



DESEMPEÑO DEL RIEGO POR SUPERFICIE EN EL ÁREA DE
REGADÍO DE LA CUENCA DEL RÍO TUNUYÁN SUPERIOR,
MENDOZA ARGENTINA

AUTOR

ING. AGR. CARLOS SCHILARDI

DIRECTOR

ING. AGR. MS. SC. JOSÉ MORÁBITO

MAESTRÍA EN RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

NOVIEMBRE DE 2010

DESEMPEÑO DEL RIEGO POR SUPERFICIE EN EL ÁREA DE REGADÍO DE LA CUENCA DEL RÍO TUNUYÁN SUPERIOR, MENDOZA, ARGENTINA

RESUMEN

El área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior está ubicada en Mendoza - Argentina, a los 33° 34' de latitud Sur y 69° 00' de longitud Oeste, está conformada por los departamentos de Tupungato, Tunuyán y San Carlos y cuenta con una superficie de 51.484 ha con derechos de riego superficial (DGI, 2004)., siendo indispensable el desarrollo de indicadores que permitan conocer la eficiencia del uso del agua para riego, detectando los principales problemas y soluciones para un desarrollo sustentable de la cuenca.

El objetivo general del estudio es conocer el grado de aprovechamiento del agua de riego en el interior de las propiedades agrícolas del área de influencia del río Tunuyán en su tramo superior y estimar las eficiencias potenciales factibles de alcanzar considerando los posibles cambios operativos y el balance salino. En la cuenca predominan los métodos de riego por escurrimiento superficial con desagüe al pie. Se utilizó la metodología de Walker & Skogerboe (1987) y los estándares de ASAE (2000). Para la cuantificación de los parámetros desempeño, que califican los métodos de riego, se utiliza la metodología definida por la ASCE (American Society of Civil Engineers, Burt et al 1997).

Los resultados indican que predomina el método de riego por surcos con desagüe, texturas de suelo franco arenosas, pendientes del 0,87%, salinidad de suelo de 0-100 cm: 1,12 dS m⁻¹, salinidad del agua de riego: 0,70 dS m⁻¹; caudales de manejo y unitario de 53 L s⁻¹ y 1,24 L s⁻¹m⁻¹ respectivamente, longitud de la parcela de riego 123 m, tiempo de aplicación de 7 hs y la infiltración básica de los suelos es de 5,3 mm h⁻¹.

Resultó una eficiencia de riego en finca baja (39%), con eficiencias de conducción, aplicación, almacenaje y distribución de 91%, 43%, 99% y 91% respectivamente. La eficiencia potencial a alcanzar en la zona, mejorando el manejo del riego en finca sería del 68 % y considerando el balance salino del suelo, sería del 90 %.

La principal causa de las bajas eficiencias observadas a campo para la zona bajo estudio es el excesivo tiempo de aplicación o corte. Para cada zona de manejo las principales causas son: a) zona norte: bajos caudales unitarios, b) zona centro norte: deficiente nivelación c) zona centro sur: excesivos caudales unitarios y d) zona sur: deficiente nivelación.

Los modelos de simulación utilizados resultaron de utilidad para interpretar las evaluaciones de riego realizadas a campo en cada caso en particular, como así también para el planteo de escenarios de optimización de los sistemas de riego evaluados.

Palabras clave: **riego superficial, indicadores de desempeño, cuenca río Tunuyán Superior**

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1 Desempeño del riego superficial.....	18
1.1.1 Variables físicas y de manejo.....	18
1.1.1.1 Velocidad de infiltración del agua en el suelo.....	19
1.1.1.2 Avance y receso del frente de agua.....	23
1.1.1.3 Caudal de manejo y caudal unitario.....	25
1.1.1.4 Pendiente, longitud, número de surcos y/o melgas regadas y tiempo de aplicación de la unidad de riego.....	26
1.1.1.5 Geometría de surco y melga.....	27
1.1.2 Láminas de riego.....	30
1.1.3 Parámetros del desempeño del riego superficial.....	31
1.1.4 Modelos y aplicaciones de diseño y evaluación de riego por escurrimiento superficial.....	36
1.2 Objetivos.....	39
1.3 Hipótesis de trabajo.....	40
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	41
2.1 Consideraciones generales.....	41
2.2 Metodología de campo.....	43
2.3 Metodología en gabinete y laboratorio.....	44
2.3.1 Caracterización de parámetros físicos y de manejo.....	44
2.3.2 Modelos matemáticos de simulación y evaluación del desempeño del riego.....	46
2.3.2 Cálculo de láminas de riego.....	46
2.3.4 Cálculo de parámetros de desempeño del riego.....	47
2.3.4.1 Caracterización del desempeño del riego.....	47
2.3.4.2 Estimación del error de muestreo.....	48
2.3.5 Análisis de muestras de suelo y agua en laboratorio.....	48
2.3.5.1 Determinación de la eficiencia de distribución según muestras de humedad de suelo obtenidas a campo (EDI_H).....	49
2.3.5.2 Evaluación de la respuesta de la salinidad del suelo a diferentes factores.....	50
2.3.6 Relación entre la salinidad del suelo y el desempeño del riego.....	50
2.3.7 Análisis de la variación de la salinidad del agua de riego superficial en bocatoma de finca en las distintas zonas de manejo.....	51
2.3.8 Desempeño potencial del riego.....	51
2.3.8.1 Desempeño del riego potencial según el manejo del método de riego (EAP_M).....	52
2.3.8.2 Desempeño del riego potencial según el balance salino de suelo explorado por las raíces de los cultivos (EAP_S).....	53
2.3.9 Comparación entre eficiencias de aplicación potenciales obtenidas por diferentes métodos de riego.....	55
2.3.10 Escenarios de optimización.....	55

3. RESULTADOS.....	57
3.1 Evaluaciones realizadas, fechas, cultivos y métodos de riego.....	57
3.2 Parámetros físicos y de manejo.....	60
3.2.1 Infiltración.....	60
3.2.2 Avance.....	62
3.2.3 Geometría del surco.....	63
3.2.4 Caudal de manejo y unitario.....	66
3.2.5 Pendiente longitudinal, tiempo de aplicación y número de surcos o melgas regados simultáneamente.....	67
3.2.6 Longitud de surcos y melgas.....	67
3.3 Láminas de Riego.....	68
4.3.1 Análisis de láminas de riego.....	68
3.4 Parámetros de desempeño del riego por superficie.....	69
3.4.1 Indicadores de percolación profunda y por escurrimiento al pie.....	73
3.4.2 Estimación de error de muestreo para EAP, EAL y EDI.....	75
3.4.3 Determinación de la eficiencia de distribución según muestras de humedad de suelos obtenidas a campo (EDIH).....	76
3.5 Análisis de la salinidad en la rizósfera de los cultivos del área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	77
3.5.1 Estimación del error de muestreo para CEes.....	79
3.5.2 Relación de CEes y la eficiencia de riego.....	80
3.6 Variación de la salinidad del agua de riego superficial (bocatoma de finca) en las distintas zonas de manejo.....	81
3.6.1 Estimación de error de muestreo para CEagua.....	82
3.6.2 Gramos de sales aportadas por litro de agua de riego por zona de manejo.....	84
3.7 Desempeño potencial del riego.....	88
3.7.1 Desempeño potencial del riego según el manejo del método de riego.....	85
3.7.1.1 Percolación profunda, escurrimiento al pie, actual y potencial según el manejo del método de riego.....	86
3.7.2 Eficiencias de aplicación potenciales considerando el balance salino.....	86
3.7.3 Comparación entre eficiencias de aplicación potenciales obtenidas por diferentes métodos.....	89
3.8 Escenarios de optimización del riego superficial.....	91
3.8.1 Escenarios de optimización - zona norte.....	92
3.8.2 Escenarios de optimización – zona centro norte.....	93
3.8.3 Escenarios de optimización – zona centro sur.....	96
3.8.4 Escenarios de optimización – zona sur.....	99
3.8.5 Validación de escenarios de optimización.....	101

4. DISCUSION.....	103
5. CONCLUSIONES.....	109
6. RECOMENDACIONES.....	111
7. BIBLIOGRAFIA.....	115
8. ANEXO.....	125

LISTA DE ABREVIATURAS

a	coeficiente que representa la velocidad de infiltración a $t = 1$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-(1+b)}$)
<i>a</i>	parámetro empírico de la ecuación de infiltración de K-L
A	coeficiente de la ecuación de infiltración de Kostiakov
<i>A</i>	área de sección transversal de surco (m^2)
<i>Ao</i>	área de sección de flujo en cabecera (m^2)
b	exponente de velocidad de infiltración, siempre con valores entre 0 a -1.
B	exponente de la ecuación de Kostiakov
$\pm B$	límite del error de muestreo para la confiabilidad que fija z
<i>Base</i>	fondo o ancho inferior de surco (m)
c	cantidad de agua almacenada en grietas del suelo una vez iniciado el riego ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{min}^{-1}$)
<i>c/D</i>	con desagüe
CEagua	conductividad eléctrica del agua de riego en dS m^{-1} a 25°C
CE	conductividad eléctrica en dS m^{-1} a 25°C
CEes	conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en dS m^{-1} a 25°C
CEesf	conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo final en dS m^{-1} a 25°C
CEesi	conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo inicial en dS m^{-1} a 25°C
CEescab	conductividad eléctrica del extracto de saturación promedio de suelo en cabeza de unidad de riego en dS m^{-1} a 25°C
CEesmed	conductividad eléctrica del extracto de saturación promedio de suelo en la mitad de la longitud de la unidad de riego en dS m^{-1} a 25°C
CEespie	conductividad eléctrica del extracto de saturación promedio de suelo al pie de la unidad de riego en dS m^{-1} a 25°C
CEespr	conductividad eléctrica del extracto de saturación promedio de suelo de la unidad de riego en dS m^{-1} a 25°C
<i>CV</i>	coeficiente de variación de la CEes para las dos profundidades de suelo y las tres ubicaciones dentro de la parcela (%)
<i>CV1</i>	coeficiente de variación de la CEes del primer estrato de suelo para todas las ubicaciones dentro de cada parcela (%)
<i>CV2</i>	coeficiente de variación de la CEes del segundo estrato de suelo para todas las ubicaciones dentro de cada parcela (%)
\underline{d}	lámina infiltrada en un punto del perfil del suelo (mm)
\bar{d}	lámina infiltrada promedio en todo el perfil del suelo (mm)
$d_{1/4}$	lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado en el perfil del suelo (mm)
D	profundidad de suelo explorado por las raíces (mm)
dal	lámina almacenada en el perfil del suelo explorado por las raíces del cultivo (mm)
db	lámina bruta (mm)
de	lámina escurrida al pie de la parcela de riego (mm)
dinf	lámina infiltrada en el perfil del suelo regado (mm)
dper	lámina percolada (mm)
dper _s	lámina de precolación a aplicar con el riego para mantener al balance salino del suelo (mm)
dr	lámina de reposición u objetivo (mm)
dropt	lámina de reposición optima (mm)
ϵ_{ij}	error de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento
EAL	eficiencia de almacenaje (%)

EAP	eficiencia de aplicación (%)
EAP _{90%MH}	eficiencia de aplicación potencial según contenido de sales en la rizósfera que asegure una producción del 90% del máximo del cultivo, según Maas Hoffman (%)
EAP _{BalSal}	eficiencia de aplicación potencial según el requerimiento de lixiviación (%)
EAP _M	eficiencia de aplicación según manejo (%)
EAP _{presurizado}	eficiencias de aplicación factibles a alcanzar utilizando sistemas de riego por goteo o microaspersión (%)
EAP _{pulso}	eficiencias de aplicación factibles a alcanzar utilizando sistemas de riego por pulso (%)
EAP _s	eficiencia de aplicación potencial según contenido de sales en la rizósfera que asegure la producción del máxima del cultivo, según Maas Hoffman (%)
ECI	eficiencia de conducción interna (%)
EDI	eficiencia de distribución (%)
EDI _H	eficiencia de distribución (%), calculada según muestras de humedad de suelo
EDI _a	eficiencia de distribución absoluta (%)
Ep	porcentaje de escurrimiento al pie (%)
ER	eficiencia de riego (%)
ERFIN	modelo de eficiencia de riego en finca
ERI	eficiencia de riego interna (%)
ET _c	evapotranspiración del cultivo (mm año ⁻¹)
f	eficiencia de lavado (fracción)
fo	velocidad de infiltración básica en unidades de volumen, longitud y tiempo (m ³ m ⁻¹ min ⁻¹)
F	número de Fraude
Fn	familia de curva de infiltración
γ _{ij}	respuesta de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento
γ ₁ y γ ₂	parámetros de ajuste de las funciones exponenciales empíricas que se establecen entre el perímetro mojado (WP) en función del tirante (y)
g	aceleración de la gravedad (9,81 m s ⁻²)
i	intervalo de tiempo considerado
I	velocidad de infiltración (mm minuto ⁻¹ o mm hora ⁻¹)
I _{cum}	infiltración acumulada en un tiempo t (mm)
k	coeficiente empírico de la ecuación de infiltración de Kostiakov - Lewis
K _c	coeficiente de cultivo
M	melgas
μ	media general
n	número de muestras realizadas
n	coeficiente de rugosidad de Manning
p	coeficiente empírico que representa la distancia que avanza el frente de agua en el primer minuto
PEA	peso específico aparente (g cm ⁻³)
PP	precipitación efectiva (mm)
Pp	porcentaje de percolación profunda
ρ ₁ y ρ ₂	parámetros de ajuste de las funciones exponenciales empíricas que se establecen entre el área (A) y el radio hidráulico (R) del surco en función del tirante de agua (y)
Q	caudal (m ³ s ⁻¹ - L s ⁻¹ - m ³ min ⁻¹)
Q _{en}	caudal entrado (L s ⁻¹)
Q _m	caudal de manejo (L s ⁻¹)

Q_o	caudal de entrada al surco y/o melga por unidad de tiempo ($m^3 \text{ min}^{-1}$)
Q_{sa}	caudal de salida o escurrido ($L \text{ s}^{-1}$)
q_u	caudal unitario (sucos = $L \text{ s}^{-1}$) (melgas = $L \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$)
r	exponente empírico de la ecuación de avance cuyo valor es menor que 1
R	radio hidráulico (m)
RL	requerimiento de lixiviación (mm)
s/D	sin desagüe
s	exponente del caudal unitario en la ecuación de avance
σ_y	factor de forma de almacenaje superficial, asume valores desde 0,70 a 0,80 (0,77)
σ_1 y σ_2	parámetros de ajuste de las funciones exponenciales empíricas que se establecen entre el área del frente del flujo (A) en función del tirante de agua (y)
SD	desviación típica muestral como estimador de la desviación típica poblacional.
SIRMOD	Surface Irrigation Model
S_o	pendiente del terreno o de riego ($m \text{ m}^{-1}$)
S_t	pendiente debida a la fricción ($m \text{ m}^{-1}$)
τ	tiempo de oportunidad (minutos)
τ_j	efecto del j-ésimo tratamiento
t	tiempo (minutos)
$t_{L/2}$	tiempo de avance a la mitad del largo total del surco o melga (minutos)
t_L	tiempo de avance a la longitud total del surco o melga (minutos)
T	ancho superior del surco para distintos valores del tirante y (m)
T_{max}	ancho superior de surco (m)
T_{mid}	ancho medio de surco (m)
V_{di}	volumen de agua por unidad de ancho o surco que representa la subirrigación ($m^3 \text{ m}^{-1}$)
V_{dp}	volumen de agua por unidad de ancho o surco que percola de la rizósfera ($m^3 \text{ m}^{-1}$)
V_{en}	volumen entrado
V_{inf}	volumen infiltrado
$V_{requerido}$	volumen requerido
V_{rz}	volumen de agua por unidad de ancho o surco que se almacena en la rizósfera ($m^3 \text{ m}^{-1}$)
V_{sa}	volumen salido
VS	volumen de sedimentación (mL % g)
V_{tw}	volumen de agua por unidad de ancho o surco que escurre de la parcela ($m^3 \text{ m}^{-1}$)
W	espaciamiento o ancho de la unidad de riego (m)
W_c	capacidad de campo del suelo (g % g)
WinSRFR	Modelo de análisis, diseño y simulación del riego por superficie
W_m	punto de marchitamiento permanente (g % g)
x	distancia alcanzada por el frente del agua a tiempo t (m)
x_L	longitud total de surco o melga (m)
y	tirante de agua (m)
Y_{max}	tirante máximo de surco (m)
z	volumen infiltrado por unidad de longitud en tiempo de oportunidad t , de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis ($m^3 \text{ m}^{-1} \text{ min}^{-1}$)
Z	percentil de la distribución normal. Para un 95 % de confiabilidad $z = 1,96$

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Familia de curvas de infiltración en riego por superficie (Walker, 2003).....	22
Tabla 2: Infiltración a 6 hs en mm h^{-1} , referenciada a las familias de curvas de infiltración (Walker et al, 2006).....	22
Tabla 3: Calificación de eficiencias de aplicación, almacenaje y distribución en parcela para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985).....	35
Tabla 4: Eficiencias de riego medias para la zona de Arroyo Claro (Salatino et al, 1992)	36
Tabla 5: Inspecciones y/o Asociaciones de Usuarios del río Tunuyán Superior según zonas de manejo.....	42
Tabla 6: Categoría de surcos por intervalos de ancho superior.....	45
Tabla 7a.1: Cantidad de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.....	57
Tabla 7a.2: Porcentaje de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.....	58
Tabla 7b.1: Cantidad de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.....	58
Tabla 7b.2: Porcentaje de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.....	58
Tabla 7c: Resumen porcentual del la distribución del método de riego por zona de análisis y bajo toda la cuenca irrigada.....	59
Tabla 8: Célula de cultivo de cuenca evaluada.....	60
Tabla 9: Parámetros de la ecuación de Kostiakov para las distintas unidades de suelo del área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior. A y B: coeficiente y exponente de la ecuación de infiltración de Kostiakov, N de Fincas evaluadas, N pares de datos utilizados, Ib: infiltración básica, T100: tiempo en infiltrarse 100 mm de agua, F: valor de la familia de infiltración.....	61
Tabla 10: Estimación de parámetros de avance “p” y “r” según ecuación (12) para el frente de agua en función del método de riego para el área irrigada de la cuenca del río TunuyánSuperior.....	63

Tabla 11: Estimación de parámetros de avance “u”, “s” y “r” según ecuación (13) para el frente de agua en función del método de riego para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	63
Tabla 12: Parámetros físicos de surco, ancho superior, ancho medio, ancho inferior y tirante (cm).....	63
Tabla 13: Coeficientes calculados para las distintas categorías de surcos consideradas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	64
Tabla 14: Parámetros hidráulicos de surcos según categoría: área de frente de flujo (A), perímetro mojado (WP) y área de sección transversal de surco (Ao).....	65
Tabla 15: Valores medios y desviación estándar del caudal de manejo (Qm) y unitario (qu) según zona de manejo y método de riego para la cuenca irrigada del río Tunuyán Superior.....	66
Tabla 16: Valores medio y desviación estándar referidos a la pendiente longitudinal, tiempo de aplicación y número de surcos y melgas evaluados simultáneamente para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	67
Tabla 17: Valores medios y desviación estándar de la longitud de surcos y melgas según cultivo y método de riego, cuantificados en función del cuartel de riego (Long Cuartel m) y según los encadenamientos realizados en el riego (Long Finca m).....	67
Tabla 18: Lámina de reposición (dr), lámina bruta (db), lámina infiltrada (dinf), lámina escurrida (de), lámina almacenada (dal) y lámina percolada (dper), expresadas en mm, agrupadas según estación del año, cultivo y método de riego para la zona bajo riego del río Tunuyán Superior.....	68
Tabla 19: Media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) de ECI, EAP, EAL, EDI (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo, método de riego y criterio de análisis para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	69
Tabla 20: Eficiencias de riego medias agrupadas por zona de manejo y según cultivo para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	71
Tabla 21: Eficiencias de riego medias agrupadas por zonas de manejo y según el método de riego para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	71
Tabla 22: Eficiencias de riego medias agrupadas según método de riego y cultivo para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	72
Tabla 23: Eficiencias de riego medias agrupadas según zona de manejo y período de estudio para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	72

Tabla 24: Eficiencias de riego medias agrupadas por zona de manejo, según cultivo y método de riego para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	72
Tabla 25: Media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) de Pp y Ep (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo y método de riego para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	73
Tabla 26: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por zonas de Manejo.....	74
Tabla 27: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por estación del año.....	74
Tabla 28: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por cultivo.....	74
Tabla 29: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por método de riego.....	75
Tabla 30: Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de muestra para EAP, EAL, EDI, Pp y Ep ($1-\alpha = 0,95$).....	75
Tabla 31: Media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) de EDI _H (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo y método de riego para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	77
Tabla 32: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) según zona de riego para toda el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior, expresada en dS m ⁻¹ a 25°C.....	77
Tabla 33: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (S) y error de muestreo (B) según cultivo para toda el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior, expresada en dS m ⁻¹ a 25°C.....	77
Tabla 34: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) para los diferentes puntos de muestreo dentro de las parcelas regadas según método de riego, para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	78
Tabla 35: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) de los dos estratos de suelos analizados para todas las propiedades estudiadas bajo el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior por método de riego, expresada en dS m ⁻¹ a 25°C.....	78
Tabla 36: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) de las diferentes categorías consideradas para el	

factor “método de riego”, del área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	79
Tabla 37: Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de la muestra para CEes ($1-\alpha = 0,95$).....	79
Tabla 38: CEagua media del agua superficial de riego, desviación típica (SD) y error de muestreo (B) agrupada por el factor zona de riego para el área irrigada del río Tunuyán Superior, expresada en dS m^{-1} a 25°C	81
Tabla 39: Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de muestra para CEagua ($1-\alpha = 0,95$).....	83
Tabla 40: Eficiencia de aplicación potencial media según manejo del riego (EAP_M), según: zona de manejo, estación del año, cultivo, método de riego y para el área bajo regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	85
Tabla 41: Percolación profunda y escurrimiento al pie (P_p y E_p) actuales y potenciales, medias según: zona de manejo, estación del año, cultivo, método de riego y para el área bajo regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	86
Tabla 42: Impacto de las variables analizadas sobre las eficiencias de aplicación potencial considerando el balance salino EAP_S medias (expresadas en porcentaje \pm desviación estándar) considerando el balance salino de cada una de las variables analizadas.....	87
Tabla 43: Eficiencia de aplicación media considerando el balance salino (EAP_S - expresadas en porcentaje \pm desviación estándar) según análisis de sensibilidad de cada una de las variables analizadas.....	87
Tabla 44: Eficiencia de aplicación media considerando el balance salino (EAP_S - expresada en porcentaje) por zona de manejo y según CEes suelo final del área de influencia del río Tunuyán Superior.....	88
Tabla 45: Eficiencia de aplicación media considerando el balance salino (EAP_S) (expresada en porcentaje) por zona de manejo y según CEagua de riego del río Tunuyán Superior.....	88
Tabla 46: CEes correspondiente al 90 y 100% de producción del cultivo, ponderada por zona de manejo, según la proporción de cada cultivo en cada una de ellas; y variación de la CEes umbrales respecto a la CEes actual.....	88
Tabla 47: Eficiencia de aplicación media considerando el balance salino (EAP_S - expresada en porcentaje) por zona de manejo y según CEesf del área de influencia del río Tunuyán Superior.....	88

Tabla 48: Eficiencias de aplicación potenciales factibles a alcanzar en cada una de las zonas de manejo del río Tunuyán Superior.....	91
Tabla 49: Eficiencia de conducción interna (ECI), aplicación (EAP), distribución (EDI) y eficiencia de almacenaje (EAL) para las campañas de muestreo 1992 y 2008.....	106
Tabla 50: Propiedades evaluadas durante el período 2007-2008.....	125
Tabla 51: Salinidad de agua de riego y suelos en las propiedades evaluadas.....	126
Tabla 52: Láminas de riego en las propiedades evaluadas.....	127
Tabla 53: Caracterización de suelo y lámina de reposición de las propiedades evaluadas	129
Tabla 54: Parámetros físicos del riego superficial en las propiedades evaluadas.....	131
Tabla 55: Eficiencias de riego actuales en las propiedades evaluadas.....	132
Tabla 56: Eficiencias de riego potenciales de manejo en las propiedades evaluadas.....	134
Tabla 57 Precipitación total y efectiva de la estación La Consulta y estación San Carlos.....	135
Tabla 58: Evapotranspiración de los cultivos (mm) en la estación meteorológica La Consulta.....	136
Tabla 59: Evapotranspiración de los cultivos (mm) en la estación meteorológica San Carlos.....	137
Tabla 60: Profundidad de suelo explorado por las raíces de los cultivos.....	138
Tabla 61: Conductividad eléctrica del estrato de saturación del suelo y conductividad eléctrica del agua superficial, según zona de manejo del río Tunuyán Superior (Schilardi et al, 2010).....	138
Tabla 62: Eficiencia de lavado y capacidad de campo según textura de suelo.....	138
Tabla 63: Célula de cultivo por zona de manejo del río Tunuyán Superior, y conductividad eléctrica del extracto de saturación conducente a una producción del 90 y 100% según Pizarro (1996) y de 100% según Vallone y Nijensohn (2002) por cultivo.....	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fases del riego por superficie.....	23
Figura 2: Hidrograma de entrada y salida.....	26
Figura 3: Área transversal de surco.....	29
Figura 4: Resumen hidráulico del agua aplicada a la parcela.....	31
Figura 5: Mapa del área de estudio: a) localización de las propiedades evaluadas, delimitación de cuenca y zonas de manejo; b) estaciones meteorológicas y sus correspondientes polígonos de Thiesen; referidas al área irrigada de la cuenca del río Tunuyán superior.....	59
Figura 6: a) Célula de cultivo de cuenca evaluada y b) Célula de cultivo cuantificada mediante imágenes satelitales Quik Bird (Diciembre – 2006 – DGI).....	60
Figura 7: Ecuación potencial que ajusta a la totalidad de los ensayos de infiltración realizados en el área regadía del río Tunuyán Superior.....	61
Figura 8: Curvas de infiltración características de las unidades de suelos del área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	62
Figura 9: Distancia avanzada por el frente de agua para distintos tiempos en el área irrigada por el río Tunuyán Superior.....	62
Figura 10: Corte transversal de surcos para cada una de las distintas categorías consideradas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	64
Figura 11: Frecuencias observadas de las distintas categorías de surcos para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	65
Figura 12: Variación del tamaño de muestra en función del error de estimación respecto a la media para las variables EAP, EAL y EDI, ($1-\alpha=0,95$).....	76
Figura 13: Variación del tamaño de la muestra en función del error de estimación de CEes con respecto al valor de la media ($1-\alpha = 0,95$).....	80
Figura 14: Coeficiente de variación de CEes de todo el estrato de suelo analizado (CV) en métodos de riego sin desagüe y para cultivos frutícolas versus eficiencia de distribución en las parcelas bajo estudio del área irrigada del río Tunuyán Superior.....	81
Figura 15: Aumento relativo (expresado en porcentaje) de la conductividad eléctrica del agua de riego para las distintas zonas de manejo de la cuenca del río Tunuyán Superior.....	82

Figura 16: Variación del tamaño de la muestra en función del error de estimación de la CEagua respecto al valor de la media ($1-\alpha = 0,95$).....	83
Figura 17: Salinidad media del agua superficial de riego y salinidad promedio de suelo (0-100 cm), para el área irrigada del río Tunuyán Superior, expresada en dS m^{-1} a 25°C	84
Figura 18: Cantidad de sales ($\text{T ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) aportadas al suelo por el agua de riego para un volumen de agua entregado de $7000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	85
Figura 19: Eficiencia de aplicación actual (Modelada bajo SIRMOD) y eficiencias de aplicación potenciales en las distintas zona de manejo del río Tunuyán Superior.....	89
Figura 20: Diferencias entre eficiencias de “aplicación actual y potencial”, en cada una de las zonas de manejo y para el río Tunuyán Superior.....	91
Figura 21: Zona norte, cultivo frutícola, $\text{dr} = 50 \text{ mm}$	92
Figura 22: Zona norte, cultivo frutícola, $\text{dr} = 70 \text{ mm}$	93
Figura 23: Zona norte, cultivo frutícola, $\text{dr} = 80 \text{ mm}$	93
Figura 24: Zona centro norte, cultivo frutícola, $\text{dr} = 50 \text{ mm}$	94
Figura 25: Zona centro norte, cultivo frutícola, $\text{dr} = 70 \text{ mm}$	94
Figura 26: Zona centro norte, cultivo frutícola, $\text{dr} = 100 \text{ mm}$	94
Figura 27: Zona centro norte, cultivo hortícola, $\text{dr} = 30 \text{ mm}$	95
Figura 28: Zona centro norte, cultivo hortícola, $\text{dr} = 30 \text{ mm}$	95
Figura 29: Zona centro norte, cultivo hortícola, $\text{dr} = 30 \text{ mm}$	96
Figura 30: Zona centro sur, cultivo frutícola, $\text{dr} = 50 \text{ mm}$	96
Figura 31: Zona centro sur, cultivo frutícola, $\text{dr} = 70 \text{ mm}$	97
Figura 32: Zona centro sur, cultivo frutícola, $\text{dr} = 100 \text{ mm}$	97
Figura 33: Zona centro sur, cultivo hortícola, $\text{dr} = 30 \text{ mm}$	98
Figura 34: Zona centro sur, cultivo hortícola, $\text{dr} = 40 \text{ mm}$	98
Figura 35: Zona centro sur, cultivo hortícola, $\text{dr} = 50 \text{ mm}$	98

Figura 36: Zona sur, cultivo hortícola, dr =30 mm.....	99
Figura 37: Zona sur, cultivo hortícola, dr =40 mm.....	99
Figura 38: Zona sur, cultivo hortícola, dr = 50 mm.....	100
Figura 39: Zona sur, cultivo frutícolas, dr = 50 mm.....	100
Figura 40: Zona sur, cultivo frutícolas, dr = 70 mm.....	101
Figura 41: Zona sur, cultivo frutícolas, dr = 100 mm.....	101
Figura 42: Comparación de EAP optimizadas con los modelos SIRMOD y WINSRFR.....	102

1. INTRODUCCIÓN

El 70% de la extracción total del agua del planeta es utilizada en la agricultura, con un porcentaje cercano al 85% cuando se consideran solamente los países en desarrollo (FAO, 2008). A medida que mejora el bienestar global, se incrementa la demanda de agua por parte de los sectores o usuarios no agrícolas del recurso agua. El suministro doméstico de agua, la industria y el propio medio ambiente, están ahora en competencia directa con el sector agropecuario por recursos hídricos cada vez más escasos. Como consecuencia, la competencia por esos recursos hídricos conduce a que el sector agropecuario tenga que revisar y ajustar como corresponde su cuota parte del agua. La comunidad internacional está insistentemente analizando y siguiendo los modelos de consumo del agua en la agricultura y su correspondiente asignación y eficiencia en el uso. Los aproximadamente 1.260 millones de hectáreas bajo agricultura de secano (correspondientes a un 80% del total de la tierra cultivada del mundo) suministran el 60% de la alimentación del mundo mientras que los 277 millones de hectáreas bajo riego (el restante 20% de tierra cultivada) contribuyen con el otro 40% de los suministros de alimentos. En promedio, los rendimientos por unidad de superficie cultivada son 2,3 veces más altos en las áreas regadas que en las áreas de secano. Estos números demuestran que la agricultura bajo riego ha tenido, y continuará teniendo, un papel importante tanto en la provisión del suministro de los alimentos en todo el mundo y en todas las actividades relacionadas con la misma (FAO, 2008).

