesarias por hectárea de cebolla cultivada.

ISSN 0328-3399 Informe técnico N° 71



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Argentina