La Argentina y particularmente la provincia de Mendoza, enfrentan el desafío de insertarse en el mundo siguiendo el camino del desarrollo sustentable, donde el agua constituye el principal elemento estructurante y condicionante desde el punto de vista medioambiental (SRH, 2006). Los sistemas de riego, considerados claves para el crecimiento del producto agrícola, de las agroindustrias, como así de la exportaciones, presentan una eficiencia muy baja, cercana al 40% (Bos y Chambouleyron, 1998), en parte porque predominan los sistemas de riego tradicionales y tal situación se agrava aún más al observarse que no se operan adecuadamente. Las pérdidas económicas anuales relacionadas directamente con la ineficiencia en la gestión de los recursos hídricos podrían estimarse, de forma conservadora, en 1.500 millones de dólares (Banco Mundial 2000). Otro síntoma de la ineficiencia generalizada se manifiesta al observarse que un tercio de las hectáreas bajo riego del país (1,6 millones de hectáreas), presentan problemas de salinización y/o drenaje (Morábito 1997). Debido a la agudización de la escasez de los recursos financieros, la naturaleza vulnerable y finita del agua como recurso y la creciente demanda por éste, es que el agua debe ser utilizada con la máxima eficiencia posible, ello se ve reflejado a nivel nacional en la ejecución del “Plan Nacional de Recursos Hídricos” (SRH, 2006) y en el ámbito provincial en los “Planes Directores de Ordenamiento de Recursos Hídricos de Cuenca” (DGI, 2004). En dichos planes se menciona al recurso agua como un factor estratégico para el desarrollo, por lo cual las ineficiencias de los sistemas de riego son un tema clave de estudio, para detectar los principales problemas y soluciones del riego agrícola.

El área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior, oasis centro de la provincia de Mendoza, está ubicada entre 33° 34' de latitud Sur y entre 69° 00' de longitud Oeste, conformada por los departamentos de Tupungato, Tunuyán y San Carlos. El frente cordillerano u oeste de la cuenca limita con Chile, el límite norte lo constituye la cuenca del río Mendoza, el límite oriental lo constituye el borde de las cerrilladas pedemontanas o Huayquerías, finalmente el límite sur está dado por la divisoria de cuenca con el río Diamante (DGI, 1987). Respecto del balance hídrico global de la cuenca, es preciso señalar que, a nivel de caudales medios anuales, la cuenca del río Tunuyán se encuentra en desequilibrio entre la oferta y la demanda hídrica, presentándose una situación de déficit (DGI, 2004), lo cual muestra la aridez de la zona, transformando al recurso hídrico en el factor más importante para la producción del sector agrícola.

La cuenca del río Tunuyán Superior cuenta con una superficie total de 225.113 has, de las cuales 51.484 has cuentan con derechos de riego superficial en las 20 Inspecciones de Cauce involucradas (DGI, 2004). El 94% del área total de la cuenca es utilizada para actividades agrícolas, y el resto está ocupada básicamente por construcciones e infraestructura, cuerpos de agua y vegetación natural. De la superficie cultivada, el 37% es regada exclusivamente con agua superficial, el 36% con agua subterránea exclusiva y el 27% con ambas, uso conjunto (Hernández y Martinis, 2008). Del total de la superficie bajo riego el 84,1% corresponde a métodos de riego superficiales, el 12,2% a métodos de riego por goteo, el 2,5% a métodos de microaspersión y el 1,2% restante a otros métodos de riego (INDEC, 2002). Las excelentes condiciones agroecológicas para la producción de frutas frescas y vinos de alta calidad han incentivado fuertes inversiones que están ampliando las fronteras agrícolas de la cuenca bajo estudio.

Las evaluaciones del desempeño de los sistemas de riego a campo, juegan un papel fundamental para la optimización de los mismos, brindando valiosa información a los agricultores y/o ingenieros proyectistas, para la mejora del diseño y prácticas de manejo, como así también brindan información básica a las instituciones responsables del manejo y administración del recurso hídrico, para la gestión integrada del recurso. La cuenca bajo estudio no posee actualmente ningún estudio integral que permita caracterizar el riego superficial de la misma, sólo se mencionan algunos estudios puntuales como: "Parámetros y eficiencia de riego en el área de influencia del Arroyo Claro en Tunuyán, Mendoza" (Salatino et al, 1992) y estudios globales de alcance limitado como: "Plan Director de Ordenamientos de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Tunuyán" (DGI, 2004).

1.1 Desempeño del riego superficial

1.1.1 Variables físicas y de manejo

Las variables físicas que determinan el resultado de un evento de riego pueden agruparse en: (i) variables de manejo (parámetros físicos cuya magnitud puede cambiar en un amplio rango en función de la decisión del usuario) y (ii) variables del sistema, son parámetros físicos propios del sistema y que poco o nada de margen de cambio tienen (Feyen y Zerihun 1999).

Como variables del sistema podemos considerar a: lámina de riego a aplicar (dr), velocidad máxima del agua admitida para evitar erosión, pendiente del terreno (S), coeficiente de rugosidad (n), parámetros de la ecuación de infiltración (A , B , f_0), geometría de surcos. Las variables de manejo son: caudal de manejo y/o caudal unitario (Q_m , q_u), tiempo de aplicación o corte (Tap), y en menor medida la longitud de la unidad de riego (L).

Para la mejora de los sistemas de riego es necesaria la caracterización de las variables físicas ya que influyen en los procesos hidráulicos del riego, determinando la uniformidad y la aplicación del agua sobre la superficie. La uniformidad de distribución (EDI) en la aplicación del agua de riego, resulta de variables de diseño y manejo, como así también de características del evento de riego (Pereira, 1999; Pereira et al 2002). Por lo tanto la uniformidad de distribución es función del: caudal unitario o de manejo (q_u , Q_m), longitud de la unidad de riego (L), rugosidad o coeficiente de rugosidad de superficie (n), pendiente longitudinal de la unidad de riego (S_o), características de infiltración del suelo (A , B , f_0), geometría o sección del surco o melga y tiempo de aplicación o corte (Tap). La eficiencia de aplicación también es dependiente de variables de diseño como de manejo, siendo función de: caudal unitario y de manejo (q_u , Q_m), longitud de la unidad de riego (L), rugosidad o coeficiente de rugosidad de superficie (n), pendiente longitudinal de la unidad de riego (S_o), características de infiltración del suelo (A , B , f_0), geometría o sección del surco o melga, tiempo de aplicación o corte (Tap) y del déficit del agua en el suelo o lámina de reposición (dr). Estas funciones muestran que la eficiencia de aplicación es función de la uniformidad de distribución como del criterio de programación de los riegos (Pereira, 1999, Pereira et al, 2002).

1.1.1.1 Velocidad de infiltración del agua en el suelo

La infiltración probablemente sea el proceso que mayor influencia tiene 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 del suelo al perfil de suelo explorado por las raíces de los cultivos. La infiltración depende fundamentalmente de las características físicas, químicas y biológicas de suelo, afectando los procesos de avance y receso del agua, y ello es de importancia para estimar el caudal óptimo a derivarse en una parcela bajo riego (Walker et al, 2006). La infiltración es por ello, un parámetro físico utilizado tanto para el diseño como para la evaluación del desempeño de los métodos de riego.

Para la ingeniería del diseño y evaluación de métodos de riego por superficie ha sido útil aproximar los procesos de infiltración con funciones empíricas. 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 utilizadas por ajustar muy bien a la mayoría de las condiciones de la práctica de riego por superficie, ha sido la ecuación de Kostiakov (1932, mencionado por Grassi, 1998), dicha ecuación expresa la velocidad de infiltración en un punto:

$$I = a \times t^b \quad (1)$$

donde:

I: velocidad de infiltración (mm minuto⁻¹ o mm hora⁻¹)

t: tiempo de infiltración (minuto u hora)

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 (1) entre los límites t = 0 y t, se obtiene la ecuación de infiltración acumulada:

$$I_{cum} = \int_0^t a \times t^b = \frac{a}{b+1} \times t^{b+1} = A \times t^B \quad (2)$$

donde:

Icum: infiltración acumulada para el tiempo t (mm)

El Servicio de Conservación de Recursos Naturales de Estados Unidos “NRCS-USDA” (1974, mencionado por Walker 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 siguiente ecuación:

$$I = a' \times t^{b'} + c' \quad (3)$$

$$I_{cum} = A' \times t^{B'} + C' \quad (4)$$

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. Finalmente Kostiakov-Lewis (mencionado por Walker y Skogerboe, 1987; Walker et al, 2006), resuelven el problema del proceso de infiltración en largos períodos de tiempo, agregando a las ecuaciones un término que representa la infiltración final o “básica”, ello ajusta mejor a los métodos de riego con grandes tiempo de aplicación e infiltración por lo cual la ecuación propuesta se define como:

$$Z = I_{cum} = k \times t^a + fo \times t + c = A \times t^B + Ib \times t + c \quad (5)$$

donde:

Z: Icum: volumen infiltrado por unidad de longitud durante el tiempo de oportunidad t (m³ m⁻¹ min⁻¹)

fo: velocidad de infiltración básica en unidades de volumen por unidades de longitud y tiempo (m³ 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 ($\text{m}^3 \text{m}^{-1} \text{min}^{-1}$)

Otro parámetro que merece consideración debido a su importancia al proyectar el riego a nivel parcelario es la infiltración básica de los suelos. De acuerdo con el “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), su expresión matemática es la siguiente:

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

donde:

Ib: mm h^{-1}

$$a = A \times B \times 60 \quad (7)$$

$$b = B - 1 \quad (8)$$

El proceso de infiltración ha sido descrito por varios autores (Walker, 2006; Chambouleyron, 2005; Morábito, 2003; Grassi, 1998; Roscher, 1985 y Israelsen y Hansen, 1965), detallando y explicando los diferentes modelos que la caracterizan. Según ecuación (5) se han realizado varios intentos para definir los valores de a, k y f_0 . 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 1. Todavía no hay valores disponibles del componente c. Finalmente Walker et al, 2006; revisan y actualizan las “familias de curvas” de infiltración, detallando una serie de ecuaciones, referidas a la Tabla 2, que permiten obtener para cada familia de curva de infiltración los valores de a, k y f_0 según se detalla:

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

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

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

donde:

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

Tabla 1: Familia de curvas de infiltración en riego por superficie (Walker, 2003)

Infiltración	Ib (mmh ⁻¹)	Ib (" h ⁻¹)	Textura	k	a	fo
Muy lenta	2,5	0,01	Muy Arcilloso	0,200	0,00440	0,000011
		0,05	Arcilloso	0,258	0,00426	0,000022
		0,10	Arcilloso	0,317	0,00483	0,000035
		0,15	Arcilla Ligera	0,357	0,00360	0,000046
		0,20	Franco Arcilloso	0,388	0,00346	0,000057
Lenta	7,5	0,25	Franco Arcilloso	0,415	0,00337	0,000068
		0,30	Franco Arcilloso	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	Franco Limoso	0,490	0,00321	0,000107
Mod, lenta	12,5	0,50	Franco Limoso	0,504	0,00320	0,000117
		0,60	Franco Limoso	0,529	0,00320	0,000136
		0,70	Franco Limoso	0,550	0,00321	0,000155
		0,80	Franco Arenoso	0,568	0,00322	0,000174
		0,90	Franco Arenoso	0,584	0,00324	0,000193
Moderada	25	1,00	Franco Arenoso	0,598	0,00326	0,000212
Mod, rápida	37,5	1,50	Arenoso	0,642	0,00340	0,000280
Rápida	50	2,00	Arenoso	0,672	0,00355	0,000325
Muy rápida	75	3,00	Arenoso			
Ext, Rápida	100	4,00	Arenoso	0,750	0,00421	0,000390

Tabla 2: Infiltración a 6 hs en mm h⁻¹, referenciada a las familias de curvas de infiltración (Walker et al, 2006)

Familia	Textura	Condiciones	Condiciones	Condiciones	Condiciones
		Iniciales	tardías	Iniciales	tardías
		Riego superficial	Riego superficial	Riego por pulsos	Riego por pulsos
0,02	Arcilloso	0,55	0,43	0,46	0,40
0,05	Arcilloso	1,40	1,07	1,14	0,99
0,10	Arcilla Ligera	2,52	1,88	2,02	1,74
0,15	Franco Arcilloso	3,68	2,69	2,91	2,47
0,20	Franco Arcilloso	4,90	3,51	3,80	3,21
0,25	Franco Arcilloso	6,14	4,32	4,70	3,93
0,30	Limoso	7,42	5,13	5,60	4,65
0,35	Limoso	8,72	5,93	6,50	5,37
0,40	Franco Limoso	10,04	6,73	7,39	6,07
0,45	Franco Limoso	11,36	7,51	8,28	6,76
0,50	Franco Limoso	12,70	8,29	9,16	7,44
0,60	Franco Limoso	15,37	9,82	10,89	8,77
0,70	Franco Arenoso	18,04	11,30	12,58	10,06
0,80	Franco Arenoso	20,69	12,74	14,23	11,3
0,90	Franco Arenoso	23,32	14,13	15,84	12,5
1,00	Arenoso	25,93	15,49	17,41	13,66
1,50	Arenoso	38,53	21,73	24,72	18,93
2,00	Arenoso	50,65	27,27	31,34	23,53
4,00	Arenoso	100,73	46,57	55,37	38,79

La infiltración es uno de los parámetros físicos más difíciles de definir adecuadamente a campo, la importancia de sus valores combinados con la dificultad de obtener datos representativos sugieren que las técnicas de campo lleven un considerable período de tiempo para evaluar adecuadamente la infiltración. Se han propuesto diferentes metodologías como la del surco bloqueado (Bondurant, 1957, mencionado por Walker 1989) o el infiltrómetro de recirculación (mencionado por Walker 1989), que tiene la ventaja de que -tanto las condiciones geométricas como hidráulicas durante el ensayo de infiltración- proveen la mejor aproximación a las condiciones reales de campo respecto a los métodos estáticos. No obstante la metodología de mayor uso es la del doble anillo infiltrómetro (Haise et al, 1956, mencionado por Grassi 1998 y Walker y Skogerboe, 1987), adaptado por "NRCS-USDA" (mencionado por Grassi 1998). La metodología del doble anillo infiltrómetro permite conocer de forma práctica la infiltración básica del suelo y con ella, obtener los valores de los parámetros de las ecuaciones antes mencionadas.

1.1.1.2 Avance y receso del frente de agua

El evento de riego se compone de cuatro fases (figura 1) a saber: a) avance, b) almacenamiento, c) vaciamiento, d) recesión. El avance del frente del agua que se produce desde la cabecera hacia el pie, constituyendo el mojado del suelo. Luego el agua de riego puede escurrir de la parcela y se comienza a almacenar en su superficie, dando lugar así a la fase de almacenamiento. Al suspender la aplicación del agua en cabecera, se comienza con el período de vaciamiento que concluye en el instante en que el suelo queda descubierto en cabecera. Finalmente la recesión o retiro de agua de la superficie se produce de la cabeza al pie de la unidad de riego. En los métodos de riego sin pendiente y sin desagüe al pie las fases de vaciamiento y recesión no se producen, ya que una vez que el avance del agua llega al final de la unidad de riego su bloqueo o cierre, determina que esta no tenga salida, almacenándose en lugar de escurrir.

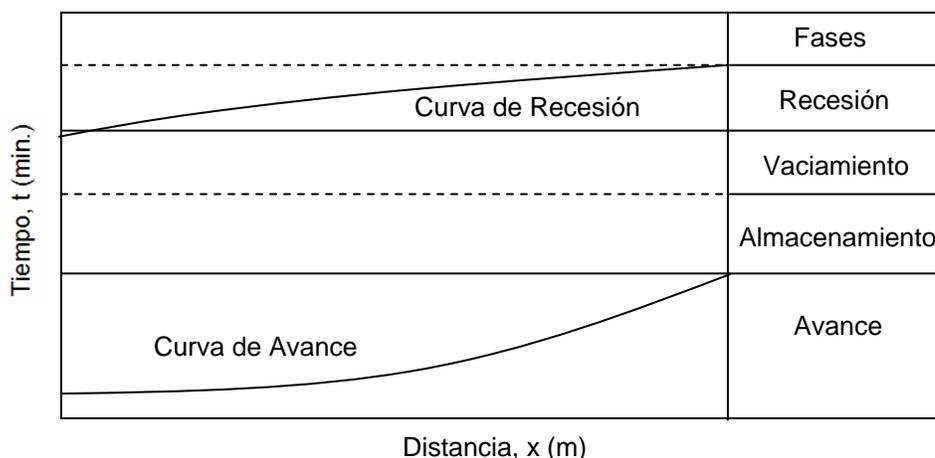


Figura 1: Fases del riego por superficie

El avance es la fase que implica el escurrimiento del flujo del agua sobre la superficie del terreno, es importante para las consideraciones del manejo del riego por superficie. 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 descripción de la trayectoria de avance no tiene una descripción matemática concisa, pero puede aproximarse razonablemente a una función potencial simple (Walker, 1989):

$$x = p \times t^r \quad (12)$$

donde:

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

t: tiempo de avance (minutos)

p: 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

Al analizar el significado físico de p y de r, se encontró que p depende de la pendiente, el caudal, las características hidráulicas de flujo y la aspereza de la superficie; y r está relacionado con las características físicas del suelo (Nugteren, 1969, mencionado por Grassi 2000).

Nugteren (1969, mencionado por Grassi 2000) encontró que x es proporcional a q, por lo cual una expresión más general de $x = f(t)$ es la siguiente:

$$x = u \times q^s \times t^r \quad (13)$$

donde:

q: es el caudal unitario de surco o por metro de ancho de melga ($L s^{-1}$ o $L s^{-1}m^{-1}$)

Por lo que podemos afirmar que: $p = u \times q^s$ (14)

Si la velocidad de infiltración del suelo es alta, r tiende a valores de 0,5, y si es baja r tiende a valores cercanos a 1. Por otro lado si la pendiente en el sentido de riego es baja, el valor de s tiende a 0,5 y si es alta los valores de s tienden a 1 (Morábito, 2003).

Elliot y Walker (1982, mencionado por Walker 1989) realizaron varias comparaciones de la ecuación (12) con métodos de ajuste y relaciones más elaboradas, determinando que, cuando la pendiente es constante y el caudal uniforme, los mejores resultados se obtuvieron con la ecuación de ajuste a dos puntos. Los parámetros empíricos p y r pueden resolverse simultáneamente, conociendo el tiempo de avance a la mitad de la longitud de la unidad de riego y el tiempo de avance al final de la parcela bajo riego. A partir de estos dos pares de datos, aplicando una transformación logarítmica, y posterior sustracción miembro a miembro se obtiene la ecuación de avance:

$$r = \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{t_{L/2}}{t_L}\right)} \quad (15)$$

$$p = \frac{x_L}{t_L^r} \quad (16)$$

donde:

$t_{L/2}$: tiempo de avance a la mitad del largo total del surco o melga (minutos)

t_L : tiempo de avance a la longitud total del surco o melga (minutos)

x_L : longitud total de surco o melga (m)

1.1.1.3 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. Al integrarse el hidrograma del caudal de ingreso a la parcela, se obtiene el volumen de agua aplicado, en los métodos de riego con desagüe al pie, el hidrograma de salida puede obtenerse de la misma forma (Figura 2). Existen dos variables importantes a determinar con el hidrograma de entrada y salida, la primera integra las diferencias de ambos hidrogramas siendo una buena medida del volumen total de agua aplicada que infiltra en el suelo. La segunda, es la infiltración básica del suelo, que puede obtenerse de la siguiente manera:

$$V_{inf} = V_{en} - V_{sa} \quad (17)$$

$$fo = \frac{Q_{en} - Q_{sa}}{L} \quad (18)$$

donde:

V_{en} : volumen entrado (m^3)

V_{sa} : volumen salido (m^3)

V_{inf} : volumen infiltrado ($m^3 s^{-1}$)

Q_{en} : caudal entrado ($m^3 s^{-1}$, $L s^{-1}$)

Q_{sa} : caudal salido ($m^3 s^{-1}$, $L s^{-1}$)

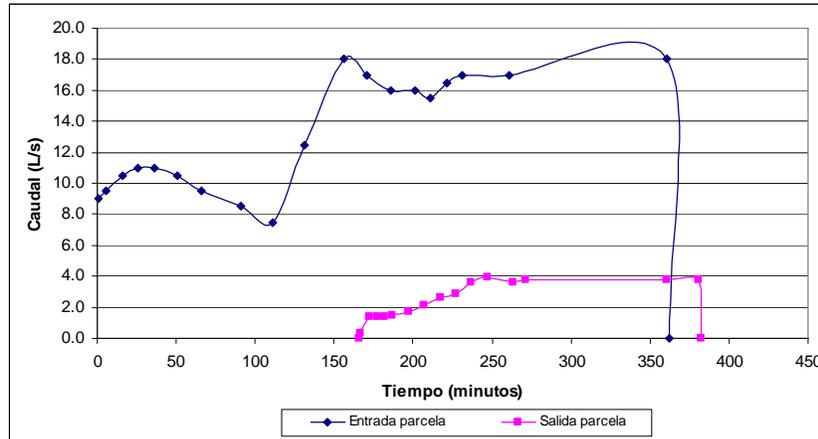


Figura 2: Hidrograma de entrada y salida

Existen una amplia variedad de dispositivos para monitorear en forma continua el caudal en cada una de las fases de operación del riego. Para el monitoreo y evaluación del riego a nivel parcelario los más utilizados son los aforadores y vertederos. Entre ellos podemos mencionar: aforador sin cuello (Skogerboe et al, 1967, mencionado por Grassi 2000), aforador de cresta ancha (Bos et al, 1986), aforadores trapezoidales (Robinson y Chamberlain, 1960, mencionado por Israelsen y Hansen, 1965), vertedero triangular (Shen, 1960, mencionado por Walker, 1989), vertedero rectangular (Kindsvater y Carter, 1957, mencionado por Walker, 1989), vertedero Cipolletti (mencionado por Chambouleyron, 2005). En cada caso para conseguir valores aceptables en las mediciones del caudal es de suma importancia que el dispositivo seleccionado sea instalado adecuadamente a campo (nivelado) y se encuentre hidráulicamente calibrado (curva de gasto ajustada).

1.1.1.4 Pendiente, longitud, número de surcos y/o melgas regadas y tiempo de aplicación de la unidad de riego.

La pendiente es uno de los factores responsables de la velocidad del agua cuando avanza y circula a lo largo de la parcela. A mayor pendiente menor será el tiempo de avance, por lo que los tiempos de infiltración serán más próximos en toda la parcela, incrementando la uniformidad del agua aplicada. Sin embargo a mayor pendiente, mayor es la probabilidad de erosión del suelo, se recomienda que las parcelas de riego por superficie no superen el 2%. Cuando la pendiente es excesiva para realizar métodos de riego superficiales, es posible orientar los surcos en otras direcciones, diferentes a la de la máxima pendiente. La longitud óptima de la parcela de riego está vinculada a la pendiente y caudal de manejo, en general cuando las pendientes son menores, en presencia de suelo arenosos la longitud debe ser menor respecto a la situación de riegos con pendiente y suelo de texturas arcillosas. 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. Según diversos autores existen recomendaciones generales que integran todos los factores antes mencionado de forma tal de cumplir eficientemente con los objetivos del riego, así podemos citar las

recomendaciones realizadas por Kay, 1986; Withers y Vipond, 1974, incluidas en FAO, 2002.

1.1.1.5 Geometría de surco y melga

Conocer la sección hidráulica del surco, conjuntamente con el avance del frente de agua y en caso de los métodos de riego con desagüe al pie, conocer el volumen de agua escurrido, ha resultado ser el procedimiento más efectivo para la evaluación de los métodos de riego. A partir de estos parámetros se puede deducir una ecuación promedio de infiltración del agua en el surco y/o melga basada en cálculo de volúmenes (Skogerboe, 1987, Walker, 1989 y Clemmens, 1998, mencionados por Walker, 2003). La ecuación del balance de volumen es:

$$Q_o t_x = \sigma_y A_o x + \sigma_y k t_x^a x + \frac{1}{(1+r)} f_o t_x x \quad (19)$$

donde:

Q_o : caudal de entrada al surco o melga por unidad de tiempo ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)

t : intervalo de tiempo desde el inicio del riego (min)

σ_y : factor de forma de almacenaje superficial, es una constante que puede tomar valores que van desde 0,70 a 0,80 (en la práctica se utiliza: 0,77)

A_o : área de sección transversal de flujo de surco (m^2)

x : distancia del frente de agua (m)

K : coeficiente empírico de la ecuación de Kostiakov-Lewis

f_o : velocidad de infiltración básica ($\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-1}$)

El factor de forma queda definido como:

$$\sigma_y = \frac{a + r(1 - a) + 1}{(1 + a)(1 + r)} \quad (20)$$

Donde: a y r , son los exponentes de las ecuaciones de infiltración y avance respectivamente.

Para determinar el área de sección transversal de flujo, debe entenderse que los surcos generalmente exhiben una forma parabólica con fondo plano y las melgas generalmente se representan por metro de ancho. Para describir las formas en términos de sección transversal de flujo o perímetro mojado, respecto a formas geométricas regulares de surcos y/o melgas, se realizan regresiones numéricas. Elliot et al (1983, mencionado por Walker, 2003) determinaron que el perímetro mojado y el área de sección transversal se pueden expresar como una simple función potencial referida al tirante:

$$WP = \gamma_1 y^{\gamma_2} \quad (21)$$

donde:

WP : perímetro mojado de surco (m)

γ_1 : coeficiente empírico de ajuste

γ_2 : exponente empírico de ajuste

y : tirante de agua (m)

$$A = \sigma_1 y^{\sigma_2} \quad (22)$$

donde:

A : área de sección transversal de surco (m^2)

σ_1 : coeficiente empírico de ajuste

σ_2 : exponente empírico de ajuste

Los valores de γ_1 , γ_2 , σ_1 y σ_2 para melgas toman valores de: 1, 0, 1 y 10/3 respectivamente, la sección transversal del frente de flujo puede determinarse combinando las ecuaciones (21) y (22)

$$A^2 R^{\frac{4}{3}} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (23)$$

donde:

$$\rho_1 = \frac{\sigma_1^{\frac{10}{3} - \rho_2}}{\gamma_1^{\frac{4}{3}}} \quad (24)$$

$$\rho_2 = \frac{10}{3} - \frac{4\gamma_2}{3\sigma_2} \quad (25)$$

Los valores de ρ_1 y ρ_2 para melgas son respectivamente: 1 y 3,33. El área de sección de flujo (A_o) a la entrada de la parcela, pueden determinarse para cualquier caudal y pendientes mayores de 0,0001 m/m de la siguiente forma:

$$A_o = \left[\frac{Q_o^2}{3600 S_o \rho_1} n^2 \right]^{\frac{1}{\rho_2}} \quad (26)$$

donde:

Q_o : caudal de entrada la surco y/o melga por unidad de tiempo ($m^3 \text{ min}^{-1}$)

n : coeficiente de rugosidad de Manning
 S_0 : pendiente de riego ($m\ m^{-1}$)

Medir la sección transversal de surco a campo para calcular posteriormente los valores de los parámetros empíricos antes mencionados, puede ser una tarea tediosa. Una simple aproximación (Walker, 2003) es la utilización de 4 medidas, como se muestra en la Figura 3, para determinar los valores de $\gamma_1, \gamma_2, \sigma_1$ y σ_2 de la siguiente manera:

$$\gamma_2 = \frac{\log \left[\frac{Base + \sqrt{Y_{max}^2 + (T_{mid} - Base)^2} + \sqrt{Y_{max}^2 + (T_{max} - T_{mid})^2}}{Base + \sqrt{Y_{max}^2 + (T_{mid} - Base)^2}} \right]}{\log 2} \quad (27)$$

$$\gamma_1 = \frac{Base + \sqrt{Y_{max}^2 + (T_{mid} - Base)^2} + \sqrt{Y_{max}^2 + (T_{max} - T_{mid})^2}}{Y_{max}^{\gamma_2}} \quad (28)$$

$$\sigma_2 = \frac{\log \left[\frac{\frac{Y_{max}}{2} \left(\frac{Base}{2} + T_{mid} + \frac{T_{max}}{2} \right)}{\frac{Y_{max}}{2} \left(\frac{Base}{2} + \frac{T_{mid}}{2} \right)} \right]}{\log 2} \quad (29)$$

$$\sigma_1 = \frac{\frac{Y_{max}}{2} \left(\frac{Base}{2} + T_{mid} + \frac{T_{max}}{2} \right)}{Y_{max}^{\sigma_2}} \quad (30)$$

donde:

$Base$: fondo o ancho inferior de surco (m)

T_{max} : ancho superior de surco (m)

T_{mid} : ancho medio de surco (m)

Y_{max} : tirante máximo de surco (m)

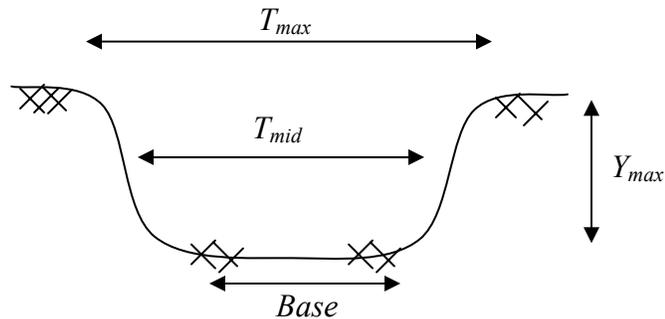


Figura 3: Área transversal de surco.

1.1.2 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 (S), supuestamente a nivel, quedaría cubierta por una aportación V (Losada Villasante y Roldán Cañas, 2009), es decir:

$$d = \frac{V}{S} \quad (31)$$

En principio, la lámina o altura de agua 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. En ocasiones se hace necesario prever una dosis o lámina de riego de la que resulta un margen de percolación profunda que evite la salinización del suelo, constituyendo la fracción de lavado:

$$dr = Etc - PP + dper_s \quad (32)$$

donde:

dr : lámina de reposición u objetivo (mm)

Etc : evapotranspiración de cultivo (mm)

PP : precipitación efectiva (mm)

$dper_s$: lámina de precolación a aplicar con el riego para mantener al balance salino del suelo (mm)

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:

$$db = \frac{V}{S} = \frac{Q \times t}{S} \quad (33)$$

Si la parcela regada posee desagüe al pie, de la lámina bruta aplicada una parte escapa por escorrentía constituyendo la lámina escurrida (de) y otra se infiltra, constituyendo la lámina infiltrada ($dinf$), de esta lámina parte se almacena en la zona radical del cultivo bajo riego, constituyendo la lámina almacenada (dal) y parte de la lámina infiltrada alcanza profundidades mayores al sistema radical produciendo un exceso de percolación, que constituye la lámina percolada ($dper$). A campo cada riego da lugar a que esta lámina infiltrada que recibe el suelo sea de altura o cantidad irregular, alrededor de un valor medio \bar{d} . Debido a la propia forma de aplicar el agua en la parcela por los métodos de riego superficial, un riego perfectamente uniforme no es posible. Por lo cual en la práctica pueden distinguirse dos zonas según la lámina infiltrada sea mayor o menor a la requerida u objetivo. La primera ocupa la fracción f de la parcela que recibe láminas $d_i > dr$, y en la segunda sobre la fracción $1-f$ resulta un déficit, que puede representarse como una lámina de déficit (d_d). La distribución de la lámina infiltrada en una parcela de superficie S y los componentes del balance hídrico, una vez terminada la infiltración, han sido representados esquemáticamente en la Figura 4 (adaptada de Losada Villasante y

Roldán Cañas, 2009), el término que corresponde a las pérdidas en el sistema de distribución no ha sido considerado.

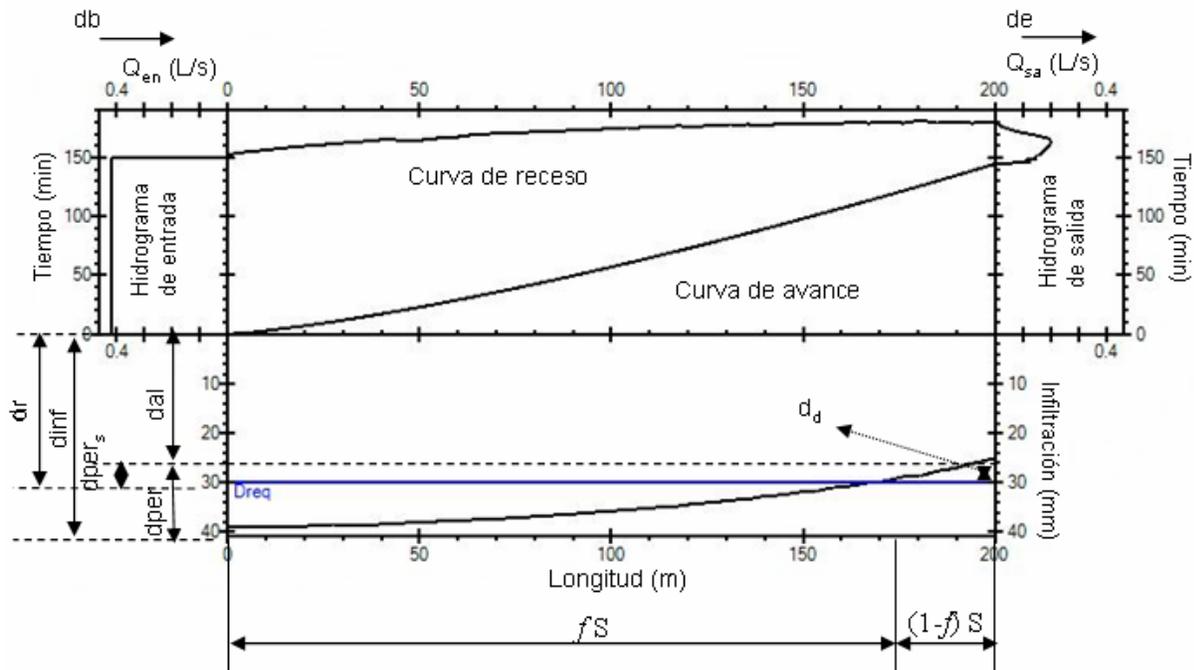


Figura 4: Resumen hidráulico del agua aplicada a la parcela

1.1.3 Parámetros del desempeño del riego superficial

Utilizar racionalmente el agua, implica emplearla en actividades agropecuarias que permitan maximizar u optimizar el beneficio a obtener de los recursos invertidos y manejarla apropiadamente, en cuanto a oportunidad del riego, en cantidad necesaria y suficiente, de manera de reducir al mínimo posible las pérdidas y desperdicios (Grassi, 1998). 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 con el objetivo de su continua optimización. El propósito final de la calificación del desempeño es lograr un uso eficiente o racional de los recursos, entregando una retroalimentación para la mejora del manejo del sistema en todos sus niveles (Bos et, al 2005). Los ensayos de campo para evaluar los métodos de riego son necesarios para definir cuantitativamente su desempeño, no solamente en relación con las variables físicas del sistema, sino también con relación a su diseño y manejo (Walker, 1989). Constituyen una forma de establecer el grado de racionalidad en el uso del agua (Grassi, 1998).

Por más de cuatro décadas se han propuesto diferentes indicadores o parámetros de desempeño, usualmente han sido nombrados como: eficiencias y uniformidad, como una intuitiva apelación a significados de bondad (Burt et al, 1997).

Christiansen (1942, mencionado por Grassi, 1998) produjo la primera ecuación de eficiencia de distribución tratando de evaluar el grado de uniformidad en el reparto de agua en riego por aspersión, al cual denominó “Coeficiente de Uniformidad”. Criddle et al (1956, mencionado por Grassi, 1998), determina la uniformidad de distribución (UD), como la relación en la lámina mínima respecto a la lámina media infiltrada. Este concepto es retomado por Merriam y Keller (1978, mencionado por Walker, 2003) que definen la uniformidad de distribución como la relación del promedio de la lámina infiltrada en el cuarto más perjudicial, respecto de la lámina media infiltrada, finalmente definen la uniformidad de distribución absoluta como la relación entre la lámina mínima respecto a la promedio infiltrada.

Israelsen y Hansen (1965), definen 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.

Merriam et al (1973), propone el cálculo de 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 u objetivo. Si el manejo del agua es óptimo, minimizando las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento al pie, indica el grado de eficiencia que podría alcanzar el método de riego.

Chambouleyron (1977) menciona varios conceptos de eficiencias, dividiéndolas 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). Se define 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. Finalmente se define la eficiencia de riego interna (ERI), como el producto de la eficiencia de aplicación y la eficiencia de conducción interna (ECI)

El “Comité de Riego en Finca” de la división de Riego y Drenaje de ASCE (1978, American Society of Civil Engineers) produjo una importante contribución en aclarar y difundir como un primer estándar internacional los términos y conceptos de la “performance” de los métodos de riego. Posteriormente numerosas publicaciones han aparecido describiendo los términos de uniformidad y eficiencia, de las cuales podemos destacar las siguientes:

Walker y Skogerboe (1987) proponen el cálculo de dos indicadores que permiten separar las pérdidas de percolación profunda y por escurrimiento al pie. El porcentaje de percolación profunda es la relación entre el volumen de agua percolado, respecto del volumen de agua aplicado y el porcentaje de escurrimiento al pie es la relación del volumen de agua escurrido respecto del volumen de agua aplicado.

Bos y Nugteren (1990) definen las eficiencias para todo el sistema de riego, considerándolas desde la fuente de agua hasta el cultivo. Divide 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 and 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 medidas (Christiansen, 1942; Hall, 1960; Hansen, 1960; y ASCE 1978, mencionados por Jensen, 2007).

Keller y Keller (1995, mencionados por Jensen 2007) definen la eficiencia de riego efectiva como la relación del uso consuntivo del agua aplicada al cultivo respecto al uso efectivo de la misma. De este trabajo se desprenden una serie de publicaciones (Willardson et al, 1994; Seckler, 1996; Allen et al, 1996; Seckler et al, 1998 y Willarson y Allen, 1998, mencionados por Jensen, 2007) que sugieren que el término eficiencia es muy ambiguo y recomiendan el uso de relaciones o fracciones para definir el uso del agua, teniendo una mejor consideración en los impactos de los flujos de ingreso y egreso al sistema.

ASCE (Burt et al, 1997) revisa y redefine los términos propuestos en 1978, mejorando las enunciaciones de los parámetros de desempeño con el objetivo de evitar confusiones y errores de cálculo, actualizado los estándares internacionales. Los parámetros de desempeño se actualizan en función del balance hídrico considerando la partición física del agua aplicada, en función de su capacidad de re-uso y finalmente de su juicio de uso, de forma tal que se definen en el balance hídrico: usos consuntivos, no consuntivos, benéficos, no benéficos, razonables y no razonables. Se definen finalmente los siguientes parámetros de desempeño: eficiencia de riego, coeficiente de uso consuntivo de riego, sagacidad del riego, uniformidad de distribución, eficiencia de aplicación, adecuación del riego en el cuarto más perjudicado. Los indicadores mencionados poseen una adecuada consistencia entre diferentes métodos de riego y al considerarlos en diferentes escalas. El trabajo de Burt et al (1997), se acompaña con dos trabajos anexos que dan más información respecto a las expresiones estadísticas de la uniformidad y a la exactitud de las estimaciones de los parámetros de desempeño.

Finalmente Morábito (2003) define las eficiencias potenciales siguiendo dos metodologías: La primera se define como la eficiencia de aplicación potencial según el manejo del método de riego (EAP_M) y la segunda definida como la eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAP_S).

Actualmente la comunidad científica internacional sigue revisando y discutiendo el término “eficiencia”, proponiendo para el mejor entendimiento del manejo racional del recurso agua los términos: “rendimiento” o “desempeño”. Conceptualmente el fin último

del desempeño dependerá de la optimización sustentable de la producción para cumplir con los objetivos básicos de toda empresa agrícola: lucro y continuidad.

Se detallan a continuación según Burt et al (1997), Walker y Skogerboe (1987) y Morábito (2003) los indicadores de desempeño utilizados en el presente trabajo, manipulando para su cálculo láminas de riego como así también volúmenes de agua:

a) Eficiencia de aplicación (EAP)

$$EAP = \frac{\text{Volumen o lámina de riego objetivo}}{\text{Volumen o lámina de riego aplicada}} = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{dp} + V_{tw}} = \frac{dr}{db} \times 100 \quad (34)$$

b) Eficiencia de distribución (EDI)

$$EDI = \frac{\text{Volumen o lámina infiltrada promedio del cuarto mas perjudicado}}{\text{Volumen o lámina infiltrada promedio}} = \frac{\frac{d_{\frac{1}{4}}}{L}}{\frac{d}{L}} = \frac{d_{\frac{1}{4}}}{d} \times 100 \quad (35)$$

c) Eficiencia de distribución absoluta (EDIA)

$$EDIA = \frac{\text{Volumen o lámina mínima infiltrada}}{\text{Volumen o lámina infiltrada promedio}} = \frac{\frac{d_{\min}}{L}}{\frac{d}{L}} = \frac{d_{\min}}{d} \times 100 \quad (36)$$

d) Eficiencia de almacenaje (EAL)

$$EAL = \frac{\text{Volumen o lámina de agua infiltrada y almacenada}}{\text{Volumen o lámina objetivo (o almacenable)}} = \frac{V_{rz}}{V_{rz} + V_{di}} = \frac{d_{\inf}}{dr} \times 100 \quad (37)$$

e) Porcentaje de percolación profunda (Pp)

$$Pp = \frac{\text{Volumen o lámina de agua percolada}}{\text{Volumen o lámina de riego aplicada}} = \frac{V_{dp}}{V_{rz} + V_{dp} + V_{tw}} = \frac{d_{per}}{db} \times 100 \quad (38)$$

f) Porcentaje de escurrimiento al pie (Ep)

$$Ep = \frac{\text{Volumen o lámina de riego escurrido}}{\text{Volumen o lámina de riego aplicada}} = \frac{V_{tw}}{V_{rz} + V_{dp} + V_{tw}} = \frac{de}{db} \times 100 \quad (39)$$

g) Eficiencia de aplicación potencial según manejo del método de riego (EAP_M)

$$EAP_M = \frac{\text{Volumen o lámina de riego objetivo óptima}}{\text{Volumen o lámina de riego aplicada optimizada}} = \frac{dr_{op}}{db} \times 100 \quad (40)$$

h) Eficiencia de aplicación potencial según balance salino (EAP_S)

$$EAP_S = \frac{\text{Volumen o lámina media infiltrada y almacenada}}{\text{Volumen o lámina de riego aplicada considerando RL}} = \frac{Etc - PP}{Etc - PP + dper} \times 100 \quad (41)$$

donde:

V_{rz} : volumen de agua por unidad de ancho o surco que se almacena en la rizósfera ($m^3 m^{-1}$)

V_{dp} : volumen de agua por unidad de ancho o surco que percola de la rizósfera ($m^3 m^{-1}$)

V_{tw} : volumen de agua por unidad de ancho o surco que escurre de la parcela ($m^3 m^{-1}$)

V_{di} : volumen de agua por unidad de ancho o surco que representa la subirrigación ($m^3 m^{-1}$)

Etc: evapotranspiración de cultivo (mm)

PP: precipitación efectiva (mm)

L: longitud de la unidad de riego (m)

RL: requerimiento de lixiviación (mm)

db: lámina bruta o aplicada (mm)

dr: lámina de reposición u objetivo (mm)

dr_{op} : lámina de riego óptima (mm)

$d_{1/4}$: lámina infiltrada media del cuarto más perjudicado (mm)

de: lámina escurrida al pie de la parcela (de)

dinf: lámina infiltrada (mm)

dmin: lámina mínima infiltrada (mm)

d_{per} : lámina percolada (mm)

\bar{d} : lámina infiltrada promedio (mm)

Rocher (1985) propone la siguiente calificación que permite analizar situaciones particulares y clasificarlas según los parámetros de desempeño más importantes en riego por superficie.

Tabla 3: 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

El único trabajo sobre evaluación y desempeño del riego en el área de estudio es el realizado por Salatino et al (1992). La Tabla 4 muestra los resultados promedios – agrupados por método de riego- de las evaluaciones de riego realizadas en propiedades distribuidas en la zona de Arroyo Claro. El promedio general de la eficiencia de aplicación para la zona evaluada es de 38%, calificándose como “Mala” (Roscher, 1985), si bien presenta valores extremos de 10 y 97%. Salatino et al (1992), llega a la conclusión que ajustando las láminas de reposición y oportunidad en cada riego, mejorando la sistematización y laboreo de las tierras bajo riego y ajustando los tiempos y caudales de manejo, permitirá obtener eficiencias más elevadas, que puedan considerarse aceptables en función de las características de las zona.

Tabla 4: Eficiencias de riego medias para la zona de Arroyo Claro (Salatino et al, 1992)

Método de riego	Valores medios de eficiencia (%)				
	ERI	ECI	EAP	EDI	EAL
Surcos	39	99	39	72	85
Melgas	34	96	36	70	87

1.1.4 Modelos y aplicaciones de diseño y evaluación de riego por escurrimiento superficial

La gran cantidad de variables e interacciones que involucran al riego por superficie lo hace un proceso complejo, difícil de predecir o simular cuantitativamente. Durante años las únicas ayudas para ingenieros en riego eran tablas y fórmulas simples que dieron sólo pautas o guías poco precisas (Booher, 1974; Jensen, 1980; Kay, 1986; James, 1988 y Cuenca, 1989; mencionados por Jurriëns, 2001). Los manuales más utilizados durante los años setenta eran aquéllos publicados por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 1974, 1983; mencionados por Jurriëns, 2001). Estos incluían fórmulas y diagramas que fueron aceptables como estándares de diseño durante varios años. Todo ello cambió con los adelantos en la programación por computadoras en los años setenta y el advenimiento de las computadoras personales en los años ochenta. Para superar limitaciones debidas al empirismo y aproximar un estudio racional, los modelos matemáticos aplicados al riego por superficie se volvieron más sofisticados, dando una mayor precisión a los procesos involucrados, aunque se aceptan diversas simplificaciones, los modelos generalmente se basan en las ecuaciones de continuidad y dinámica del movimiento conocidas como de SAINT VENANT. Así los modelos matemáticos desarrollados pueden clasificarse en cuatro grupos: hidrodinámico, inercia-cero, onda-cinemática y modelos de balance de volúmenes. Los modelos y sus aplicaciones han permitido sistemáticamente 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).

Existe una gran cantidad de aplicaciones o software para el diseño y operación del riego por superficie, pero muy pocos han sido efectivamente utilizados. El ILWI (Institute for Land and Water Management) de la Universidad Católica de Leuven, Bélgica, en cooperación con el ILRI, (Internacional Institute for Land Reclamation and Improvement,

Wageningen, The Netherlands) inicialmente desarrollaron el modelo BASCAD (Boonstra y Jurriëns, 1998), previamente llamado BASDEV, para el diseño y operación de grandes melgas niveladas a cero, utiliza el modelo matemático de inercia-cero combinándolo con el principio de control de volumen Euleriano (Walker y Skogerboe, 1987), permitiendo generar el avance del frente de agua. Luego para melgas y surcos con pendiente se desarrollaron los modelos BISDEV (previamente llamado BORDEV) y FISDEV (previamente llamado FURDEV). Finalmente se desarrolla el programa SURDEV (Jurriëns et al, 2001) el cual consiste en un paquete de tres programas para el riego por superficie: BASDEV para melgas por inundación, BORDEV para melgas por escurrimiento y FURDEV para el riego en surcos, este modelo como sus antecesores se basan en el modelo matemático de balance de volúmenes utilizando la técnica descripta por Walker y Skogerboe (1987).

El USDA-ARS (United State Department of Agricultura - Arid Land Agricultural Research Center), desde la década del setenta ha estado involucrado en el desarrollo de modelos de simulación hidráulica y software relacionado para analizar los métodos de riego por superficie (Bautista et al; 2009a, 2009b, 2007). Inicialmente se desarrolla el modelo BDRFLW (Strelkoff, 1985, mencionado por Jurriëns et al, 2001) que simula el riego para grandes melgas. Clemmens (1995, mencionado por Bautista 2009a) desarrolla el modelo BASIN para el diseño y evaluación de grandes melgas niveladas a cero, usando el modelo de inercia-cero. Strelkoff et al (1996, mencionado por Bautista, 2009) desarrolla el modelo BORDER, como herramienta de diseño para melgas con pendiente y desagüe al pie, Clemmens 2000. Luego del trabajo realizado se inicia una nueva etapa de desarrollo, inicialmente se desarrolló el modelo SRFR (Strelkoff, 1990; Strelkoff et al, 1998; Strelkoff, 1999; Strelkoff et al, 2000). Finalmente una nueva generación de modelos se desarrolla desde 2004, dando como resultado el modelo WINSRFR, con actualizaciones en 2006, 2007 y finalmente en 2009, utilizando los modelos matemáticos de inercia-cero y onda cinemática. WINSRFR 3.1 es el resultado de más de 20 años de trabajo por el USDA-ARS, la funcionalidad de este modelo se divide en cuatro módulos: 1) Event Analysis: evalúa la performance del riego según datos de campo y estima los parámetros de infiltración 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. Otros parámetros de riego como caudal y tiempo de aplicación pueden calcularse, 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 su parámetros de desempeño según Burt et al (1997). A futuro, sobre el modelo WINSRFR, se están desarrollando procedimientos para estimar la erosión de la superficie del suelo, se ha planificado incluir el modelo Green-Ampt a la lista de opciones de infiltración, finalmente a largo plazo se realizan esfuerzos para expandir las capacidades del modelo para simular los procesos hidráulicos del riego por superficie en dos dimensiones (Bautista et al, 2009).

La Universidad del Estado de Utah a fines de los años ochenta, desarrolla dos modelos de amplia difusión internacional: SURFACE Y SIRMOD. Estos modelos permiten el diseño y evaluación de grandes melgas, de melgas y surcos para distintas formas de operación (uso de dos caudales, re-uso del agua y riego por pulsos), utilizando el método de balance

de volúmenes tal modelo fue difundido por FAO. En 1993 la Universidad Utah desarrolla el programa SIRMOD (Walker et al, 1993), finalmente en 2003 se desarrolló la última versión de SIRMOD III (Walker, 2003) que incorpora los modelos matemáticos de onda cinemática, inercia-cero e hidrodinámico. Hoy en día este modelo se difunde mundialmente y es reconocido por la comunidad científica internacional como modelo de referencia para la evaluación, operación y diseño del riego por superficie.

El corazón del modelo SIRMOD es su capacidad de programación para simular varias configuraciones y esquemas operativos del riego por superficie (Walker, 2003). La simulación se basa en la solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant, según teoría de conservación de masa y momentum.

Teoría de la conservación de masa:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial \tau} = 0 \quad (42)$$

Teoría de la conservación del momentum:

$$\frac{1}{Ag} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A^2 g} \frac{\partial Q}{\partial x} + (1 - F^2) \frac{\partial y}{\partial x} - (S_o - S_f) = 0 \quad (43)$$

donde:

- A: área de la sección transversal del frente de agua (m²)
- Q: caudal (m³ s⁻¹)
- t: tiempo (s)
- x: distancia desde el inicio de la unidad de riego (m)
- τ: tiempo de oportunidad (s)
- Z: coeficiente de la ecuación de infiltración de Kostiakov-Lewis (m)
- g: aceleración de la gravedad (9,81 m s⁻²)
- y: tirante de agua (m)
- F: número de Fraude
- So: pendiente del terreno (m m⁻¹)
- Sf: pendiente debida a la fricción (m m⁻¹)

Inicialmente el modelo SIRMOD resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum utilizando el método “Euleriano” en función del espacio tiempo, generando ecuaciones algebraicas no lineales. Tales ecuaciones pueden resolverse por tres caminos: 1) Modelo Hidrodinámico, resuelve las ecuaciones (42) y (43) por solución numérica; 2) Modelo de Inercia-Cero, ignora el primer y segundo término de la ecuación (43) y finalmente 3) Modelo de Onda Cinemática, su solución se basa en ignorar los tres primeros términos de la ecuación (43).

Para la simulación del riego por superficie es importante conocer las características del problema a resolver ya que cada modelo matemático ofrece limitaciones en su resolución.

Así los modelos hidrodinámicos y de inercia-cero ofrecen soluciones para todos los casos del riego por superficie, mientras el modelo de onda-cinemática se limita a surcos o melgas donde se cumple: a) la pendiente superficial de terreno es mayor a $0,0001 \text{ m m}^{-1}$ y b) si el agua escurre o drena libremente al final de la unidad de riego. Las evaluaciones realizadas en la cuenca bajo riego del río Tunuyán Superior se resolvieron con el modelo hidrodinámico.

Localmente, Morabito et al (1991) desarrollaron el modelo ERFIN, modelo de evaluación para los diferentes métodos de riego por superficie, mediante la comparación de láminas de riego el modelo ajusta ecuaciones para obtener el patrón de infiltración, de forma tal de cuantificar los parámetros de desempeño (Grassi, 1998 y Chambouleyron y Morábito; 1982a y 1982b). Chambouleyron et al (1993) desarrollan el modelo DISEVAL, modelo para el diseño y evaluación del riego por superficie. El modelo mediante una solución algebraica sencilla interpreta la aplicación del agua para longitudes menores a 200 m, integrando para ello, la metodología del “NRCS-USDA”, la relación de infiltración propuesta por Grassi, cálculo del receso de Strelkoff y el mecanismo de desagüe de Merriam y Keller.

1.2 Objetivos

Objetivos generales:

Contribuir al mejor aprovechamiento del agua de riego en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Detectar los principales problemas que limitan la optimización del recurso agua en el interior de las propiedades agrícolas y detallar alternativas para su solución práctica a campo.

Objetivos específicos:

Calificar el desempeño del riego por superficie en el área de regadío de la cuenca de río Tunuyán Superior, cuantificando las eficiencias de conducción (o distribución) interna y las diferentes láminas de riego que permitan la obtención de indicadores parcelarios como: Eficiencia de aplicación, almacenaje, distribución, porcentaje de percolación profunda y porcentaje de escurrimiento al pie.

Determinar la salinidad de los suelos regados en el área de riego y por zona de manejo.

Determinar la salinidad del agua de riego superficial en bocatoma de finca bajo el área de riego y por zona de manejo.

Identificar y cuantificar parámetros de riego que caractericen la zona bajo estudio: velocidad de infiltración de los suelos, velocidad de avance del frente de agua, geometría de los surcos, caudal de manejo y unitario, tiempo de aplicación o tiempo de riego y longitud de la unidad de riego.

Estimar eficiencias de riego potenciales que permitan optimizar el uso del recurso agua, en base a la mejora de la operación de los métodos de riego y considerando el balance salino de los cultivos irrigados.

Efectuar recomendaciones prácticas para el manejo eficiente del riego a nivel predial para el área de estudio.

1.3 Hipótesis de trabajo

La eficiencia de riego actual en las propiedades agrícolas bajo el área irrigada, con derechos de riego superficial, de la cuenca del río Tunuyán Superior es baja. Ello produce importantes desperdicios del recurso agua por desagüe superficial y percolación profunda que son factibles de corregir mejorando las prácticas de riego a campo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Consideraciones generales

La unidad de análisis fue la propiedad agrícola con derecho de riego superficial. El tamaño de la muestra planificada para un error de estimación del 10% respecto de la media, según estudios previos realizados en la cuenca del Río Mendoza, Morábito (2003) fue de 51 propiedades, muestreando 1/3 en otoño - invierno, 1/3 en primavera y 1/3 en verano. La selección de las propiedades agrícolas a muestrear se realizó con la consideración de dos criterios generales: el primero que las mismas se distribuyeran en forma proporcional a la superficie empadronada de cada una de las inspecciones y/o asociaciones de usuarios y sobre los canales más representativos. El segundo criterio fue evaluar el riego en aquella propiedad agrícola que, con las características mencionadas anteriormente, en la oportunidad de la visita estuviera recibiendo el turno de riego habitual. Las evaluaciones se realizaron durante la parte final del ciclo agrícola 2007 y durante todo el ciclo agrícola 2008 de forma tal de abarcar las distintas estaciones climáticas permitiendo considerar la variación de las necesidades de agua de los diferentes cultivos. Durante la evaluación a campo se trató de que el agricultor regara según su técnica habitual, para caracterizar adecuadamente su modalidad de trabajo y el riego aplicado.

Para los procedimientos de campo dirigidos a la evaluación de los métodos de riego se ha utilizado las metodologías propuestas por los estándares de ASAE (American Society of Agricultural Engineering, 2000) y la de Walker y Skogerboe (1987). Para la cuantificación de los parámetros desempeño, que califican los métodos de riego, se utiliza la metodología definida por la ASCE (American Society of Civil Engineers, Burt et al 1997).

Las variables repuesta bajo estudio para las distintas evaluaciones a campo fueron: EAP (eficiencia de aplicación); EDI (eficiencia de distribución); EAL (eficiencia de almacenaje); Pp (porcentaje de percolación profunda); Ep (porcentaje de escurrimiento al pie); EAP_M (eficiencia de aplicación potencial de manejo); Ep_M (porcentaje de escurrimiento al pie potencial de manejo); Pp_M (porcentaje de percolación potencial de manejo); EAP_S (eficiencia de aplicación potencial considerando el balance salino del suelo); y las variables explicativas fueron: zona de manejo, estación del año, cultivo y método de riego. Dentro de cada variable explicativa se consideraron los siguientes factores o categorías: zona de manejo (Norte, Centro Norte, Centro Sur, Sur); estación del año (primavera, verano y otoño); cultivo (frutícolas y hortícolas); método de riego (con desagüe y sin desagüe). Es importante destacar que la delimitación geográfica de las distintas zonas de manejo (Tabla 5) se realiza en función de los siguientes criterios: Inspecciones y/o Asociaciones de Usuarios, cultivos predominantes, métodos de riego, tipo de suelos y pendientes, unidades de manejo (DGI, 2004) y límites departamentales.

Tabla 5: Inspecciones y/o Asociaciones de Usuarios del río Tunuyán Superior según zonas de manejo.

Zonas de Manejo	Inspección y/o Asociación de Usuarios
Norte	Asociación de Inspecciones de Cauce del Departamento Tupungato (ICAT)
Centro Norte	Asociación de Inspecciones de Cauce de Arroyos y Vertientes del Departamento Tunuyán
Centro Sur	Inspección de Cauce Canal Matriz Valle de Uco
Sur	Inspección de Cauce Unificada Yaucha-Aguanda

Como variables respuesta también se analizó la salinidad del suelo en la zona de exploración radical de los cultivos y la salinidad del agua de riego en bocatoma de finca. Para la salinidad de suelo las variables explicativas fueron: zona de manejo, método de riego, ubicación dentro de la parcela (cabeza, medio y pie de la unidad de riego) y estrato de suelo (superior o inferior). Con respecto a la salinidad del agua, se utilizó sólo como variable explicativa la zona de manejo. Para ambas variables se procedió a su espacialización geográfica mediante el método de interpolación IDW con el software Arc View 3.2^a.

Para todos los análisis de las variables respuesta en función de sus variables explicativas se aplicó para cada caso, análisis de la varianza unifactorial, por lo cual el modelo general planteado fue:

$$\gamma_{ij} = \mu + \tau_j + \varepsilon_{ij} \quad (44)$$

donde:

γ_{ij} : es la respuesta de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento

μ : es la media general

τ_j : es el efecto del j-ésimo tratamiento

ε_{ij} : es el error de la i-ésima repetición del j-ésimo tratamiento

Las hipótesis estadísticas para cada caso son:

Hipótesis nulas H_0 : $\tau_j = 0$

Hipótesis alternativa H_1 : $\tau_j \neq 0$

Para cada caso cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias. Se utilizó la aplicación STATGRAPHICS Plus 5.1 (Statistical Graphics Corp., 2000).

Para la organización de las evaluaciones a campo se contactó a los inspectores de cauce y/o gerentes técnicos de cada una de las zonas de manejo para ponerlos en conocimiento de las necesidades o requerimiento del presente estudio. Luego de haber tomado contacto con el personal responsable de la administración del recurso agua en cada zona de manejo, se procedió a coordinar el trabajo de campo.

El equipamiento de campo utilizado, comprendió: vehículo, aforadores portátiles calibrados con dimensiones óptimas para medir el rango de caudales de manejo en finca y en surcos (“sin cuello”, “cresta ancha” y “trapezoidales”), minimolinete (marca A. OTT Kempten tipo C2 “10.150” de alta precisión), anillos infiltrómetros, nivel óptico, cintas métricas de diferentes medidas (100 m, 5 m, 3 m), relojes cronómetros, palas barreno, pesafiltros de aluminio, zapas y palas, nivel de albañil, estacas de madera, recipientes de plástico para la colección de muestras de agua y bolsas de plástico reforzadas para el muestreo de suelo. Las tareas de campo se complementaron con determinaciones en laboratorio. Las determinaciones de laboratorio antes mencionadas se realizaron en el Laboratorio de Suelos y Riegos de la EEA INTA Mendoza y en el Laboratorio de Suelos y Riego del CRA-INA.

2.2 Metodología de campo

En cada evaluación a campo se llevaron a cabo durante el evento de riego, las siguientes determinaciones:

- a) Aforo: de caudal ingresado a la propiedad, derivado a la parcela y finalmente el caudal ingresado y egresado en la parcela bajo estudio, como así también en función del método de riego, el caudal ingresado y egresado en surcos individuales representativos de las condiciones de riego de las parcelas evaluadas. Para tal actividad se utilizaron aforadores portátiles previamente calibrados del tipo “sin cuello”, “cresta ancha”, “trapezoidales” y minimolinete. Los datos obtenidos permitieron conocer el caudal de manejo y unitario como así también la eficiencia de conducción interna de la propiedad bajo análisis y finalmente, conocer el volumen de agua aplicado, escurrido e infiltrado mediante el cálculo de los hidrogramas de entrada y salida de la parcela.
- b) Ensayos de infiltración: con el método del doble anillo (Haise et al, 1956, mencionado por Grassi 1998 y Walker y Skogerboe, 1987, adaptado por “NRCS-USDA”, mencionado por Grassi 1998) en cabeza y pie de la unidad de riego.
- c) Medición del tiempo de avance y receso del frente de agua: A tal efecto se dividió la longitud total de la parcela evaluada en diez partes de igual longitud y en cada una de ellas se colocó una estaca de madera, indicadora de cada estación de medición del avance y receso. Luego de iniciarse el riego se registró en cada estación el tiempo acumulado de avance y receso del frente de agua, tal operación se ejecutó como mínimo en 3 surcos y/o melgas según el caso. La información obtenida se utilizó para determinar la ecuación de avance y los tiempos de receso que caracterizaron cada evento de riego evaluado.

- d) Medición de la pendiente longitudinal del riego: se realizó la toma de niveles a cabeza de estaca en cada una de las estaciones definidas anteriormente, determinando la pendiente parcial y total de la unidad de riego. Se utilizó nivel óptico de 24x de aumento y miras extensivas parlantes de 4 metros de longitud.
- e) Dimensiones de la unidad de riego: mediante cinta métrica se midió el largo y el espaciamiento entre surcos o ancho de melgas. Respecto a la longitud de la unidad de riego su medición se planteó desde dos puntos de vista, uno caracterizando la longitud del cuartel evaluado y otro donde se cuantificó la longitud total en función del encadenamiento del riego efectuado. En el caso de los surcos también se procedió a la medición del perímetro mojado en cabecera, medio y pie y con tres repeticiones en cada caso.
- f) Perfil transversal de surcos de riego: para conocer la geometría de los surcos se utilizó el método del perfilómetro, Walker y Skogerboe (1987). Se registraron tres perfiles transversales en surcos en cabeza, medio y pie. También para caracterizar la geometría de surcos se midió con cinta métrica el ancho superior, medio e inferior de surco y tirante de agua con tres repeticiones para cada caso en cabeza, medio y pie de la unidad de riego evaluada.
- g) Número de surcos y/o melgas regadas simultáneamente: se registró el número de surcos y/o melgas regadas en cada frente de riego según el manejo habitual del agricultor como así también el número de surcos y/o melgas sujetos a la evaluación a campo.
- h) Tiempo de aplicación: se registró el tiempo total de ingreso de agua a la parcela regada. En aquellos riegos con grandes tiempos de aplicación en la parcela, el tiempo de corte es consultado al regador, ya que el ensayo de campo se concluye cuando el desagüe de la parcela se estabiliza en el tiempo.
- i) Humedad de suelo antes y después del riego: mediante pala barreno y pesafiltros adecuadamente tarados, se obtuvieron muestras de suelo para la cuantificación de la humedad antes y después del riego en tres sitios: cabecera, medio y pie (con dos repeticiones) y dos profundidades según la exploración radical del cultivo regado (frutícolas: 0-50 cm y 50-100 cm; hortícolas: 0-25 cm y 25-50 cm). Por lo tanto de cada evaluación a campo se obtuvieron 12 muestras de humedad antes del riego y 12 muestras de humedad luego del riego.
- j) Muestras de suelo: Conjuntamente con las muestras de humedad, se extrajeron además un total de 6 muestras de suelo, en tres sitios (cabecera, medio y pie) y a dos profundidades según la exploración radical del cultivo regado (frutícolas: 00-50 cm y 50-100 cm; hortícolas: 00-25 cm y 25-50 cm).
- k) Muestra de agua: en bocatoma de finca se extrajo una muestra del agua de turno a los efectos de cuantificar su salinidad total posteriormente en laboratorio.

2.3 Metodología en gabinete y laboratorio

2.3.1 Caracterización de parámetros físicos y de manejo

La información registrada a campo fue oportunamente sistematizada en gabinete, lo que permitió posteriormente confeccionar una base de datos donde se detalla para cada

propiedad, las diferentes variables medidas. Inicialmente ello permitió la caracterización de las evaluaciones realizadas a campo según zona de manejo, cultivo y métodos de riego, como así también la célula de cultivo resultante de las parcelas sometidas al presente estudio.

Los pares de datos de las ecuaciones de infiltración obtenidas en cada una de las propiedades se utilizaron para la determinación de la ecuación que representa la curva potencial de velocidad de infiltración promedio y básica para toda la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior según Kostiakov (1932, mencionado por Grassi, 1998). El mismo análisis se realiza cuando las ecuaciones de infiltración fueron agrupadas según las unidades de suelos definidas para la cuenca del río Tunuyán Superior, según Vallone et al. (2008).

Los pares de datos de las ecuaciones de avance obtenidas en cada una de las propiedades bajo estudio se utilizaron para la determinación de la curva potencial de avance para toda la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior, según ecuación (2). Se utilizan las ecuaciones (12) y (13) para caracterizar las ecuaciones de avance en función del método de riego.

Las mediciones del perfil transversal de surcos obtenidas a campo posteriormente se grafican y permiten en cada caso el cálculo de: los coeficientes de surco, el ancho superior, medio e inferior de surco, el área de frente de flujo según ecuación (26), el perímetro mojado según ecuación (21), y el área de sección transversal de frente de flujo según ecuación (22). Los surcos fueron agrupados en categorías según su ancho superior, siendo las mismas:

Tabla 6: Categoría de surcos por intervalos de ancho superior

Categoría	Ancho Superior (cm)
Pequeño	< 40
Mediano	40-50
Grande	> 50

Para cada uno de los parámetros hidráulicos de surcos (área de frente de flujo, perímetro mojado y área de sección transversal de surco), se procedió a obtener la media y desviación estándar según su categoría de surcos, posteriormente se realizó un análisis de la varianza, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

Para cada categoría de surco definida según Tabla 6, se procedió a obtener su distribución de frecuencias observadas a campo, referidas a los distintos cultivos (frutícolas y hortícolas) y para el método de riego empleado (con desagüe y sin desagüe).

Los caudales de manejo y unitarios, fueron caracterizados según zona de manejo, estación del año, cultivo y método de riego. Los parámetros referidos a la pendiente longitudinal de la unidad de riego, tiempo de aplicación, número de surcos o melgas regados simultáneamente y la longitud del surco o melga fueron caracterizados según cultivo y método de riego. Para cada caso se calculó su media y desviación estándar, posteriormente se realizó análisis de la varianza, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

2.3.2 Modelos matemáticos de simulación y evaluación del desempeño del riego

Con la información obtenida a campo y mediante proceso en gabinete se obtuvieron los datos necesarios en cada una de las propiedades agrícolas bajo estudio para proceder a la cuantificación de los distintos parámetros de desempeño del evento riego. A tal fin se utilizaron 3 modelos matemáticos: ERFIN (Morábito et al, 1991), SIRMOD (Walker et al, 1993), considerado modelo más preciso, aceptado y difundido en el ámbito internacional y WINSRFR (USDA, 2009), modelo de reciente actualización cuyo uso se orientará a la determinación de escenarios de optimización, ya que presenta un módulo práctico y específico para tal fin. Se considera finalmente como modelo de referencia, por lo motivos explicados anteriormente, al modelo SIRMOD.

2.3.3 Cálculo de láminas de riego

Las diferentes láminas de riego que caracterizaron el evento de riego se determinaron de la siguiente manera:

- a) Lámina de reposición (dr): diferencia del contenido de humedad del suelo antes del riego respecto de la capacidad de campo.
- b) Lámina bruta (db): relación de volumen del agua ingresada a la parcela regada y su superficie.
- c) Lámina infiltrada (dinf): diferencia de la lámina bruta aplicada y la lámina escurrida al pie de la parcela.
- d) Lámina escurrida (de): producto del caudal escurrido al pie de la parcela y el tiempo de escurrimiento referido al área regada.
- e) Lámina almacenada (dal): diferencia del contenido de humedad del suelo antes y después del riego.
- f) Lámina percolada (dper): lámina infiltrada y que ha superado la profundidad radical del cultivo de la parcela regada. Diferencia entre la lámina infiltrada respecto de la almacenada.

Para cada lámina de riego se calculó su media y desviación estándar, posteriormente se realizó un análisis de la varianza, utilizando las láminas de riego calculadas como

variables respuesta y a las variables categóricas como explicativas (zona de manejo, estación, cultivo y método de riego), de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

2.3.4 Cálculo de parámetros de desempeño del riego

Los parámetros del desempeño para cada evento de riego evaluado fueron calculados utilizando los modelos SIRMOD y ERFIN, estos conceptualmente representan:

- 1) ECI (eficiencia de conducción interna): caudal recibido en la parcela regada respecto al caudal derivado en bocatoma de finca. Se calculó solamente con el modelo ERFIN.
- 2) EAP: (eficiencia de aplicación): cociente entre el volumen de agua almacenado en el perfil del suelo explorado por las raíces de los cultivos y el volumen de agua entrado a la parcela regada. Se calculó con ambos modelos.
- 3) EDI (eficiencia de distribución): lámina media infiltrada del cuarto más perjudicado respecto a la lámina media infiltrada en todo el perfil. Calculado con ambos modelos.
- 4) EDIa (eficiencia de distribución absoluta): relación entre la lámina mínima y la lámina media infiltrada en la parcela regada. Solamente se calculó con el modelo SIRMOD.
- 5) EAL (eficiencia de almacenaje): lámina almacenada en el perfil del suelo luego de un evento de riego respecto a lámina que se necesitaba almacenar. Calculado con ambos modelos.
- 6) Ep (porcentaje de escurrimiento al pie): relación entre el volumen de agua escurrido y el volumen total de agua aplicado. Calculado mediante el balance de volúmenes aportado por el modelo SIRMOD.
- 7) Pp (porcentaje de percolación profunda): relación entre el volumen de agua percolado y el volumen total de agua aplicado. Se obtiene mediante los valores calculados de EAP y Ep ($Pp = 100 - EAP - EP$)
- 8) ERI (eficiencia de riego interna): producto de la eficiencia de aplicación por la eficiencia de conducción interna. El modelo ERFIN realiza su cálculo, mientras que el para el modelo SIRMOD se calculó fuera del entorno del modelo mediante el producto del valor de EAP obtenida previamente con el modelo y la ECI medida a campo con molinete.

2.3.4.1 Caracterización del desempeño del riego

Para las siguientes variables respuestas: EAP (eficiencia de aplicación), EAL (eficiencia de almacenaje), EDI (eficiencia de distribución), Ep (porcentaje de escurrimiento al pie) y Pp (porcentaje de percolación profunda) calculadas con el modelo SIRMOD, se obtuvo la

media, desviación estándar y error de muestreo. Luego se realizó el mismo proceso agrupando los datos de las variables respuestas según las siguientes categorías o factores de las variables explicativas:

- 1) Zona de manejo: Norte, Centro Norte, Centro Sur y Sur.
- 2) Estación: Otoño, Primavera, Verano.
- 3) Cultivos: Frutícolas (vid, frutales y alfalfa, con una profundidad de exploración radical de 0,80 a 1,30 m) y Hortícolas (hortalizas, aromáticas y flores, con una profundidad de exploración radical que se extiende hasta los 0,50 m).
- 4) Métodos de riego: con desagüe (c/D) y sin desagüe (s/D).
- 5) Criterio de análisis: Cuartel y Finca.

Para cada caso posteriormente se realizó análisis de la varianza, utilizando las eficiencias calculadas como variables respuesta y a las variables categóricas como explicativas, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

2.3.4.2 Estimación del error de muestreo

Se procedió a estimar el error de muestreo para una confiabilidad del 95% para las variables EAP, EDI, EAL, Ep, Pp, CEes y CEagua, según la siguiente ecuación:

$$\pm B = z \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (45)$$

donde:

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

2.3.5 Análisis de muestras de suelo y agua en laboratorio

En cada una de las propiedades evaluadas se extrajeron 6 muestras de suelo según detalla metodología del punto 5.2. Las muestras de suelo fueron trasladadas al Laboratorio de Suelos y Riego de la EEA INTA Mendoza para la medición de la Conductividad Eléctrica del Extracto de Saturación (CEes), en dS m^{-1} a 25°C , conjuntamente se determinó el volumen de sedimentación (Nijensohn, 1978), cuyo valores se expresaron en $\text{mL}\% \text{g}^{-1}$ y pH de la pasta saturada (pHp). Con los valores obtenidos de CEes se realizó el promedio para la toda la propiedad (CEespr) y para la profundidad muestreada en

cabeza (CEescab), medio (CEesmed) y pie (CEespie) de la unidad de riego (Tabla 51 del anexo). De cada finca visitada también se extrajeron muestras de humedad de suelo y de agua en bocatoma de finca según detalla metodología del punto 5.2. Tales muestras fueron llevadas al laboratorio de Suelos y Riego del CRA-INA para su análisis. Las muestras de humedad de las condiciones antes y después de riego se secaron en estufa a 105°C y sus valores se expresaron en g%g⁻¹, en las muestras de aguas se procedió a la determinación de su conductividad eléctrica total, la cual se expresó en dS m⁻¹ (Tabla 51 del anexo).

2.3.5.1 Determinación de la eficiencia de distribución según muestras de humedad de suelo obtenidas a campo (EDI_H)

Para cada una de las evaluaciones a campo se procedió al cálculo de la eficiencia de distribución según la humedad de las muestras de suelo obtenidas a campo, expresadas como lámina de agua, considerando la densidad aparente y el espesor de cada estrato de suelo: así se obtuvieron 6 láminas distribuidas entre cabecera, medio y pie para dos repeticiones.

Para obtener la eficiencia de distribución según ecuación (35), se necesita conocer el valor de la lámina en el cuarto más perjudicado, como el cuarto más perjudicado para las 6 láminas obtenidas es 1,5 se calcularon las eficiencias de distribución para todas las opciones posibles, desde 1/6 a 6/6. Se ajustó una ecuación potencial a las 6 opciones posibles de cálculo respecto a su eficiencia de distribución, permitiendo obtener para cada caso los coeficientes necesarios para obtener de forma precisa la eficiencia de distribución del cuarto más perjudicado.

Finalmente se obtuvo la media, desviación estándar y error de muestreo. Luego se realizó el mismo proceso agrupando los datos de las variables respuestas según las siguientes categorías o factores de las variables explicativas:

- 6) Zona de manejo: Norte, Centro Norte, Centro Sur y Sur.
- 7) Estación: Otoño, Primavera, Verano.
- 8) Cultivos: Frutícolas (vid, frutales y alfalfa, con una profundidad de exploración radical de 0,80 a 1,30 m) y Hortícolas (hortalizas, aromáticas y flores, con una profundidad de exploración radical que se extiende hasta los 0,50 m).
- 9) Métodos de riego: con desagüe (c/D) y sin desagüe (s/D).
- 10) Criterio de análisis: Cuartel y Finca.

Para cada caso posteriormente se realizó análisis de la varianza, utilizando las eficiencias calculadas como variables respuesta y a las variables categóricas como explicativas, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en

lugar de las medias.

2.3.5.2 Evaluación de la respuesta de la salinidad del suelo a diferentes factores

Con los datos obtenidos en laboratorio de salinidad de suelo se obtuvo la media, desviación estándar y error de muestreo respecto a las variables explicativas que tomaron las siguientes categorías o factores:

- 1) Zona de manejo: Norte, Centro Norte, Centro Sur, Sur.
- 2) Cultivos: Frutícolas y Hortícolas.
- 3) Ubicación dentro de la parcela: Cabeza, Medio, Pie.
- 4) Estrato de suelo: Primero y Segundo.
- 5) Método de riego: surcos con desagüe (Sc/D), surcos sin desagüe (Ss/D), melgas con desagüe (Mc/D) y melgas sin desagüe (Ms/D).

Posteriormente se realizó análisis de la varianza para conocer si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

2.3.6 Relación entre la salinidad del suelo y el desempeño del riego

Se consideraron las siguientes variables para cuantificar la relación existente entre el desempeño del riego y la salinidad de suelo analizada:

Variables respuesta:

- 1) CV: Coeficiente de variación de la CEes para ambas profundidades de suelo muestreado y en las tres ubicaciones dentro de la parcela.
- 2) CV1: Coeficiente de variación de CEes del primer estrato de suelo analizado para todas la ubicaciones dentro de la parcela.
- 3) CV2: Coeficiente de variación de la CEes del segundo estrato de suelo muestreado para todas la ubicaciones dentro de la parcela.

Variable explicativa principal:

- 1) EDI: Eficiencia de distribución interna, según resultados del modelo SIRMOD.

La variable explicativa principal a su vez fue agrupada según las categorías o factores de las siguientes variables explicativas secundarias:

- 1) EAP: Eficiencia de aplicación, según resultados de modelo SIRMOD.
 - a) EAP: toma cualquier valor
 - b) EAP: igual a 100%
 - c) EAP: mayor o igual a 80% y menor al 100%
 - d) EAP: menor del 80%

- 2) EAL: Eficiencia de almacenaje, según modelo SIRMOD.
 - a) EAL: toma cualquier valor
 - b) EAL: igual al 100%
 - c) EAL: mayor o igual a 80% y menor al 100%
 - d) EAL: menor del 80%
- 3) Cultivo:
 - a) Frutícolas
 - b) Hortícolas
- 4) Método de riego:
 - a) con desagüe (c/D)
 - b) sin desagüe (s/D).

Para establecer la relación existente entre el desempeño del riego y la salinidad observada en la rizósfera de los cultivos, se procedió a la ejecución de diversas regresiones lineales simples y múltiples, de forma tal de poder detectar que proceso es el que mejor discrimina los datos y por la tanto la relación antes mencionada.

2.3.7 Análisis de la variación de la salinidad del agua de riego superficial en bocatoma de finca en las distintas zonas de manejo.

Con los datos obtenidos de salinidad del agua de riego derivada en cada una de las evaluaciones realizadas, se obtuvo la media, desviación estándar y error de muestreo, finalmente se procedió a la ejecución del análisis de la varianza considerando solamente como variable explicativa la zona de manejo, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

Finalmente se procedió, por zonas de manejo, a calcular las sales aportadas por litro de agua de riego según metodología propuesta por Ayers y Wescot (1976) y el incremento salino según metodología propuesta por Avellaneda et al (2004).

2.3.8 Desempeño potencial del riego

El desempeño de riego potencial de cada una de las propiedades evaluadas se califica en función de dos criterios ó metodologías a saber:

- 1) Según manejo racional de la operación del riego
- 2) Según el balance salino de la zona de la rizósfera de los cultivos

2.3.8.1 Desempeño del riego potencial según el manejo del método de riego (EAP_M)

El desempeño de riego potencial indica el grado de eficiencia máxima u óptima que puede alcanzar el método de riego si su manejo a campo es óptimo, se caracteriza por la siguiente expresión (Morábito, 2003):

$$EAP_M = \frac{dr_{opt}}{db} \times 100 \quad (40)$$

donde:

EAP_M : eficiencia de aplicación potencial según el manejo del método de riego (%)

db : lámina bruta aplicada en el riego.

dr_{opt} : lámina de riego o reposición óptima a aplicar en el riego.

Para cada una de las propiedades evaluadas se calculó el desempeño del riego potencial según el manejo del método de riego mediante el modelo matemático SIRMOD, para tal fin sobre el entorno de cálculo del programa se procedió a la modificación de ciertas variables tales como: caudal unitario, tiempo de aplicación, lámina de reposición, intervalo de riego, pendiente y longitud de la unidad de riego. En función del proceso de optimización del riego evaluado para cada valor de EAP_M , se obtuvieron sus correspondientes coeficientes de escurrimiento y percolación: Ep_M (porcentaje de escurrimiento al pie potencial de manejo) y Pp_M (porcentaje de percolación potencial de manejo), cuyos valores tienden a minimizarse y equilibrarse al máximo posible (Tabla 56 del anexo).

Para la variables respuesta EAP_M , Ep_M y Pp_M , posteriormente se obtuvo la media y desviación estándar. Luego se realizó el mismo proceso agrupando los datos de la variable respuesta según las siguientes categorías o factores de las variables explicativas:

- 1) Zona de manejo: Norte, Centro Norte, Centro Sur y Sur.
- 2) Estación: Otoño, Primavera y Verano.
- 3) Cultivos: Frutícolas y Hortícolas.
- 4) Métodos de riego: con desagüe (c/D) y sin desagüe (s/D).

Para cada caso posteriormente se realizó análisis de la varianza, utilizando a EAP_M , Ep_M y Pp_M como variables respuesta y a las variables categóricas como explicativas, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

2.3.8.2 Desempeño del riego potencial según el balance salino de suelo explorado por las raíces de los cultivos (EAP_s)

En una primera etapa, se realizó un análisis de la evapotranspiración potencial, precipitación total y efectiva proveniente de las estaciones meteorológicas: San Carlos y La Consulta, para lo cual se analizaron sus datos en un intervalo mensual y para un período de 10 años. Posteriormente se procedió a obtener la evapotranspiración máxima de cultivo mediante los valores de Kc respectivos. Con esta información se realizó un análisis de probabilidad de ocurrencia obteniendo los valores de evapotranspiración de los cultivos, precipitación total y efectiva para tres probabilidades de ocurrencia: 20, 50 y 80%, considerando las demandas agroclimáticas de riego para los cultivos analizados. Los valores para cada estación meteorológica y cultivos analizados se encuentran en las Tablas 58 y 59 del anexo.

En una segunda etapa, para cada una de las propiedades agrícolas evaluadas se procedió al cálculo de la lámina de percolación (dper) y lámina bruta (db), que en cada caso garanticen un adecuado balance salino en la zona de las rizósfera según Maas y Hoffman (1977) y Vallone y Nijensohn (2002).

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, su cálculo se efectuó según ecuación propuesta por Van Der Molen (1983):

$$dper = \frac{(ETc - PP) \times CE_{agua} - 2 \times \left(\frac{Wc \times D}{100} \right) \times (CE_{esf} - CE_{esi})}{f \times (CE_{esf} + CE_{esi} - CE_{agua})} \quad (46)$$

donde:

- ETc: evapotranspiración de cultivo (mm año⁻¹)
- PP: precipitaciones (mm año⁻¹)
- CE_{agua}: 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)
- CE_{esf}: conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo final, luego del ciclo de riego (dS m⁻¹)
- CE_{esi}: conductividad eléctrica el extracto de saturación del suelo inicial del ciclo de riego (dS m⁻¹)
- f: eficiencia de lavado.

Lámina de riego bruta (db): 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 (Van Der Molen 1983):

$$db = ETc - PP + dper \quad (32)$$

La eficiencia de aplicación potencial según balance salino del suelo: relación entre la lámina media infiltrada y almacenada en la zona radical y lámina media aplicada en el riego, considerando el requerimiento de lixiviación. Tal relación representa la eficiencia de aplicación máxima que permitiría mantener un adecuado balance salino aceptable en la rizósfera del cultivo, según los fines productivos, por lo cual:

$$EAP_s = \frac{ETc - PP}{db} \times 100 \quad (41)$$

Donde:

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

Finalmente la EAPs para cada propiedad agrícola estudiada es afectada por la EDI, de forma tal de garantizar el balance salino requerido en toda la unidad de riego evaluada. Posteriormente se procedió a determinar la media y desviación estándar.

En una tercera etapa, sobre la base de la información obtenida en las etapas anteriores, se procedió al cálculo de la media y su desviación estándar para EAP_s, agrupándola según las siguientes variables explicativas y categorías o factores de las mismas:

- 1) Cultivo: vid, frutales de carozo, frutales de pepita, nogal, hortalizas de invierno, hortalizas de verano y orégano.
- 2) Zona de Manejo: norte, centro norte, centro sur y sur.
- 3) Estación meteorológica: La Consulta y San Carlos.
- 4) Textura de suelo: arenoso, franco arenoso, franco, franco limoso, franco arcilloso.

Para cada caso posteriormente se realizó análisis de la varianza, utilizando EAP_s como variables respuesta y a las variables categóricas como explicativas, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

En una cuarta etapa, para la variable respuesta EAPs, se realizó un análisis de sensibilidad con los siguientes niveles de las variables que la componen:

- 1) Evapotranspiración: máxima, 90% del valor máximo, y 80% del valor máximo.
- 2) Precipitación: 50% del total, precipitación efectiva (80% del total) y precipitación nula (PP = 0)
- 3) CEesf: igual a la CEes del inicio del ciclo de riego, 90% de la CEes inicial, 110% de la CEes inicial.
- 4) CEagua: valor actual, 90% del valor actual, 110% del valor actual.

Luego para cada caso se procedió al cálculo de la media y su desviación estándar, finalmente se realizó análisis de la varianza, utilizando EAP_s como variables respuesta y a las variables categóricas como explicativas, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

Finalmente en una quinta y última etapa, se calculó la media de CEes ponderada por zona de manejo y la media y desviación estándar de EAP_s por zona de manejo, en ambos casos según el criterio propuesto por Maas y Hoffman (1977), para alcanzar un 90 y 100% de la producción y el criterio propuesto por Vallone y Nijensohn (2002), para alcanzar un 100% de la producción. Se comparó la CEes ponderada respecto a la CEes actual y para la variable respuesta EAPs se realizó un análisis de la varianza, utilizando a las variables categóricas como explicativas, de forma tal de comprobar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias analizadas. Cuando el estadístico F fue significativo se aplicó la prueba de comparaciones múltiples de Scheffé para un nivel de significancia del 5%, los test de rangos múltiples permitieron identificar las medias que son significativamente diferentes unas de otras. En caso de falta de normalidad de los datos analizados se procedió al análisis de los mismos mediante el test de Kruskal-Wallis que compara las medianas en lugar de las medias.

2.3.9 Comparación entre eficiencias de aplicación potenciales obtenidas por diferentes métodos de riego.

Se procedió a la comparación del desempeño del riego actual, potencial y cambiando el método de riego para su discusión final por zonas específicas.

Se calculó por zona de manejo el desempeño potencial promedio según el método de riego y se cuantificó las diferencias porcentuales entre el desempeño actual y potencial.

2.3.10 Escenarios de optimización

Mediante el uso de modelos matemáticos se procedió a la determinación de escenarios de riego óptimos para las modalidades de riego más frecuentes en cada una de las zonas de manejo.

Inicialmente se identificaron los cultivos y aquellos parámetros físicos de riego (longitud, familia de infiltración y pendiente de riego) más frecuentes para cada zona de manejo. Para cada caso, en una segunda etapa se definió un rango de caudales y tiempos de aplicación razonables de manejo, evaluando esta etapa con el modelo SIRMOD para ajustar adecuadamente el rango de las variables mencionadas. En una tercera etapa, se definen las láminas de riego a aplicar según cultivo y etapa fenológica.

En una cuarta etapa, se resolvieron los múltiples escenarios planteados mediante el módulo “Operations Analysis” del modelo WINSRFR, de forma tal de optimizar la operación del métodos de riego. El módulo “Operations Analysis” generó curvas de performance, en función de las variables de decisión, utilizando para su cálculo la metodología del balance de volúmenes calibrada según resultados del modelo matemático de inercia cero. Las curvas de performance permitieron identificar las combinaciones de caudales y tiempos de riego que mejor ajustaron a los objetivos de riego planteados para cada escenario. El módulo “Operations Analysis”, también permitió integrar los resultados de la optimización en un gráfico que mostró la relación entre la eficiencia de aplicación, caudal unitario y el tiempo de aplicación o corte. Las curvas de este gráfico representaron puntos donde las láminas de riego objetivo se igualaron con las láminas mínimas aplicadas.

En una quinta etapa, con los resultados obtenidos de las etapas anteriormente mencionadas, se construyeron gráficos de decisión para la operación del método de riego, donde se integraron todas las variables de desempeño del riego por superficie. Finalmente, los gráficos de optimización obtenidos, se validaron mediante el modelo SIRMOD para la verificación de la consistencia de sus resultados.

3. RESULTADOS

3.1 Evaluaciones realizadas, fechas, cultivos y métodos de riego

Se realizaron un total de 48 evaluaciones a campo (35% en otoño, 35% en primavera y 30% en verano). La diferencia en la cantidad y/o porcentaje de evaluaciones realizadas con respecto a la estación verano y a las planificadas para el total del presente estudio, se debe a la gran cantidad de tormentas de lluvia ocurridas en dicha estación durante el periodo 2007-2008. (Tabla 7a.1)

En cuanto a los métodos de riego superficiales utilizados para irrigar los cultivos bajo la cuenca en estudio, predominan los sistemas de riego con desagüe al pie (79%), respecto a los sistemas de riego sin desagüe (21%). En cuanto al sistema de riego utilizado predominan los surcos con desagüe (63%), posteriormente las melgas con desagüe (17%), finalmente los surcos y melgas sin desagüe (ambos en un 10%). (Tabla 7b.1)

La célula de cultivo evaluada es muy próxima a la presentada mediante análisis de imágenes satelitales recientes (Femenía y Mustoni, 2009), por lo que afirmamos, que tanto por su cantidad, como por su distribución en el territorio y a lo largo del ciclo agrícola, la muestra bajo estudio es representativa de las características agrícolas de la zona bajo estudio. (Figura 6)

En Tabla 50 del Anexo se detallan los datos de identificación de cada una de las propiedades evaluadas. Las siguientes tablas, particularizan las evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona de manejo, cultivo y método de riego. En función del método de riego se designa el siguiente detalle: (S) corresponde a surcos, (M) melgas, (c/D) con desagüe y (s/D) sin desagüe.

Tabla 7a.1: Cantidad de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.

Variable	Estación			Total	Total General
	Otoño	Primavera	Verano		
Zona	Norte	4	3	2	9
	Centro Norte	6	6	5	17
	Centro Sur	4	4	4	12
	Sur	3	4	3	10
Cultivo	Frutícola	11	12	12	35
	Hortícola	6	5	2	13
Método de riego	S c/D	11	11	8	30
	S s/D	2	1	2	5
	M c/D	3	4	1	8
	M s/D	1	1	3	5

Tabla 7a.2: Porcentaje de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.

Variable		Estación			Total	Total General
		Otoño	Primavera	Verano		
Zona	Norte	8%	6%	4%	19%	100%
	Centro Norte	13%	13%	10%	35%	
	Centro Sur	8%	8%	8%	25%	
	Sur	6%	8%	6%	21%	
Cultivo	Frutícola	23%	25%	25%	73%	100%
	Hortícola	13%	10%	4%	27%	
Método de riego	S c/D	23%	23%	17%	63%	100%
	S s/D	4%	2%	4%	10%	
	M c/D	6%	8%	2%	17%	
	M s/D	2%	2%	6%	10%	

Tabla 7b.1: Cantidad de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.

Cultivo	Método de riego	Zona de Riego				Total General
		Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur	
Frutícola	S c/D	6	2	9	-	17
	S s/D	2	2	-	1	5
	M c/D	1	5	1	1	8
	M s/D	-	4	-	1	5
Hortícola	S c/D	-	4	2	7	13
Método de riego	S c/D	6	6	11	7	30
	S s/D	2	2	-	1	5
	M c/D	1	5	1	1	8
	M s/D	-	4	-	1	5
Total general		9	17	12	10	48

Tabla 7b.2: Porcentaje de evaluaciones efectuadas, desagregadas por zona, cultivo y método de riego.

Cultivo	Método de riego	Zona de Riego				Total General
		Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur	
Frutícola	S c/D	13%	4%	19%	-	36%
	S s/D	4%	4%	-	2%	10%
	M c/D	2%	10%	2%	2%	16%
	M s/D	-	8%	-	2%	10%

Cultivo	Método de riego	Zona de Riego				Total General
		Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur	
Hortícola	S c/D	-	8%	4%	15%	27%
	M c/D	2%	10%	2%	2%	17%
Método de riego	M s/D	-	8%	-	2%	10%
	S c/D	13%	13%	23%	15%	63%
	S s/D	4%	4%	-	2%	10%
Total general		19%	35%	25%	21%	100%

Tabla 7c: Resumen porcentual de la distribución del método de riego por zona de análisis y bajo toda la cuenca irrigada.

Zona	M c/D	M s/D	S c/D	S s/D	Total	c/D	s/D
Norte	11%	0%	67%	22%	100%	78%	22%
Centro Norte	29%	24%	35%	12%	100%	65%	35%
Centro Sur	8%	0%	92%	0%	100%	100%	0%
Sur	10%	10%	70%	10%	100%	80%	20%
Total general	17%	10%	63%	10%	100%	79%	21%

La figura 5 presenta el mapa del área de estudio con: la localización de las propiedades evaluadas, la delimitación de cuenca y zonas de manejo, las estaciones meteorológicas y sus correspondientes polígonos de Thiesen.

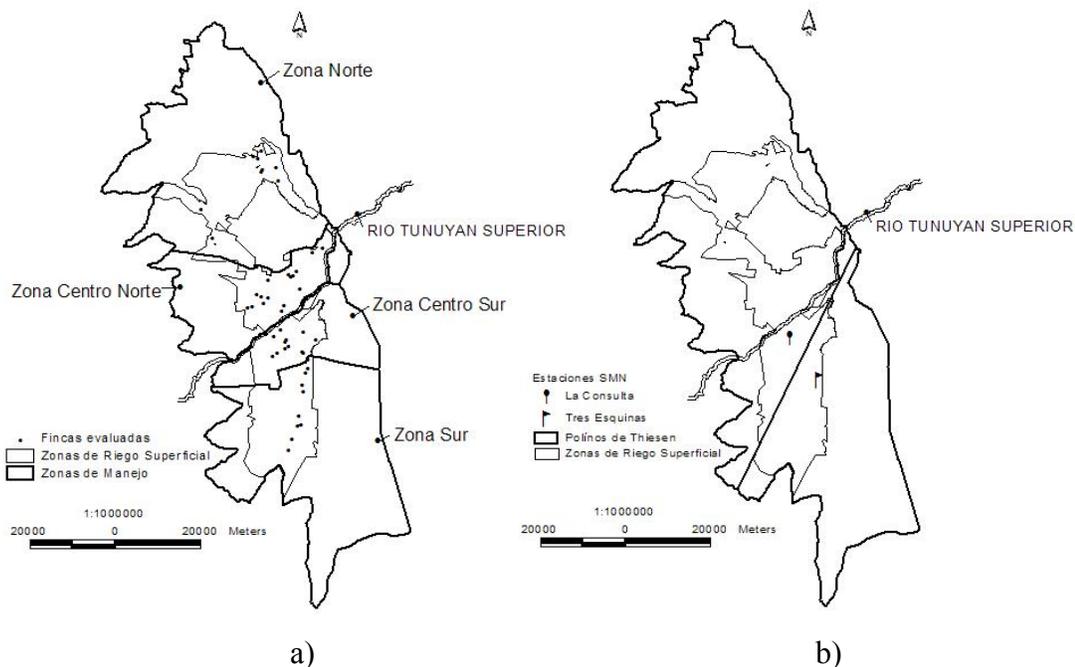


Figura 5: Mapa del área de estudio: a) localización de las propiedades evaluadas, delimitación de cuenca y zonas de manejo; b) estaciones meteorológicas y sus correspondientes polígonos de Thiesen; correspondientes al área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Tabla 8: Célula de cultivo de cuenca evaluada

Tipo Cultivo	Cultivo	% Total
Vid	19	40%
Frutal	15	31%
Hortaliza	13	27%
Pastura	1	2%
Río Tunuyán Superior	48	100%

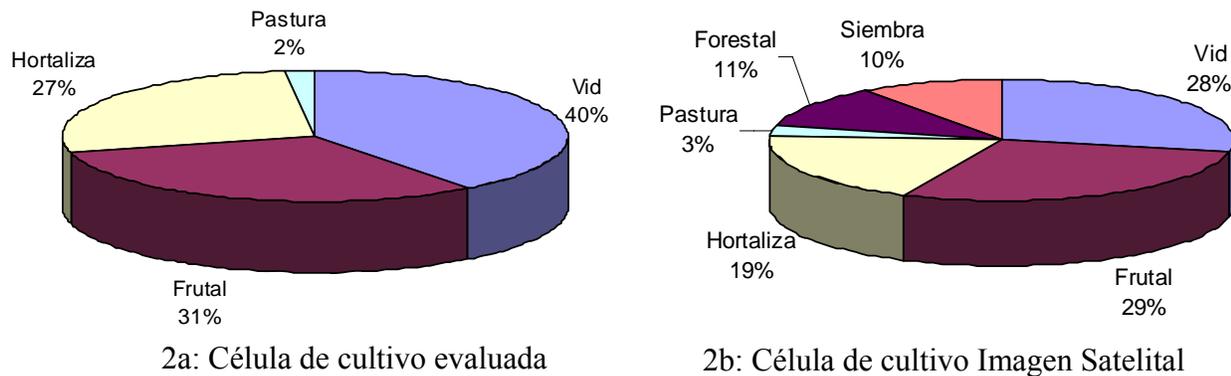


Figura 6: a) Célula de cultivo de cuenca evaluada y b) Célula de cultivo cuantificada mediante imágenes satelitales Quik Bird (Femenía y Mustoni, 2009)

3.2 Parámetros físicos y de manejo

La Tabla 54 del anexo presenta para cada propiedad los parámetros físicos y de manejo cuantificados en las evaluaciones a campo. En dicha tabla se detalla para cada propiedad, los parámetros de la ecuación de infiltración de Kostiakov (A y B) (1932, mencionado por Grassi, 1998), el valor de infiltración básica del suelo (Ib), parámetros de la ecuación de avance (p y r) (Grassi 1998), el caudal de manejo utilizado por el regador, en la tapada de riego, el caudal unitario por surcos ($L s^{-1}$) y para melgas ($L s^{-1} m^{-1}$), la pendiente del terreno y la relación V_{inf}/V_{en} (expresado en porcentaje), que representa la porción del volumen de agua entrado que se infiltra en la propiedad.

3.2.1 Infiltración

La siguiente ecuación representa la curva de velocidad de infiltración promedio y la velocidad de infiltración básica para toda la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior. La misma fue ajustada sobre 1059 pares de datos provenientes de los ensayos de infiltración realizados en cabeza y pie en cada una de las propiedades evaluadas.

$$I_{cum} = A \times t^B = 19,35 \times t^{0,304} \quad (47)$$

$$I_b = 5,29 \text{ mm h}^{-1} \quad (48)$$

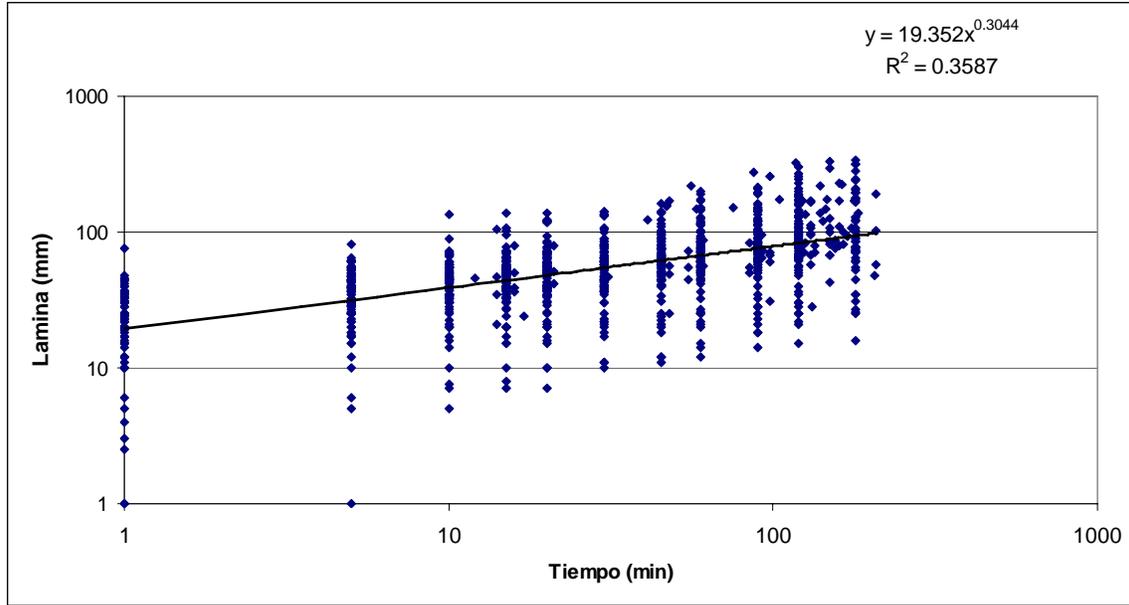


Figura 7: Ecuación potencial que ajusta a la totalidad de los ensayos de infiltración realizados en el área regadía del río Tunuyán Superior.

En Tabla 9 se detalla los resultados de las ecuaciones de infiltración, agrupadas en función de la unidades de suelo definidas por Vallone et al. (2008), se incluye los coeficientes (A) y los exponentes (B) de la ecuación de Kostiakov, se detalla el número de propiedades evaluadas para cada serie, la cantidad de pares de datos utilizados, los coeficientes de correlación (R^2), los valores de infiltración básica (Ib), el tiempo que demora en infiltrarse 100 mm de agua (T_{100}), la infiltración básica en pulgadas/hora ($F_n = \text{'' h}^{-1}$) identificando la familia de infiltración que representa cada unidad de suelo. Las curvas de infiltración de cada unidad de suelo se presentan en la figura 8.

Tabla 9: Parámetros de la ecuación de Kostiakov para las distintas unidades de suelo para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior. A y B: coeficiente y exponente de la ecuación de infiltración de Kostiakov, número de Fincas evaluadas, número de pares de datos utilizados, Ib: infiltración básica, T100: tiempo en infiltrarse 100 mm de agua, F_n : valor de la familia de infiltración.

Unidad	A	B	N Fincas	N Pares	Ib (mm h^{-1})	T100 (min)	F_n ('' h^{-1})	R^2	P <
Aguanda	20,50	0,198	4	77	2,46	481	0,10	0,70	0,000
Consulta Este	21,87	0,339	9	203	8,52	89	0,34	0,48	0,000
Consulta Oeste	21,42	0,288	2	44	4,96	211	0,2	0,76	0,000
Cordon del Plata	21,73	0,250	1	22	3,34	448	0,13	0,85	0,000
E Bustos	22,38	0,282	5	110	4,86	202	0,19	0,52	0,000
El Zampal	6,08	0,409	2	44	4,64	940	0,18	0,32	0,000
Las Carreras	39,52	0,347	1	20	16,72	14	0,66	0,96	0,000
Las Pintadas	14,94	0,292	7	154	3,61	672	0,14	0,33	0,000
Las Tunas	20,86	0,445	2	44	22,18	34	0,87	0,78	0,000
San Carlos	14,81	0,213	1	22	1,49	7836	0,06	0,53	0,000
Tunuyán	13,27	0,291	2	44	3,17	1033	0,12	0,31	0,000
Tupungato	23,33	0,275	4	88	4,7	199	0,19	0,31	0,000

Unidad	A	B	N Fincas	N Pares	Ib (mm h ⁻¹)	T100 (min)	Fn (" h ⁻¹)	R ²	P <
Vista Flores	22,2	0,304	7	154	6,07	141	0,24	0,58	0,000
Río Tun. Sup.	19,35	0,304	48	1059	5,29	222	0,21	0,36	0,000

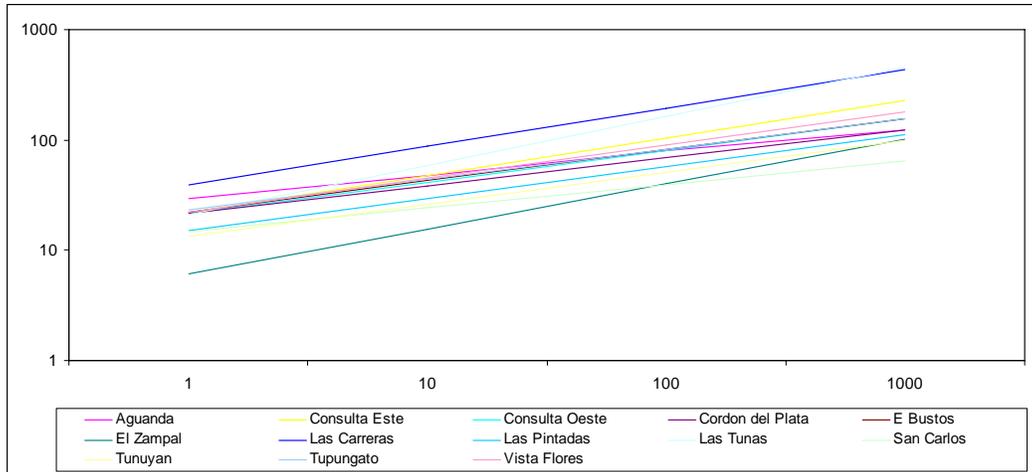


Figura 8: Curvas de infiltración características de las unidades de suelos del área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

3.2.2 Avance

La siguiente ecuación de avance representa la curva potencial de avance para toda la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

$$x = p \times t^r = 9,94 \times t^{0,55} \quad (48)$$

La misma ecuación resulta del ajuste de 1459 pares de datos provenientes de los ensayos de avance en cada una de las propiedades evaluadas.

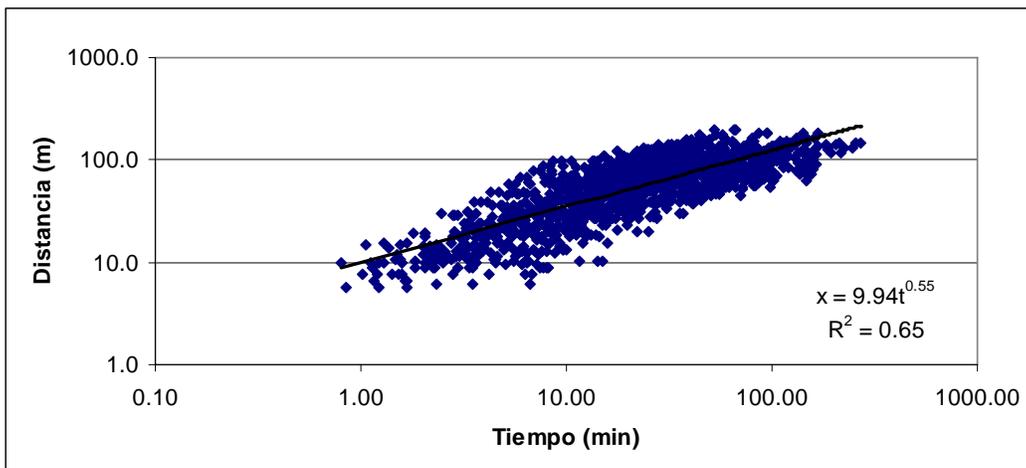


Figura 9: Distancia avanzada por el frente de agua para distintos tiempo en el área irrigada por el río Tunuyán Superior.

Los parámetros de la ecuación de avance fueron calculados sobre la base de 1459 pares de datos (922 para surcos con desagüe, 150 para surcos sin desagüe, 210 para melgas con desagüe y 150 para melgas sin desagüe; Tablas 10 y 11). No se presentan diferencias según se hayan calculado por ecuaciones 12 ó 13.

Tabla 10: Estimación de parámetros de avance “p” y “r” según ecuación (12) para el frente de agua en función del método de riego para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Método de riego	n	p	r	R ²	P
Sc/D	922	9,90	0,60	0,67	P<0,000
Ss/D	150	8,17	0,56	0,79	P<0,000
Mc/D	210	9,86	0,61	0,86	P<0,000
Ms/D	150	5,57	0,58	0,80	P<0,000
Con desagüe	1132	9,96	0,58	0,67	P<0,000
Sin desagüe	300	7,49	0,55	0,76	P<0,000

Tabla 11: Estimación de parámetros de avance “u”, “s” y “r” según ecuación (13) para el frente de agua en función del método de riego para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Método de riego	n	u	s	r	R ²	P
Sc/D	922	10,10	0,12	0,59	0,68	P<0,000
Ss/D	150	7,02	0,44	0,59	0,81	P<0,000
Mc/D	210	6,46	0,48	0,64	0,83	P<0,000
Ms/D	150	4,98	0,23	0,62	0,86	P<0,000
Con desagüe	1132	10,19	0,15	0,58	0,68	P<0,000
Sin desagüe	300	6,62	0,30	0,57	0,80	P<0,000

3.2.3 Geometría del surco

Mediante los datos relevados de la geometría de surco a campo, se procede a la clasificación de los mismos en tres categorías bien diferenciadas en función del ancho superior de surco (Tabla 12).

Tabla 12: Parámetros físicos de surco, ancho superior, ancho medio, ancho inferior y tirante (cm).

Categoría	n	Parámetros físicos de surco (cm)							
		Ancho Superior		Ancho Medio		Ancho Inferior		Tirante	
		Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD
Pequeño	12	31,66 c	6,31	23,44 c	3,89	14,63 b	3,42	3,20 a	1,20
Mediano	16	44,36 b	2,86	31,58 b	3,65	19,42 a	3,71	4,29 a	1,67
Grande	7	57,11 a	5,50	36,13 a	4,26	19,56 a	2,44	4,95 a	1,88

Respecto al ancho superior y medio se observan diferencias significativas para cada una de las categorías de surcos antes mencionadas.

Para el ancho inferior de surcos solo se observa diferencia estadísticamente significativa respecto a la categoría de surcos “pequeño”, con valores menores respecto a las categorías, “mediano” y “grande”. No se observan diferencias estadísticamente significativas para el ancho inferior de surco entre las categorías “mediano” y “grande”.

En función de los análisis estadísticos podemos afirmar que no existe diferencia estadísticamente significativa para los tirantes de agua en surcos en ninguna de las categorías de surco.

A partir de las dimensiones geométricas de surcos relevadas a campo, se obtienen los distintos coeficientes de forma de surco que caracterizan a cada una de las categorías de surcos propuestas (Tabla 13).

Tabla 13: Coeficientes calculados para las distintas categorías de surcos consideradas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Categoría	σ_1	σ_2	γ_1	γ_2	α_1	α_2	ρ_1	ρ_2
Pequeño	0,6273	1,2870	1,8290	0,3508	0,4337	1,4087	0,4471	2,8656
Mediano	0,8631	1,3186	2,3591	0,3815	0,4902	2,0746	0,3184	2,8247
Grande	1,3641	1,4375	3,7040	0,4621	0,6605	4,1315	0,1745	2,7173

La figura 10 muestra el corte transversal de surcos para cada una de las distintas categorías consideradas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.

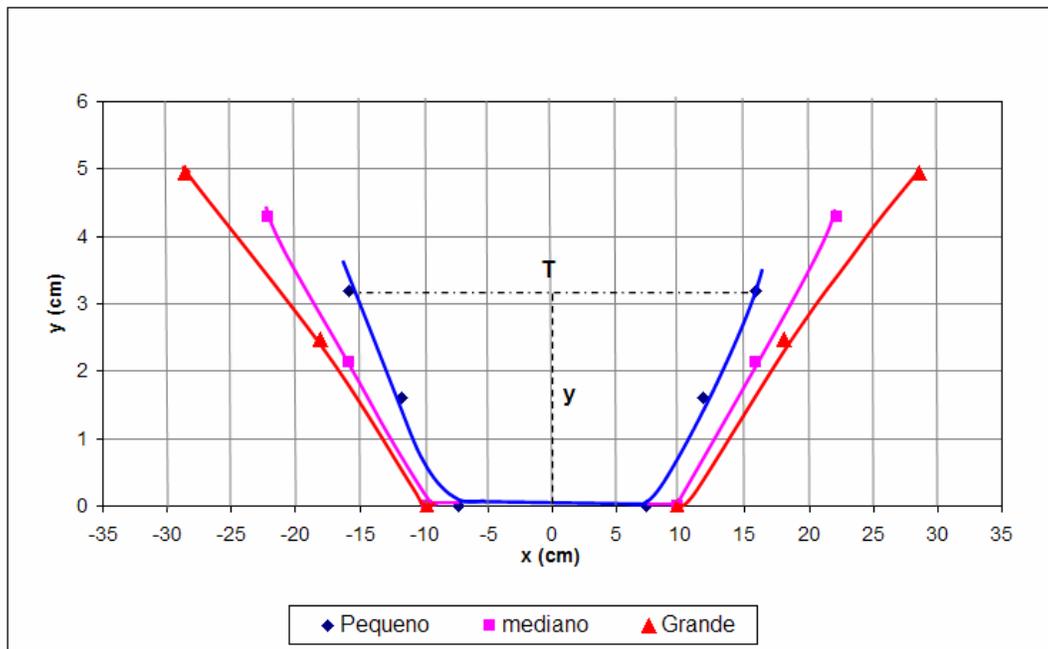


Figura 10: Corte transversal de surcos para cada una de las distintas categorías consideradas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Tabla 14: Parámetros hidráulicos de surcos según categoría: área de frente de flujo (A), perímetro mojado (WP) y área de sección transversal de surco (Ao).

Categoría	n	Parámetros Hidráulicos de surco					
		A (m ²)		WP (m)		Ao (m ²)	
		Media	S	Media	S	Media	S
Pequeño	12	0,008 b	0,004	0,539 c	0,071	0,077 a	0,068
Mediano	16	0,014 ab	0,007	0,697 b	0,106	0,084 a	0,069
Grande	7	0,019 a	0,010	0,907 a	0,171	0,100 a	0,064

La categoría de surcos “grande”, posee una mayor área de frente de flujo respecto a la categoría “pequeño”, y aquella que caracteriza a la categoría “mediano”, no presenta diferencias respecto a las categorías de surcos “pequeño y grande” (Tabla 14).

Con respecto al perímetro mojado de surco (WP) según la categoría de surcos, fue estadísticamente menor para la categoría de surco “pequeño” y mayor para la categoría de surco “grande”.

En referencia a la sección transversal de surco (Ao) no se observaron diferencias estadísticamente significativas para las categorías de surcos consideradas.

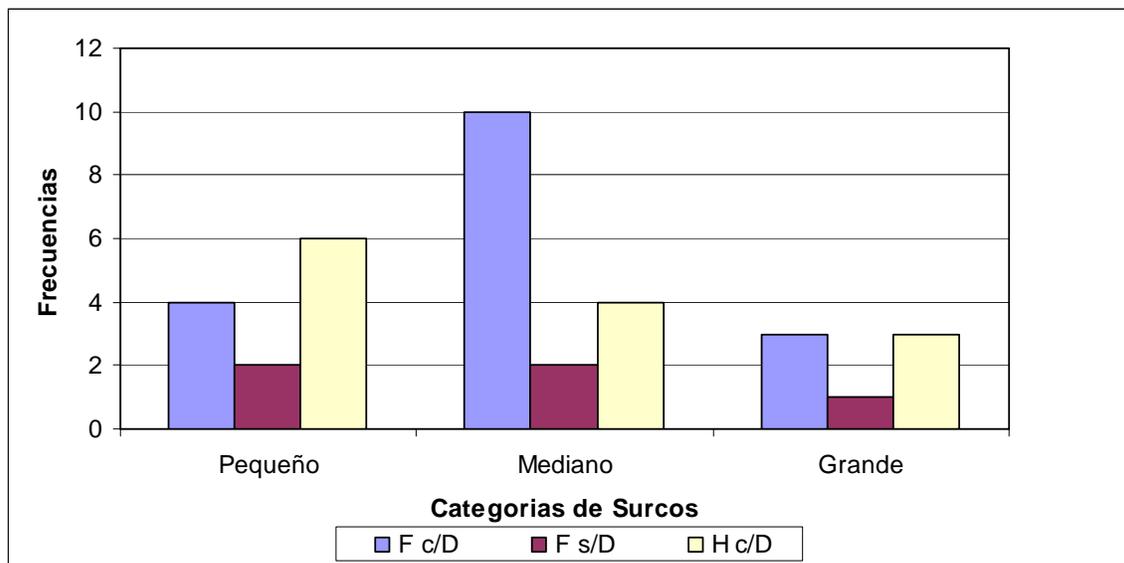


Figura 11: Frecuencias observadas de las distintas categorías de surcos para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.

De acuerdo a la distribución de frecuencias según categoría de surcos se puede considerar que los parámetros de la categoría de surcos “pequeño” (< 40 cm), pueden ser utilizados para el diseño de métodos de riego con desagüe al pie para cultivos hortícolas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior. En caso de cultivos hortícolas donde se observan surcos de mayor tamaño (papa, zapallo) regados con el mismo método de riego, se recomienda la utilización de los parámetros de la categoría de surco “mediano” (40-50 cm). (Figura 11)

Para el caso particular de los cultivos frutícolas regados con métodos de riego con desagüe al pie, se aconseja utilizar los parámetros de la categoría de surcos “mediano” (40-50 cm), mientras que si se riegan, los mismos cultivos, con métodos de riego sin desagüe al pie es recomendable considerar para el diseño de los sistemas de riego los parámetros de surco caracterizados por las categorías de surco “pequeño” y “mediano” (Figura 11).

3.2.4 Caudal de manejo y unitario

Tabla 15: Valores medios y desviación estándar del caudal de manejo (Qm) y unitario (qu) según zona de manejo, estación del año, cultivo y método de riego para la cuenca irrigada del río Tunuyán Superior.

VARIABLES		n	CAUDALES			
			Qm (L s ⁻¹)		qu (L s ⁻¹ o L s ⁻¹ m ⁻¹)	
			Media	SD	Media	SD
Zona	Norte	9	34,1 b	17	--	--
	Centro Norte	17	53,6 b	17	--	--
	Centro Sur	12	46,6 b	13	--	--
	Sur	10	78,7 a	31	--	--
Estación	Otoño	17	45,5 a	24	0,88 a	0,42
	Primavera	17	57,9 a	23	1,53 a	1,91
	Verano	14	57,8 a	26	1,34 a	0,83
Cultivo	Frutícola	35	49,7 a	23	1,46 a	1,39
	Hortícola	13	63,5 a	27	0,67 b	0,43
Método de riego	c/D	38	52,6 a	25	1,04 a	0,60
	s/D	10	56,6 a	22	1,05 a	0,34
Río Tunuyán Superior		48	53,4	24	1,24	1,25

Para el caudal de manejo (Qm), existen diferencias significativas únicamente en función de la zona de manejo, siendo la zona sur la que presenta mayores valores, no existen diferencias significativas entre las zonas centro norte, centro sur y norte. No se observan diferencias significativas para el resto de los factores considerados (estación, cultivo y método de riego). (Tabla 15)

Respecto al caudal unitario (qu), solamente se observa diferencia significativa según tipo de cultivo, siendo en los cultivos hortícolas, menor que para el caso de cultivos frutícolas. Para el resto de los factores considerados no se observan diferencias significativas.

3.2.5 Pendiente longitudinal, tiempo de aplicación y número de surcos o melgas regados simultáneamente

Tabla 16: Valores medios y desviación estándar referidos a la pendiente longitudinal, tiempo de aplicación y número de surcos y melgas regados simultáneamente para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

VARIABLES	n	S _o (m m ⁻¹)		Tap (min)		N surco o melgas		
		Media	SD	Media	SD	Media	SD	
Cultivo	Frutícola	35	0,0082 a	0,0078	422 a	579	36 b	37
	Hortícola	13	0,0064 a	0,0031	425 a	409	121 a	64
Método de riego	c/D	38	0,0087 a	0,0072	422 a	379	69 a	63
	s/D	10	0,0042 b	0,0039	151 b	71	25 b	15

Respecto a la pendiente longitudinal de la parcela evaluada, del análisis estadístico de los datos surge que existe diferencia significativa entre el método de riego, siendo mayor para los métodos con desagüe al pie (Tabla 16).

Para los tiempos de aplicación por método de riego, se observan diferencias significativas. Los mayores valores de tiempos de aplicación se observan en los métodos de riego con desagüe al pie de la parcela, mientras que los métodos de riego sin desagüe presentan los valores más bajos respecto al tiempo de aplicación.

En cuanto al número de surcos o melgas regados en forma simultánea, surge que existen diferencias estadísticas significativas respecto al factor cultivo y método de riego, siendo el número de surcos y/o melgas regados en forma simultánea, mayor para los cultivos hortícolas y para los métodos de riego con desagüe al pie.

3.2.6 Longitud de surcos y melgas

Tabla 17: Valores medios y desviación estándar de la longitud de surcos y melgas según cultivo y método de riego, cuantificados en función del cuartel de riego (Long Cuartel m) y según los encadenamientos realizados en el riego (Long Finca m).

VARIABLES	n	Long Finca (m)		Long Cuartel (m)		
		Media	SD	Media	SD	
Cultivo	Frutícola	35	156 b	76	123 a	44
	Hortícola	13	217 a	104	124 a	31
Método de Riego	c/D	38	192 a	88	130 a	42
	s/D	10	97 b	22	97 b	22

Considerando la longitud de la unidad de riego en su totalidad, para el factor cultivo se observan diferencias significativas, siendo los cultivos hortícolas aquellos que presentan mayor longitud en la unidad de riego, ello es debido en gran parte al encadenamiento de riego que se realiza en este tipo de cultivo respecto a los cultivos frutícolas (Tabla 17).

Respecto al método de riego se observa diferencias significativas para la longitud de la unidad de riego, siendo los cultivos con desagüe al pie, aquellos que presentan una mayor

longitud en la unidad de riego, debido principalmente al encadenamiento de riego que sobre ellos se realiza (Tabla 17).

Considerando la longitud del cuartel evaluado, respecto al factor cultivo no se observan diferencias significativas referidas a su longitud. Respecto al método de riego se observan diferencias significativas, siendo los métodos de riego con desagüe el pie, aquellos que presentan mayor longitud del cuartel evaluado (Tabla 17).

3.3 Láminas de Riego

La Tabla 53 del Anexo, presenta las variables edáficas utilizadas para el cálculo de la lámina de reposición en cada propiedad para cada período de evaluación considerado.

3.3.1 Análisis de láminas de riego

Tabla 18: Lámina de reposición (dr), lámina bruta (db), lámina infiltrada (dinf), lámina escurrida (de), lámina almacenada (dal) y lámina percolada (dper), expresadas en mm, agrupadas según estación del año, cultivo y método de riego para la zona bajo riego del río Tunuyán Superior

VARIABLES	n	Láminas de Riego (mm)												
		dr		db		dinf		de		dal		dper		
		Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	Media	SD	
Estación	Otoño	17	72 a	51	116 a	72	77 a	54	48 a	56	54 a	35	24 a	35
	Primavera	17	59 a	38	105 a	54	78 a	48	32 a	33	55 a	39	23 a	20
	Verano	14	56 a	36	142 a	105	82 a	63	61 a	75	56 a	31	30 a	44
Cultivo	Frutícola	35	75 a	43	121 a	82	72 a	33	42 a	58	64 a	35	20 a	30
	Hortícola	13	30 b	17	117 a	69	49 b	22	58 a	52	29 b	17	23 a	24
Método de riego	c/D	38	--	--	132 a	81	70 a	39	95 a	185	52 a	34	23 a	28
	s/D	10	--	--	64 b	25	64 a	25	0 b	0	63 a	36	22 a	21
Río Tun. Superior		48	63	42	153	190	79	54	75	168	55	35	26	33

Respecto a la lámina de reposición (dr), se observan diferencias significativas en función del factor cultivo, lo cual determina que los cultivos frutícolas necesitan mayores láminas de reposición que los cultivos hortícolas (debido al perfil explorado por las raíces), y que no presenta diferencias significativas respecto al período de estudio o estación (invierno-primavera-verano), ello puede estar influenciado por las abundantes lluvias ocurridas en el período de verano. No se incluyen en este análisis las láminas de reposición por método de riego ya que no existe relación entre ellos (Tabla 18).

Respecto a la lámina bruta (db) se observa que no presentan diferencias significativas, las láminas brutas aplicadas, en función del período estudiado y del cultivo evaluado, se observan diferencias significativas respecto al método de riego empleado, siendo los métodos de riego sin desagüe aquellos que aplican láminas brutas menores (Tabla 18).

Para la lámina infiltrada (dinf) no se observan diferencias significativas respecto a los factores estación y método de riego. Se observan diferencias significativas para la lámina

infiltrada respecto al factor cultivo, siendo mayor para los cultivos frutícolas que para los cultivos hortícolas (Tabla 18).

Respecto a las láminas escurridas al pie de la parcela (de), estas sólo se producen en casos de riego en surcos o melgas con desagüe al pie, alcanzando para cultivos frutícolas valores de 42 mm (con desviación estándar de 58 mm), y para cultivos hortícolas 58 mm (con desviación estándar de 52 mm). No se observa diferencias significativas respecto a los factores estación y cultivo (Tabla 18).

Respecto a la lámina almacenada (dal) se observa que los cultivos frutícolas poseen significativamente una mayor lámina almacenada respecto a los cultivos hortícolas. No se presenta ninguna diferencia significativa respecto a los demás factores considerados (estación y método de riego). (Tabla 18)

Respecto a la lámina percolada (dper) no se observan diferencias significativas respecto a los factores considerados (estación, cultivo y método de riego). (Tabla 18)

3.4 Parámetros del desempeño del riego por superficie

En Tabla 55 del anexo se presentan para cada propiedad, los valores de eficiencias obtenidos en función de las evaluaciones realizadas a campo en los diferentes períodos o ciclos considerados. Para cada propiedad se indican los resultados obtenidos del modelo SIRMOD (Walker et al, 1993). Las eficiencias obtenidas son: ECI: eficiencia de conducción interna, EAP: eficiencia de aplicación, EDI: eficiencia de distribución, EDIa: eficiencia de distribución absoluta, EAL: eficiencia de almacenaje, ERI: eficiencia de riego interna.

Para el análisis de las eficiencias actuales de riego en función de cada factor, se eliminan de los análisis estadísticos, aquellas eficiencias que solo logran almacenar en su perfil menos del 80% del volumen almacenable, para evitar sobreestimaciones de la eficiencias interna y/o de aplicación. Finalmente se considera el criterio de análisis con que se obtiene los indicadores de eficiencia parcelaria.

Tabla 19: Media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) de EAP, EAL, EDI (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo, método de riego y criterio de análisis para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Variables	n	EFICIENCIAS DE RIEGO (%)									
		EAP			EAL			EDI			
		Media	SD	±B	Media	SD	±B	Media	SD	±B	
Zona	Norte	7	37 a	17	13	99 a	2	1	95 a	6	4
	Centro Norte	15	44 a	27	14	99 a	2	1	91 a	10	5
	Centro Sur	11	47 a	26	15	99 a	2	1	90 a	10	6
	Sur	8	40 a	22	15	100 a	0	0	90 a	9	6
Estación	Otoño	13	42 a	24	13	99 a	2	1	92 a	10	5
	Primavera	16	49 a	25	12	99 a	2	1	90 a	8	4
	Verano	12	36 a	21	12	100 a	2	1	93 a	11	6

Variables		n	EFICIENCIAS DE RIEGO (%)								
			EAP			EAL			EDI		
			Media	SD	±B	Media	SD	±B	Media	SD	±B
Cultivo	Frutícolas	28	46 a	24	9	99 a	2	1	92 a	10	4
	Hortícolas	13	35 a	23	13	100 a	0	0	91 a	9	5
Método de riego	c/D	34	39 b	23	8	99 a	2	1	93 a	8	3
	s/D	7	60 a	22	16	98 a	3	3	85 a	13	9
Criterio	Cuartel	18	23 b	15	7	100 a	1	0	98 a	2	1
Análisis	Finca	18	42 a	24	11	99 a	2	1	91 b	9	4
Río Tunuyán Superior		41	43	24	7	99	2	1	91	9	3

Analizando la variable “Zona de manejo”, las zonas centro sur, centro norte y sur presentan los mayores valores de EAP respecto a la zona norte, sin embargo las diferencias observadas no son significativas. No se observan diferencias significativas por zona de manejo cuando se analiza EAL y EDI (Tabla 19).

Respecto a la variable “Estación de año”, se observa que en la estación verano las EAP son menores que para otoño y primavera aunque no se observan diferencias estadísticas significativas. No se observan diferencias significativas por zona de manejo cuando se analiza EAL y EDI (Tabla 19).

La variable “Cultivo”, muestra que las EAP de los cultivos frutícolas son mayores que la de los cultivos hortícolas, sin presentar diferencias estadísticamente significativas entre ellas. No se observan diferencias significativas por zona de manejo cuando se analiza EAL y tampoco en EDI (Tabla 19).

El análisis estadístico para la variable “Método de Riego”, determina que los métodos de riego sin desagüe al pie resultaron ser más eficientes que los métodos con desagüe. Respecto a EAL no se observan diferencias significativas por método de riego. Al analizar EDI se observa que los métodos sin desagüe al pie, poseen los menores valores de la variable, aunque como se mencionara anteriormente estas diferencias no son estadísticamente significativas (Tabla 19).

Respecto al “Criterio de Análisis” de las eficiencias de riego podemos afirmar que existen diferencias significativas para los factores de la variable respecto a EAP y EDI, mientras que para EAL no existen diferencias estadísticamente significativas (Tabla 19).

No existe diferencia estadísticamente significativa para los cultivos frutícolas respecto a la zona de manejo considerada. La zona norte presenta los menores valores de EAP para los cultivos frutícolas y en ella no se han realizado ensayos con cultivos hortícolas, la zona sur presenta los mayores valores de EAP para cultivos frutícolas, siendo la zona que maneja de forma más eficiente el riego de cultivos frutícolas, sin embargo sólo se ha realizado un ensayo a campo en cultivos frutícolas en esta zona por lo cual esta aseveración no es representativa de las condiciones de la zona, el resto de las zonas presentan valores intermedios. No existe diferencia estadísticamente significativa para los cultivos hortícolas respecto a la zona de manejo considerada. Si observamos el comportamiento de EAP de los cultivos hortícolas por zonas de manejo, podemos

observar que la zona Centro Sur es la que maneja, dentro del área de estudio, en forma más eficiente el agua de riego de los cultivos de raíz poco profunda. Si observamos la EDI, determinamos que la zona que presenta riegos menos uniformes de cabeza pie de la unidad de riego para cultivos hortícolas, es la zona centro sur y para cultivos frutícolas, es la zona Sur, si bien no se observan diferencias estadísticamente significativas. Respecto de EAL no se observan diferencias significativas en función de la zona de manejo y cultivo (Tabla 20).

Tabla 20: Eficiencias de riego medias agrupadas por zona de manejo y según cultivo para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Cultivo	Eficiencias Media	Zona de Manejo			
		Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur
Frutícolas	EAP (%)	37	53	44	<i>60</i>
	EAL (%)	99	99	99	<i>100</i>
	EDI (%)	95	90	93	<i>77</i>
Hortícolas	EAP (%)	-	21	61	37
	EAL (%)	-	100	100	100
	EDI (%)	-	96	79	91

Valores con cursiva indican presencia de un solo dato

No existen diferencias significativas entre las zonas de manejo respecto al método de riego. Los métodos de riego sin desagüe lograron obtener mayores EAP, ligados a menores valores de EDI, respecto a los métodos de riego con desagüe. Se observa que para la zona norte y centro sur, no se ha realizado ningún ensayo de campo con métodos de riego sin desagüe. Respecto a EAL no se observan diferencias respecto a la zona de manejo y método de riego (Tabla 21).

Tabla 21: Eficiencias de riego medias agrupadas por zonas de manejo y según el método de riego para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Método de Riego	Eficiencia Media	Zona de Manejo			
		Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur
Con desagüe	EAP (%)	37	34	47	37
	EAL (%)	99	100	99	100
	EDI (%)	95	95	90	91
Sin desagüe	EAP (%)	-	60	-	<i>60</i>
	EAL (%)	-	98	-	<i>100</i>
	EDI (%)	-	86	-	<i>77</i>

Valores con cursiva indican presencia de un solo dato

Los métodos de riego sin desagüe resultaron ser más eficientes en la aplicación, pero no en la distribución interna del agua de riego para cultivos frutícolas, ya que no se evaluaron cultivos hortícolas sin desagüe, sin embargo no se observan diferencias significativas. Respecto a EAL no se observan diferencias significativas según método de riego y cultivo (Tabla 22).

Tabla 22: Eficiencias de riego media agrupadas según método de riego y cultivo para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Cultivo	Eficiencia Media	Método de Riego	
		Con desagüe	Sin desagüe
Frutícolas	EAP (%)	42	60
	EAL (%)	99	98
	EDI (%)	94	85
Hortícolas	EAP (%)	35	-
	EAL (%)	100	-
	EDI (%)	91	-

Se observa que en verano los menores valores de EAP se corresponden para las zonas norte y centro sur, ello es coincidente con las grandes láminas de lluvias precipitadas en tales zonas durante el ciclo 2007-2008 y la falta de programación del riego en función de la lámina de reposición. La zona centro sur presenta los mayores valores de EAP, para la estación otoño y primavera pero los menores valores para la estación verano, sin embargo no se observan diferencias estadísticamente significativas entre zonas para una misma estación del año. Respecto a EDI, sus valores más bajos se observan en la estación primavera, principalmente marcados por la zona centro sur y sur, se estima que los valores de EDI de verano pueden estar sobreestimados, debido a la presencia de grandes lluvias estivales del ciclo considerado, sin embargo no se observan diferencias estadísticamente significativas entre zonas para una misma estación del año (Tabla 23).

Tabla 23: Eficiencias de riego medias agrupadas según zona de manejo y período de estudio para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Estación	Eficiencia Media	Zona de Manejo			
		Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur
Otoño	EAP (%)	41	39	63	22
	EAL (%)	98	99	98	100
	EDI (%)	98	92	83	97
Primavera	EAP (%)	40	48	60	45
	EAL (%)	100	98	100	100
	EDI (%)	90	93	87	86
Verano	EAP (%)	17	46	23	46
	EAL (%)	100	100	99	100
	EDI (%)	99	89	98	88

Valores con cursiva indican presencia de un solo dato

Tabla 24: Eficiencias de riego medias agrupadas por zona de manejo, según cultivo y método de riego para el área

Cultivo	Método de Riego	Eficiencia Media	Zona de Manejo			
			Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur
Frutícola	Con desagüe	EAP (%)	37	44	44	-
		EAL (%)	99	100	99	-
		EDI (%)	95	95	93	-
	Sin desagüe	EAP (%)	-	60	-	60
		EAL (%)	-	98	-	100
		EDI (%)	-	86	-	77

Cultivo	Método de Riego	Eficiencia Media	Zona de Manejo			
			Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur
Hortícola	Con desagüe	EAP (%)	-	21	61	37
		EAL (%)	-	100	100	100
		EDI (%)	-	96	79	91

Valores con cursiva indican presencia de un solo dato

3.4.1 Indicadores de percolación profunda y escurrimiento al pie

En Tabla 55 del anexo, se presentan para cada propiedad, los indicadores de percolación profunda y escurrimiento al pie obtenidos en función de las evaluaciones realizadas a campo en los diferentes períodos o ciclos considerados. Para cada propiedad se indican los resultados obtenidos con el modelo SIRMOD (Walker et al, 1993). Los indicadores obtenidos son: Pp: porcentaje de percolación profunda, Ep: porcentaje de escurrimiento al pie.

Para el análisis de los indicadores de percolación profunda y escurrimiento al pie, en función de cada factor, se eliminan de los análisis estadísticos, aquellos ensayos de campo que solo logran almacenar en su perfil menos del 80% del volumen almacenable, para evitar subestimaciones de los indicadores mencionados.

Tabla 25: Media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) de Pp y Ep (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo y método de riego para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Variables		n	INDICADORES DE PERCOLACIÓN Y ESCURRIMIENTO (%)					
			Pp			Ep		
			Media	SD	±B	Media	SD	±B
Zona	Norte	7	18 a	23	17	45 a	23	17
	Centro Norte	15	29 a	20	10	27 a	29	15
	Centro Sur	11	20 a	17	10	33 a	29	17
	Sur	8	33 a	12	9	27 a	22	16
Estación	Otoño	13	22 a	19	11	36 a	25	14
	Primavera	16	29 a	15	7	23 a	22	11
	Verano	12	25 a	24	13	39 a	32	18
Cultivo	Hortícolas	13	30 a	15	8	34 a	27	15
	Frutícolas	28	23 a	20	8	30 a	27	10
Método	c/D	34	23 b	17	6	38 a	25	8
Riego	s/D	7	40 a	22	16	0 b	0	0
Río Tunuyán Superior		41	25	19	6	32	27	8

Para la variable “Zona de Manejo”, el mayor valor de Pp se observa en la zona sur y el mayor valor de Ep se observa en la zona norte, pero las diferencias no son estadísticamente significativas (Tabla 25).

Respecto a la variable “Estación del año”, los mayores valores de Pp se observan en la estación primavera y los máximos valores de Ep se observan en verano, estación

caracterizada por grandes aportes de lluvia, sin embargo, para cada caso no se observan diferencias estadísticamente significativas.

Del análisis de la variable “Cultivo”, surge que los cultivos hortícolas poseen mayores pérdidas por escurrimiento al pie y por percolación profunda respecto a los cultivos frutícolas, pero las diferencias observadas no resultan ser estadísticamente significativas.

Si observamos los resultados de los análisis estadísticos para la variable “Método de Riego”, podemos afirmar que existen diferencias significativas para cada uno de los indicadores analizados respecto a cada uno de sus factores. Así los sistemas de riego sin desagüe se caracterizan por presentar los mayores valores de Pp y los sistemas de riego con desagüe al pie se caracterizan por presentar los mayores valores de Ep.

Si observamos los valores generales obtenidos para el total del área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior, podemos aseverar que la ineficiencia de los sistemas de riego se debe mayormente a los volúmenes de agua escurridos al pie, sin embargo no se observan diferencias estadísticamente significativas respecto a los volúmenes percolados.

Sólo existen diferencias estadísticamente significativas entre los indicadores analizados para la zona norte, el resto de las zonas analizadas no presenta diferencias significativas respecto a la percolación profunda y escurrimiento al pie (Tabla 26).

Tabla 26: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por zonas de manejo.

Indicadores (%)	Zonas de Manejo			
	Norte	Centro Norte	Centro Sur	Sur
Pp	18 b	29 a	20 a	33 a
Ep	45 a	27 a	33 a	27 a

No existen diferencias estadísticamente significativas entre la percolación profunda y el escurrimiento al pie para ninguna estación del año considerada (Tabla 27), ni para cada cultivo analizado (Tabla 28).

Tabla 27: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por estación del año.

Indicadores (%)	Estación del año		
	Otoño	Primavera	Verano
Pp	22 a	29 a	25 a
Ep	36 a	23 a	39 a

Tabla 28: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por cultivo.

Indicadores (%)	Cultivo	
	Hortícolas	Frutícolas
Pp	30 a	23 a
Ep	34 a	30 a

Existen diferencias estadísticamente significativas respecto a la percolación profunda y escurrimiento al pie para el método de riego analizado. Los métodos de riego s/D presentan las mayores percolaciones profundas respecto a los métodos c/D.

Tabla 29: Porcentajes de percolación profunda (Pp) y escurrimiento al pie (Ep) agrupados por método de riego.

Indicadores (%)	Métodos de riego	
	c/D	s/D
Pp	23 b	40 a
Ep	38 a	0 b

3.4.2 Estimación de error de muestreo para EAP, EAL, EDI, Pp y Ep

Los datos incluidos en la Tabla 30 y Figura 12 representan el tamaño de muestra para EAP, EAL, EDI, Pp y Ep, 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 $B = (d.media)/100$. Se considera para el cálculo de “n” el valor de la desviación típica de las 48 evaluaciones realizadas a campo.

Tabla 30: Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de muestra para EAP, EAL, EDI, Pp y Ep ($1-\alpha = 0,95$)

Tamaño de muestra (n)					Error de estimación con respecto a la media (%)
EAP	EAL	EDI	Pp	Ep	
15000	1400	550	9900	25000	1
650	56	23	800	1080	5
290	25	10	390	490	7.5
160	14	6	220	275	10
104	9	4	143	175	12.5
72	6	3	98	121	15
53	5	2	73	89	17.5
40	4	1	56	70	20
26	3	-	34	45	25
18	2	-	25	30	30

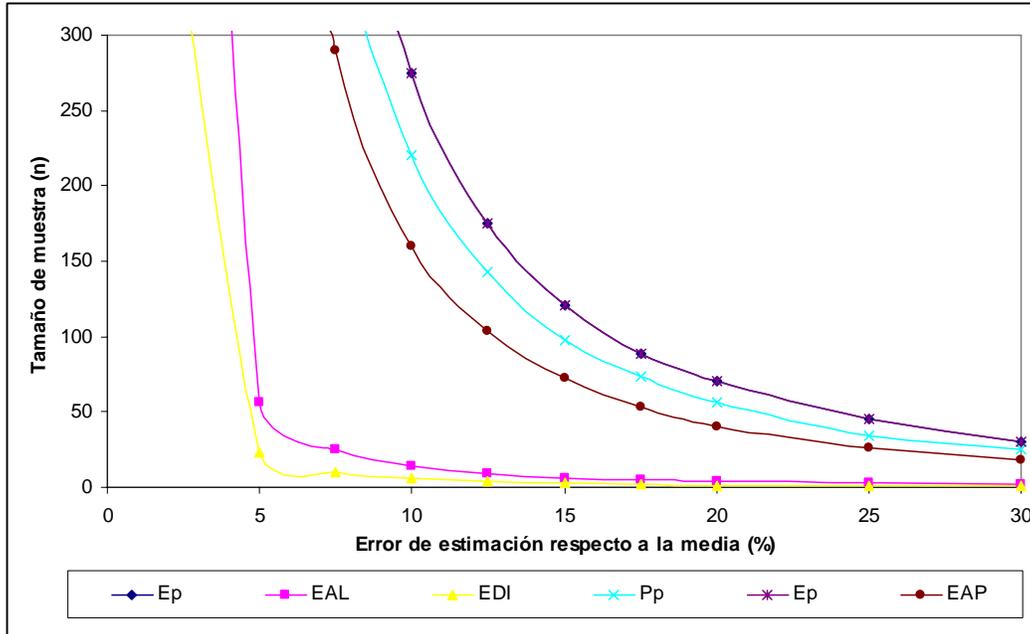


Figura 12: Variación del tamaño de muestra en función del error de estimación respecto a la media para las variables EAP, EAL, EDI, Pp y Ep ($1-\alpha=0,95$)

Así para EAP el valor medido fue de $SD = 28$, para EAL el valor encontrado fue $SD = 19$ y finalmente para EDI el valor considerado fue $SD = 11$. Para el tamaño de muestra utilizado ($n = 48$), corresponde una precisión en porcentaje respecto a la media de EAP = 18%, EAL = 5 % y EDI = 3 %. Los resultados obtenidos, permiten planificar el tamaño de muestra adecuado para la precisión deseada en futuras evaluaciones de riesgo para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior. Para Pp el valor medio encontrado de $SD = 19$, para Ep el valor obtenido es $SD = 27$. Para el tamaño de muestra considerado ($n = 41$), corresponde una precisión en porcentaje respecto a la media de Pp = 23%, y Ep = 26%. Los resultados alcanzados, permiten relacionar el error de estimación respecto a la media de las variables EAP, EDI, EAL, Pp y Ep en función del tamaño de muestra planificado para la precisión deseada en función para futuras evaluaciones de riesgo en el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior (Tabla 30 y Figura 12).

3.4.3 Determinación de la eficiencia de distribución según muestras de humedad de suelo obtenidas a campo (EDI_H)

La tabla 31 presenta la media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) para la eficiencia de distribución (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo y método de riego, calculada con los datos de humedad de suelo obtenidos a campo antes y después del riego.

No existen diferencias estadísticamente significativas para ninguna de las variables estudiadas (zona, estación, cultivo y método de riego). (Tabla 31)

Tabla 31: Media, desviación estándar (SD) y error de muestreo (B) de EDI_H (expresadas en porcentaje) según zona de manejo, estación, cultivo y método de riego para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Variables	n	EDI _H			
		Media	SD	±B	
Zona	Norte	9	70 a	13	8
	Centro Norte	15	74 a	10	5
	Centro Sur	11	73 a	12	7
	Sur	9	69 a	10	7
Estación	Otoño	16	73 a	10	5
	Primavera	15	69 a	12	6
	Verano	13	75 a	11	6
Cultivo	Frutícolas	32	71 a	12	4
	Hortícolas	12	73 a	9	5
Método de riego	c/D	35	72 a	11	4
	s/D	9	70 a	12	8
Río Tunuyán Superior		44	72	11	3

Las diferencias observadas, entre las eficiencias de distribución medias calculadas por los modelos (EDI) respecto a las obtenidas con datos de campo (EDI_H), son del 19%.

3.5 Análisis de la salinidad en la zona radical de los cultivos del área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Existe diferencia estadísticamente significativa para la variable CEes respecto al factor zona de manejo y que en los demás factores considerados no se observan diferencias significativas para la variable CEes (Tabla 32).

Tabla 32: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) según zona de riego para toda el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior, expresada en dS m⁻¹ a 25°C

Zona	n	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)		
		Media	SD	± B
Norte	48	0,981 ab	0,520	0,147
Centro Norte	97	1,344 a	0,646	0,128
Centro Sur	68	1,288 a	0,468	0,111
Sur	55	0,669 b	0,293	0,078
Río Tunuyán Superior	268	1,126	0,584	0,070

La zona sur es aquella que posee los valores más bajos de la variable analizada, la zona centro, norte y centro sur presentan los valores más elevados de CEes, estos no son críticos para la producción de los cultivos de la zona. Finalmente la zona norte presenta valores intermedios de CEes respecto a las demás zonas de manejo analizadas (Tabla 32).

Tabla 33: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) según cultivo para toda el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior, expresada en dS m⁻¹ a 25°C

Zona	n	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)		
		Media	SD	± B
Frutícola	195	1,141 a	0,526	0,074
Hortícola	73	1,087 a	0,718	0,165
Río Tunuyán Superior	268	1,126	0,584	0,070

No existen diferencias significativas de CEes, en cuanto al factor cultivo (Tabla 33).

No existen diferencias significativas entre las medias del factor ubicación dentro de la parcela (Tabla 34).

Tabla 34: CEes media, desviación típica (SD) y error de muestreo (B) para los diferentes puntos de muestreo dentro de las parcelas regadas según método de riego, para el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Estrato	n	Surcos y Melgas con desagüe			n	Surcos y Melgas sin desagüe		
		Media	SD	± B		Media	SD	± B
Cabeza	71	1,163 a	0,641	0,149	18	1,133 a	0,509	0,235
Medio	74	1,086 a	0,597	0,136	18	1,066 a	0,522	0,241
Pie	70	1,144 a	0,593	0,139	17	1,13 a	0,404	0,192

Los datos de CEes agrupados por estrato de suelo analizado, permiten observar que no existen diferencias significativas entre las medias del factor estrato de suelo para los métodos de riego considerados. En ambos casos para riego con desagüe y sin desagüe se observa que el segundo estrato de suelo posee valores algo más elevados y los valores observados para cada uno de los estratos, no limitan el potencial productivo de los cultivos implantados en la zona regadía bajo estudio (Tabla 35).

Tabla 35: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) de los dos estratos de suelos analizados para todas las propiedades estudiadas bajo el área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior por método de riego, expresada en dS m⁻¹ a 25°C

Estrato	n	Surcos y Melgas con desagüe			n	Surcos y Melgas sin desagüe		
		Media	SD	± B		Media	SD	± B
Primero	114	1,100 a	0,617	0,113	30	1,064 a	0,391	0,140
Segundo	101	1,165 a	0,601	0,117	23	1,169 a	0,570	0,233

No existen diferencias significativas para el valor medio de CEes en función del factor método de riego (Tabla 36).

Tabla 36: Conductividad eléctrica media del extracto de saturación (CEes), desviación típica (SD) y error de muestreo (B) de las diferentes categorías consideradas para el factor “método de riego”, del área irrigada de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Método de riego	n	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)		
		Media	SD	± B
Surcos c/D	168	1,119 a	0,604	0,091
Surcos s/D	24	1,211 a	0,457	0,183
Melgas s/D	47	1,171 a	0,629	0,180
Melgas c/D	29	1,026 a	0,480	0,175

3.5.1 Estimación del error de muestreo para CEes

La Tabla 37 muestra el tamaño de muestra para la variable salinidad de suelo (CEes), en función del error de estimación para una confiabilidad del 95%. Se considera para la determinación del tamaño muestral el valor de la desviación típica de las 48 evaluaciones obtenidas a campo que permitieron obtener un total de 268 muestras de suelo. Por lo tanto el valor medio de CEes es 1,126 dS cm⁻¹, le corresponde una desviación típica de 0,584 dS m⁻¹. Puede visualizarse en la Figura 12 que para el tamaño de muestra de la CEes, le corresponde una precisión como porcentaje de la media de aproximadamente del 3%. Los resultados obtenidos permiten fijar el tamaño de muestra adecuado en función de la precisión deseada para futuros estudios de salinidad de suelos bajo el área regada de la cuenca del río Tunuyán Superior (Tabla 37 y Figura 13).

Tabla 37: Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de la muestra para CEes (1-α = 0,95)

Tamaño de muestra (n)	Error de estimación con respecto a la media (%)
2500	1
105	5
48	7.5
27	10
17	12.5
12	15
9	17.5
6	20
4	25
3	30

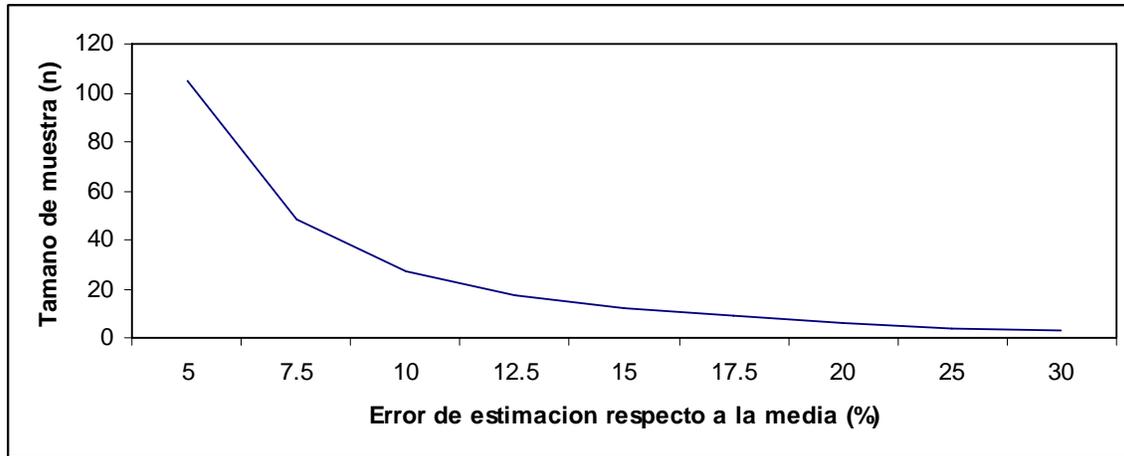


Figura 13: Variación del tamaño de la muestra en función del error de estimación de CEes con respecto al valor de la media ($1-\alpha = 0,95$)

3.5.2 Relación de CEes y la eficiencia de riego.

Mediante el análisis de la información de la CEes de suelos y la eficiencia de distribución de las parcelas bajo estudio, se observa que el criterio que resulta más eficiente para poder establecer su relación, es el conformado por los métodos de riego sin desagüe al pie cuando la eficiencia de almacenaje toma cualquier valor y para cultivos frutícolas, obteniéndose la siguiente ecuación para $n = 9$:

$$CV = 57,2512 - 0,367868 \times EDI \quad \text{Prob} > F = 0,11 \quad R^2 = 0,28 \quad (49)$$

La ecuación anteriormente descrita, indica que sin tener en consideración la eficiencia de almacenaje para métodos de riego sin desagüe al pie y para cultivos de raíces profundas, a medida que aumenta la eficiencia de distribución, disminuye el coeficiente de variación de la CEes de todo el estrato de suelo explorado por las raíces, según se observa en Figura 14. Por consiguiente valores elevados de eficiencias de distribución asegurarían una menor variación de la salinidad en el perfil explorado por las raíces, favoreciendo la obtención de cosechas más uniformes.

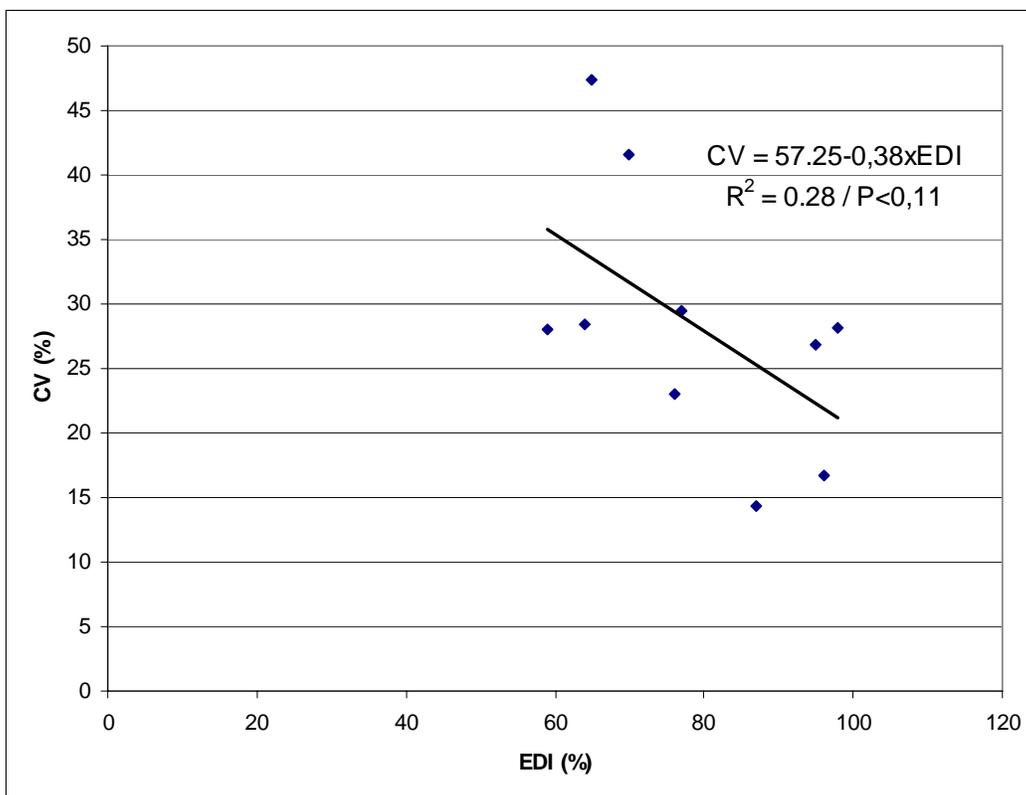


Figura 14: Coeficiente de variación de CEes de todo el estrato de suelo analizado (CV) en métodos de riego sin desagüe y para cultivos frutícolas versus eficiencia de distribución en las parcelas bajo estudio del área irrigada del río Tunuyán Superior.

3.6 Variación de la salinidad del agua de riego superficial (bocatoma de finca) en las distintas zonas de manejo.

Existen diferencias significativas por zona de manejo, mostrando –las zonas centro norte y centro sur– los mayores valores de la variable considerada, y los valores más bajos las zonas norte y sur (Tabla 38).

Tabla 38: CEagua media del agua superficial de riego en bocatoma de finca, desviación típica (SD) y error de muestreo (B) agrupada por el factor zona de manejo para el área irrigada del río Tunuyán Superior, expresada en dS m^{-1} a 25°C

Zona de Riego	Numero de Observaciones	Conductividad Eléctrica (ds m^{-1})		
		Media	SD	$\pm\text{B}$
Norte	9	0,491 b	0,211	0,083
Centro Norte	17	0,805 a	0,335	0,061
Centro Sur	12	1,023 a	0,190	0,072
Sur	10	0,307 b	0,148	0,079
Río Tunuyán Superior	48	0,697	0,361	0,079

La figura 15 muestra en aumento relativo, expresado en porcentaje, la CEagua de riego de las distintas zonas de manejo respecto a la zona de menor contenido de sales, para la zona bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

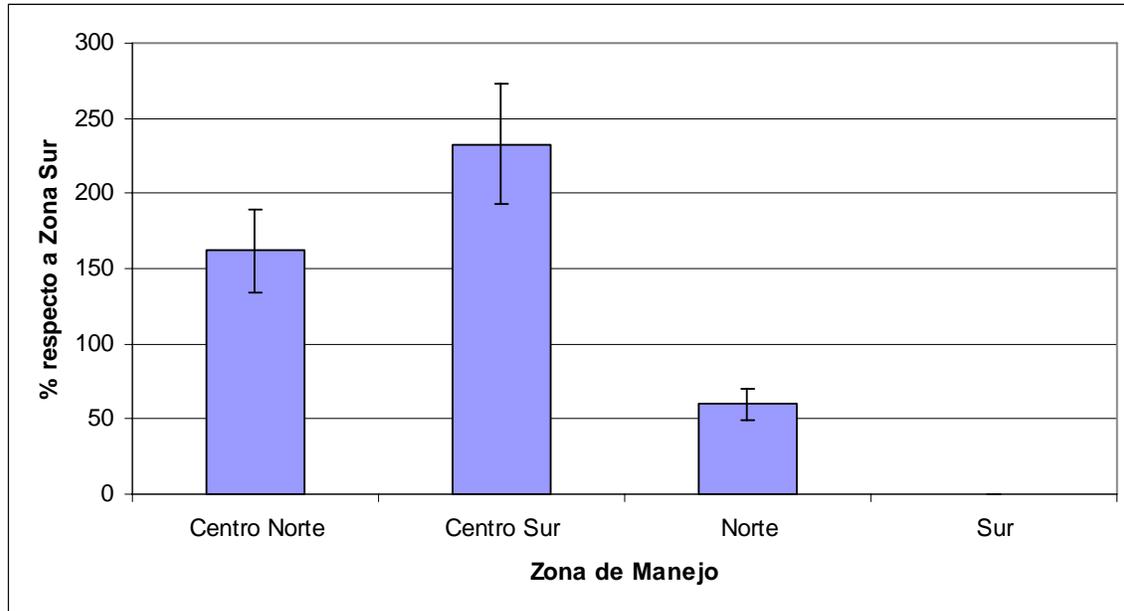


Figura 15: Aumento relativo (expresado en porcentaje) de la conductividad eléctrica del agua de riego para las distintas zonas de manejo de la cuenca del río Tunuyán Superior.

3.6.1 Estimación de error de muestreo para CEagua

La Tabla 39 presenta el tamaño de muestra para la salinidad del agua de riego superficial en función del error de estimación para una confiabilidad del 95%. Las zonas sur (CV = 48%) y centro sur (CV = 19%), poseen valores extremos de coeficientes de variación. Se considera para el cálculo del tamaño de muestra las 10 muestras realizadas en la zona sur y las 12 muestras para la zona centro sur. Al valor medio medido en la zona sur de $0,307 \text{ dS m}^{-1}$, le corresponde una desviación típica de $0,148 \text{ dS m}^{-1}$, mientras que al valor medio $1,023 \text{ dS m}^{-1}$ medido en la zona centro sur le corresponde una desviación típica de $0,190 \text{ dS m}^{-1}$ (Tabla 38). En la Figura 16 puede verse que para el tamaño de muestra utilizado ($n = 10$ para zona sur y $n = 12$ para zona centro sur), se corresponde con una precisión para CEagua del 30 % del valor de la media para la zona sur y CEagua menor al 12,5 % del valor de la media para la zona centro sur. La Tabla 39 y la Figura 16, permiten fijar el número de muestras adecuado para la precisión deseada de los futuros estudios de salinidad del agua superficial en bocatoma de finca para el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Tabla 39: Variación del error de estimación como porcentaje de la media en función del tamaño de muestra para CEagua ($1-\alpha = 0,95$)

Tamaño muestra (n)		Error de estimación con respecto a la media (%)
Zona Sur	Zona Centro Sur	
8000	1300	1
350	53	5
160	23	7.5
89	13	10
57	9	12.5
39	6	15
29	5	17.5
22	3	20
14	2	25
10	2	30

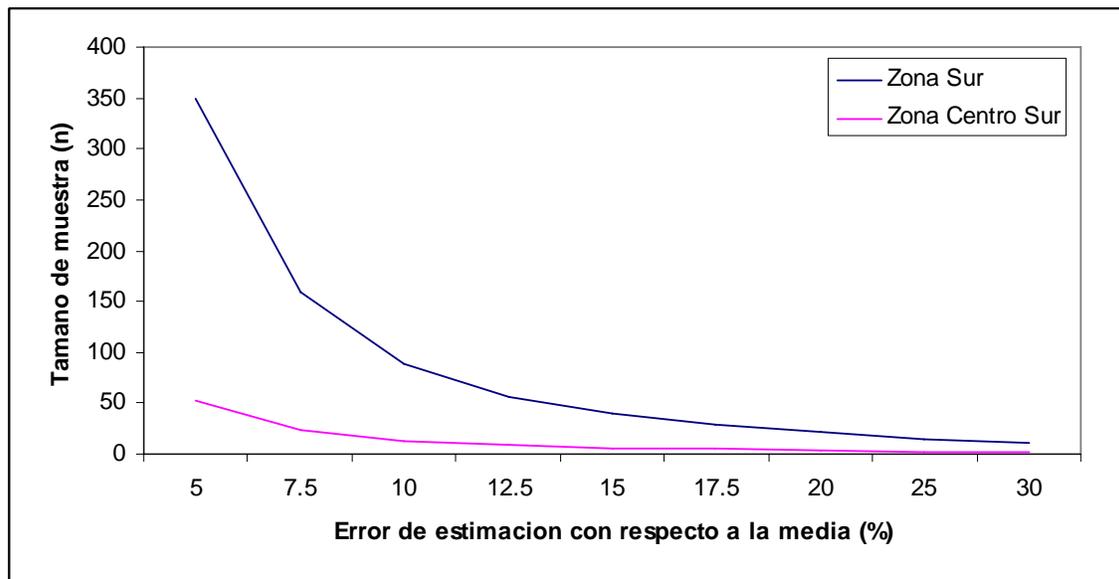


Figura 16: Variación del tamaño de la muestra en función del error de estimación de la CEagua respecto al valor de la media ($1-\alpha = 0,95$)

La Figura 17 muestra la interpolación espacial, en la zona bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior, de las variables CEes y CEagua expresadas en dS m^{-1} . Se observa que para ambas variables los valores más elevados de las mismas se ubican en las márgenes del río Tunuyán y en la desembocadura de la cuenca.

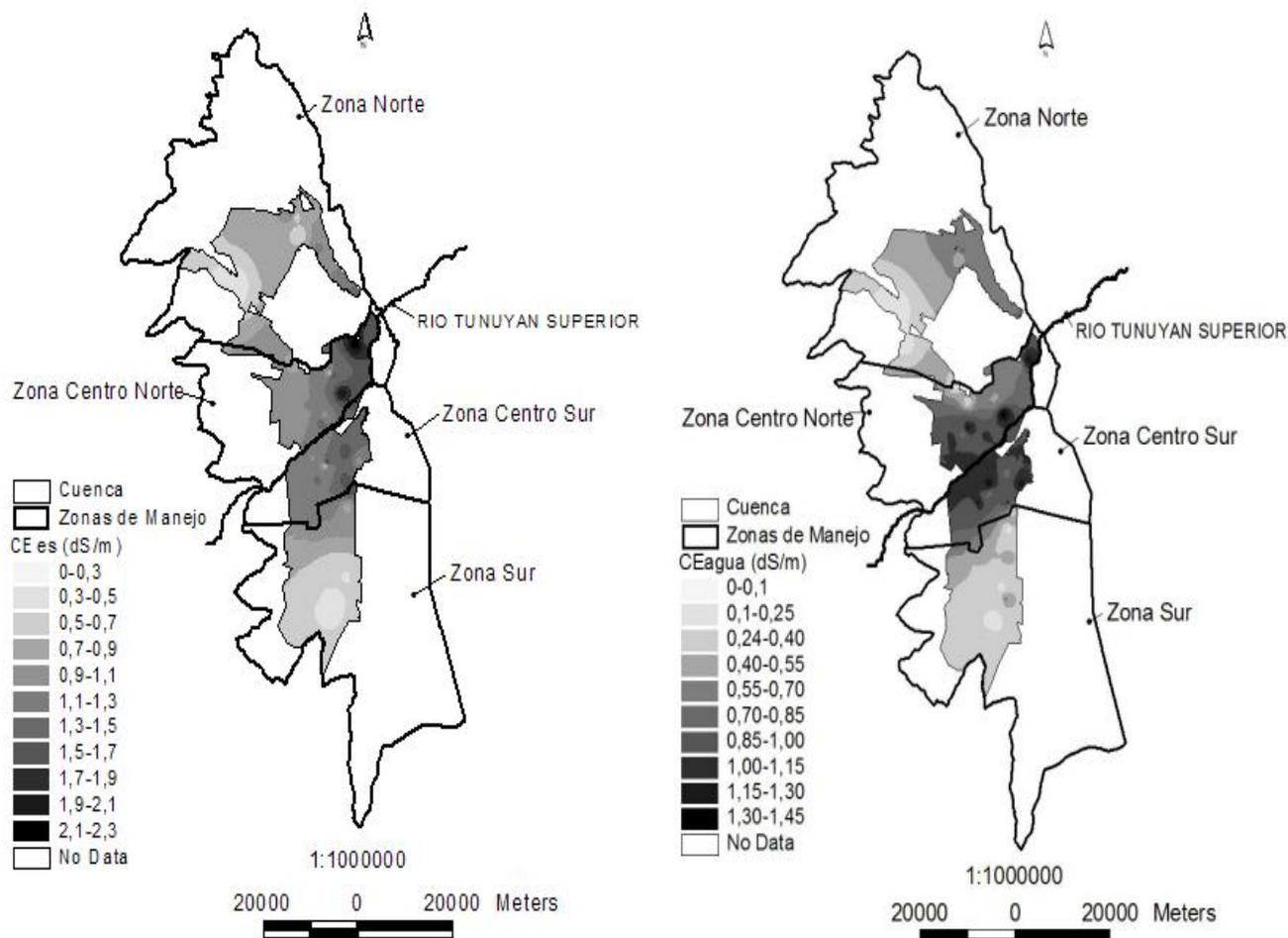


Figura 17: Salinidad media del agua superficial de riego y salinidad promedio de suelo (0-100 cm), para el área irrigada del río Tunuyán Superior, expresada en $dS\ m^{-1}$ a $25^{\circ}C$

3.6.2 Gramos de sales aportadas por litro de agua de riego por zona de manejo.

Se procedió a la determinación de las sales aportadas por el agua de riego en función de Ayers y Wescot (1976) según:

$$Sales(gL^{-1}) = CE_{agua}(dSm^{-1}) \times 0,64 \quad (50)$$

La figura 18 representa las sales aportadas con el agua de riego durante un ciclo agrícola, se considera como referencia un volumen de agua de riego aplicado de $7000\ m^3\ ha^{-1}\ año^{-1}$ (Morabito 2003), como se puede observar las zonas de manejo centro norte y centro sur reciben un aporte anual de aproximadamente $4\ T\ ha^{-1}\ año^{-1}$, mientras que las zonas norte y sur reciben en promedio aproximadamente $1,80\ T\ ha^{-1}\ año^{-1}$.

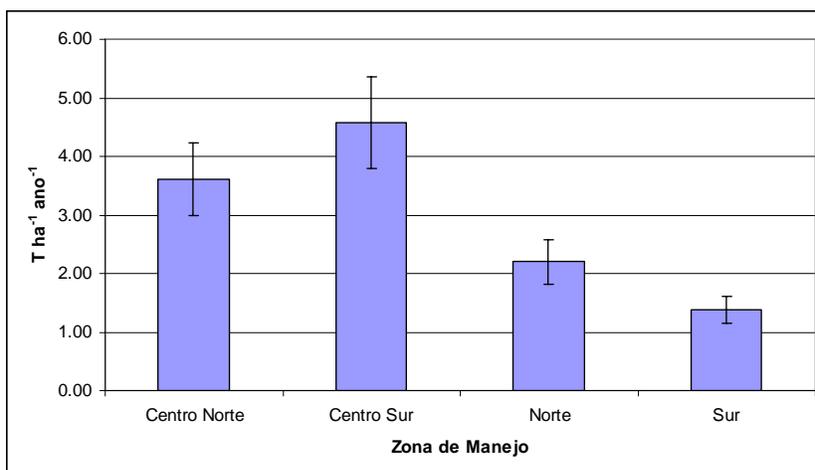


Figura 18: Cantidad de sales (T ha⁻¹ año⁻¹) aportadas al suelo por el agua de riego para un volumen de agua entregado de 7000 m³ ha⁻¹ año⁻¹

3.7 Desempeño potencial del riego

3.7.1 Desempeño potencial del riego según el manejo del método de riego

En Tabla 56 del anexo se presentan los valores potenciales de eficiencia de riego para cada una de las propiedades agrícolas evaluadas obtenidas mediante el modelo SIRMOD (Walker, 1993).

La EAP_M (eficiencia de aplicación potencial según el manejo del método de riego) media para la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior es del 68 %. Existen diferencias estadísticamente significativas para el método de riego seleccionado. Aquellos métodos de riego sin desagüe al pie logran los mayores valores de eficiencia potencial de manejo respecto a los métodos de riego con desagüe al pie, sin embargo los sistemas de riego sin desagüe no son los más frecuentes en la zona de riego bajo estudio (Tabla 40).

Tabla 40: Eficiencia de aplicación potencial media según el manejo del riego (EAP_M) según: zona de manejo, estación del año, cultivo, método de riego y para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Variables	n	EAP manejo (%)	
		Media	SD
Zona de Manejo	Norte	66 a	17
	Centro Norte	71 a	9
	Centro Sur	66 a	6
	Sur	69 a	9
Estación	Otoño	68 a	12
	Primavera	67 a	6
	Verano	70 a	11
Cultivo	Hortícola	67 a	6
	Frutícola	69 a	11
Método de Riego	c/D	65 b	6
	s/D	80 a	12
Río Tunuyán Superior		68	10

3.7.1.1 Percolación profunda, escurrimiento al pie, actual y potencial según el manejo del método de riego

En Tabla 56 del anexo se presentan, para cada una de las propiedades agrícolas evaluadas, los valores potenciales de eficiencia de riego detallando las percolaciones profundas y escurrimientos a pie para cada una de las propiedades agrícolas evaluadas obtenidas mediante el modelo SIRMOD (Walker, 1993).

Los porcentajes de percolación profunda y escurrimiento al pie actuales y potenciales propuestos para mejorar la operación del método de riego, Pp_M y Ep_M , serían de 15 % y 17 % respectivamente si se obtuviera una eficiencia potencial de manejo (EAP_M) del 68 % para el área bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior (Tabla 41). La mejora en la operación del método de riego propone reducir prácticamente a la mitad los volúmenes escurridos al pie y en un 40% los volúmenes percolados.

Tabla 41: Percolación profunda y escurrimiento al pie (Pp y Ep) actuales y potenciales, medias según: zona de manejo, estación del año, cultivo, método de riego y para el área bajo regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior.

Variables		Pp		Ep	
		Pp	Pp_M	Ep	Ep_M
Zona de Manejo	Norte	18	8	45	26
	Centro Norte	29	17	27	12
	Centro Sur	20	14	33	20
	Sur	33	20	27	11
Estación	Otoño	22	11	36	21
	Primavera	29	22	23	11
	Verano	25	12	39	18
Cultivo	Hortícolas	30	20	34	13
	Frutícolas	23	13	30	18
Método de Riego	c/D	23	14	38	20
	s/D	40	19	0	0
Río Tunuyán Superior		25	15	32	17

3.7.2 Eficiencias de aplicación potenciales considerando el balance salino

No existen diferencias estadísticamente significativas respecto a EAP_S entre los distintos cultivos, zonas de manejo, estación meteorológica, textura de suelo, sólo se detalla que para los suelos de textura franco arcillosa se observan los valores más bajos de la variable ($79\% \pm 27.6$). No se observan diferencias estadísticamente significativas frente a un cambio del 10% en los valores medios de los factores CE_{agua} , sus valores no sufren ninguna modificación de los valores iniciales, ello muestra la excelente calidad de aguas, sólo se observan diferencias estadísticamente significativas frente a un cambio del 10% en los valores medios del factor CE_{es} (Tablas 42 y 43).

Considerando los factores que afectan a la EAP_S , éstos se ordenan según la magnitud de la diferencia entre las medias máximas y mínimas dentro de cada factor, ello representa la importancia de cada variable sobre la EAP_S :

Textura de suelo: 13 %
 Zona de Manejo: 4 %
 CEes suelo final: 2 %
 Estación Meteorológica: 2 %

Tabla 42: Impacto de las variables analizadas sobre las eficiencias de aplicación potencial considerando el balance salino (EAP_s medias, expresadas en porcentaje ± desviación estándar) considerando el balance salino de cada una de las variables analizadas.

Cultivo		Zona de Manejo		Estación Meteorológica		Textura de Suelo	
Nivel	Media	Nivel	Media	Nivel	Media	Nivel	Media
Vid	91±4,4	Norte	92±5,1	La Consulta	90±8,2	Arenoso	90±5,7
Frutal de Carozo	92±4,7	Centro Norte	88±10	San Carlos	88±6,9	Franco Arenoso	89±6,6
Frutal de Pepita	90±10,4	Centro Sur	89±6,2			Franco	92±7,2
Hortaliza de Invierno	84±10,2	Sur	88±7,9			Franco Limoso	86±3,5
Hortaliza de Verano	81±13,4					Franco Arcilloso	79±27,6
Nogal	95±1,7						
Orégano	90±0,7						

* indica que existen diferencias significativas entre los factores asignados a las variables ($\alpha = 0,05$)

Tabla 43: Eficiencia de aplicación media considerando el balance salino (EAP_s - expresadas en porcentaje ± desviación estándar) según análisis de sensibilidad de cada una de las variables analizadas

Evapotranspiración		Precipitación		Probabilidad de ocurrencia		CEes final *		CEagua	
Nivel	Media	Nivel	Media	Nivel	Media	Nivel	Media	Nivel	Media
Máxima	89±7,8	50 % del total	89±7,8	20%	89±7,8	CEes inicial	90±6,6	CEagua actual	89±7,8
90% de la máxima	89±7,8	Efectiva	89±7,8	50%	89±7,8	90 % de CEes inicial	88±6,5	90% de CEagua actual	89±7,8
80% de la máxima	89±7,8	Cero	89±7,8	80%	89±7,8	110 % CEes inicial	90±6,6	110% de CEagua actual	89±7,8

* indica que existen diferencias significativas entre los factores asignados a las variables ($\alpha = 0,05$)

No existen diferencias estadísticamente significativas entre zonas de manejo respecto de EAPs como consecuencia de la variación de CEes suelo final y CEagua entre zonas de manejo (Tablas 44 y 45).

Tabla 44: Eficiencia de aplicación potencial media considerando el balance salino (EAP_S - expresada en porcentaje) por zona de manejo y según CEes suelo final en el área de influencia del río Tunuyán Superior.

Zona	n	CEes final						Diferencia Máxima
		Igual a CEes inicial		90% de CEes inicial		110% de CEes inicial		
		Media	SD	Media	SD	Media	SD	
Norte	9	92 a	5,1	89 a	5,0	92 a	5,1	3
Centro Norte	17	90 a	6,6	87 a	6,8	90 a	6,6	3
Centro Sur	12	90 a	6,3	88 a	5,9	90 a	6,3	2
Sur	10	89 a	8,5	86 a	8,4	89 a	8,5	3
Dif, Máxima		3,0	3,4	3,0	3,4	3,0	3,4	-

Tabla 45: EAP_S (expresada en porcentaje) por zona de manejo y según CEagua de riego del río Tunuyán Superior.

Zona	n	CE agua						Diferencia Máxima
		Igual a CE _{agua} inicial		90% de CE _{agua} inicial		110% de CE _{agua} inicial		
		Media	SD	Media	SD	Media	SD	
Norte	9	92 a	5,1	92 a	5,1	92 a	5,1	0
Centro Norte	17	88 a	9,9	88 a	10,0	88 a	9,9	0
Centro Sur	12	89 a	6,2	89 a	6,2	89 a	6,2	0
Sur	10	88 a	7,9	88 a	7,9	88 a	7,9	0
Dif, Maxima		4,0	2,8	4,0	4,9	4,0	4,8	-

Todas las zona analizadas poseen un conductividad eléctrica de suelo media que les permite llegar al 100% de la producción, según Maas y Hoffman (1977). Según el criterio propuesto, se destacan las zonas sur y norte, mostrando los valores de variación respecto a CEes actual más elevados, 164 y 262% respectivamente.

Tabla 46: CEes correspondiente al 90 y 100% de producción del cultivo, ponderada por zona de manejo, según la proporción de cada cultivo en cada una de ellas; y variación de la CEes umbrales respecto a la CEes actual

Zona de Manejo	CEes ponderada (dSm ⁻¹)			Variación respecto a CEes actual (%)		
	90% MaasHoffman	100 % MaasHoffman	100% Nijensohn	90% MaasHoffman	100 % MaasHoffman	100% Nijensohn
Norte	2,44	1,61	3,48	249	164	355
Centro Norte	2,37	1,65	3,43	176	123	255
Centro Sur	2,40	1,59	3,47	186	124	269
Sur	2,53	1,75	3,42	378	262	512

Tabla 47: Eficiencia de aplicación potencial media por salinidad (EAP_S - expresada en porcentaje) por zona de manejo y según CEesf para el área de influencia del río Tunuyán Superior

Zona de Manejo	n	EAP _S (%)					
		CEes 90% Maas-Hoffman		CEes 100% Maas-Hoffman		CEes 100% Nijensohn	
		Media	SD	Media	SD	Media	SD
Norte	9	92 a	5,1	92 a	5,1	92 a	5,1
Centro Norte	17	89 a	8,1	88 a	10,0	90 a	6,6

Zona de Manejo	n	EAP _s (%)					
		CEes 90% _{Maas-Hoffman}		CEes 100% _{Maas-Hoffman}		CEes 100% _{Nijensohn}	
		Media	SD	Media	SD	Media	SD
Centro Sur	12	90 a	6,3	89 a	6,2	90 a	6,3
Sur	10	89 a	8,5	88 a	7,7	89 a	8,5
Río Tunuyán Superior	48	90	7,2	89	7,8	90	6,6

3.7.3 Comparación entre eficiencias de aplicación potenciales obtenidas por diferentes métodos

Se sintetiza en forma gráfica los valores de eficiencias de aplicación actuales y aquellas factibles a alcanzar en cada zona de manejo del río Tunuyán Superior, conjuntamente con aquellas factibles a alcanzar cambiando el método de riego.

Para todas las zonas de manejo, prácticamente no existe diferencia entre EAP BalSal, EAP 90%MH, ello muestra la excelente calidad de aguas y suelos en la zona que permitiría, solamente con las lluvias de la temporada, mantener el balance salino de los suelos a niveles que garanticen la máxima producción de los cultivos bajo riego (Tabla 47 y Figura 19).

A nivel del oasis, la eficiencia de aplicación actual es del 43%, la potencial alcanzable al optimizar las variables de manejo del método de riego, sería del 68%, ello también garantizaría un adecuado tenor salino en la rizósfera de los cultivos que permita alcanzar la máxima producción de los cultivos bajo riego.

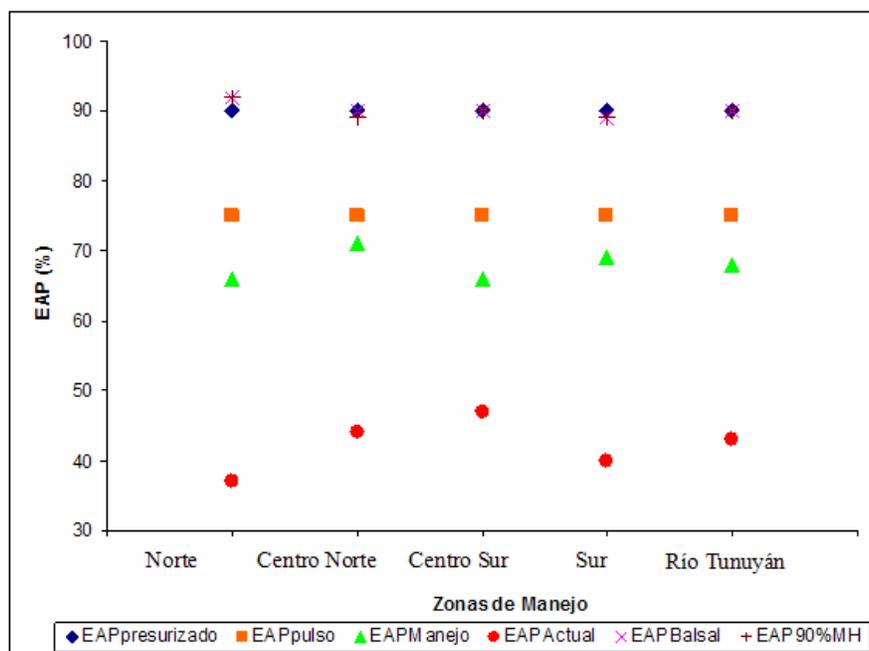


Figura 19: Eficiencia de aplicación actual (modelada bajo SIRMOD) y eficiencias de aplicación potenciales en las distintas zona de manejo para el río Tunuyán Superior.

Leyendas Figura 19:

$EAP_{\text{presurizado}}$: eficiencias de aplicación factibles a alcanzar utilizando sistemas de riego por goteo o microaspersión (Pizarro, 1996).

EAP_{pulso} : eficiencias de aplicación factibles a alcanzar utilizando sistemas de riego por pulso o caudal discontinuo (Romay et al, 2001).

EAP_{Actual} : eficiencia de aplicación obtenida mediante el modelo SIRMOD, corresponde al valor medio actual medido a campo.

EAP_{BalSal} : eficiencia de aplicación potencial que tiene en cuenta requerimiento de lixiviación, que permita mantener en forma constante el tenor salino medido a campo en la zona radical de los cultivos y con relación a la concentración salina del agua de riego superficial.

$EAP_{90\%MH}$: eficiencia de aplicación potencial correspondiente a un contenido de sales en la zona de la rizósfera de los cultivos que asegura una producción del 90% del máximo de los cultivos, según Maas y Hoffman (1977).

EAP_M : eficiencia de aplicación factible de lograr al optimizar las variables de manejo del método de riego.

La EAP_{BalSal} asegura el balance salino actual en la zona de la rizósfera de los cultivos, ello es consecuencia de la calidad del agua de riego y de la lámina percolada que atraviesa el perfil del suelo de acuerdo a las eficiencias medidas en cada zona de manejo. La $EAP_{90\%MH}$ asegura un valor medio de salinidad en la rizósfera de los cultivos que permita obtener el 90 % de la producción máxima para los cultivos de la zona. La EAP_{Manejo} , corresponde a la máxima eficiencia de riego que podría alcanzarse, si se optimizara el manejo del agua en la parcela bajo riego.

Resulta interesante la comparación de las eficiencias potenciales según sistema de riego a utilizar para toda la cuenca del río Tunuyán Superior. Si comparamos la situación actual respecto a la potencial de manejo para métodos de riego superficiales podría incrementarse en un 25% la eficiencia de riego, en métodos de riego superficiales tecnificados (riego por pulsos), este valor se incrementaría al 32% y con métodos de riego presurizados (goteo, microaspersión), llegaríamos a un máximo potencial del 47%. Cada sistema de riego propuesto como alternativa, si es bien manejado, también permitiría mantener un adecuado balance salino que garantizaría maximizar la producción de los cultivos bajo riego (Figura 19).

La Tabla 48 presenta como resumen, las eficiencias potenciales factibles de alcanzar en cada una de las zonas de manejo del río Tunuyán Superior y el valor medio del oasis (68%). La figura 20 detalla las diferencias entre eficiencias de aplicación potencial y actual en cada una de las zonas de manejo y para el río Tunuyán Superior.

Tabla 48: Eficiencias de aplicación potenciales factibles de alcanzar en cada una de las zonas de manejo del río Tunuyán Superior.

Zona de Manejo	Eficiencia de aplicación actual	Eficiencia de aplicación potencial
Norte	37	66
Centro Norte	44	71
Centro Sur	47	66
Sur	40	69
Río Tunuyán Superior	43	68

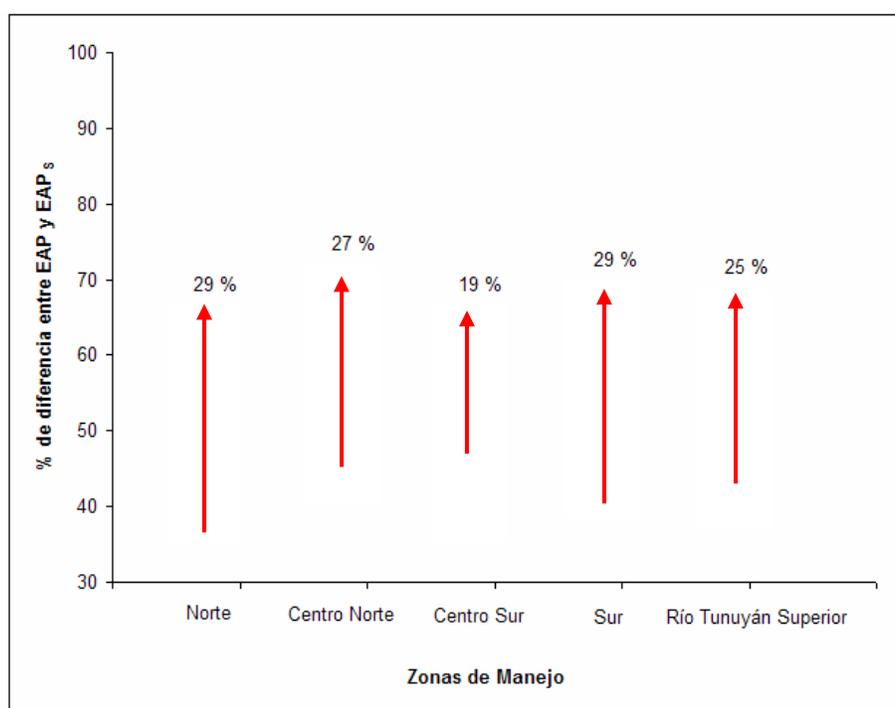


Figura 20: Diferencias entre eficiencias de “aplicación actual y potencial”, en cada una de las zonas de manejo y para el río Tunuyán Superior.

3.8 Escenarios de optimización del riego superficial

Se presentan a continuación distintos escenarios de optimización que se ajustan a las situaciones más frecuentes en cada una de las zonas de la cuenca de estudio. No obstante ello, es posible utilizar el modelo de optimización para encontrar soluciones específicas a cada una de las situaciones puntuales que pueden llegar a presentarse en toda la zona.

3.8.1 Escenarios de optimización - zona norte

Las figuras 21, 22 y 23, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por surcos con desagüe al pie en cultivos frutícolas que es lo que predomina, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo norte, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (50, 70 y 80 mm), longitud de la unidad de riego (150 m), infiltración básica de suelo ($8,69 \text{ mm h}^{-1}$), pendiente ($0,0172 \text{ m m}^{-1}$) y espaciamiento de surcos (2,65 m), para un rango de caudales unitarios ($0,20$ a $1,00 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) razonables.

Considerando que se quiere reponer una lámina de 50 mm en surcos con desagüe al pie, con una longitud de 150 m, en un suelo cuya infiltración básica es de $8,69 \text{ mm h}^{-1}$ y con pendiente de riego de $0,0172 \text{ m m}^{-1}$, sería posible lograr una EAP aproximada del 63% utilizando un caudal de $0,35 \text{ L s}^{-1}$ si se aplica durante un tiempo de 1450 minutos, generando una EDIa de 75%, un Pp de 22% y Ep de 15% (Figura 21).

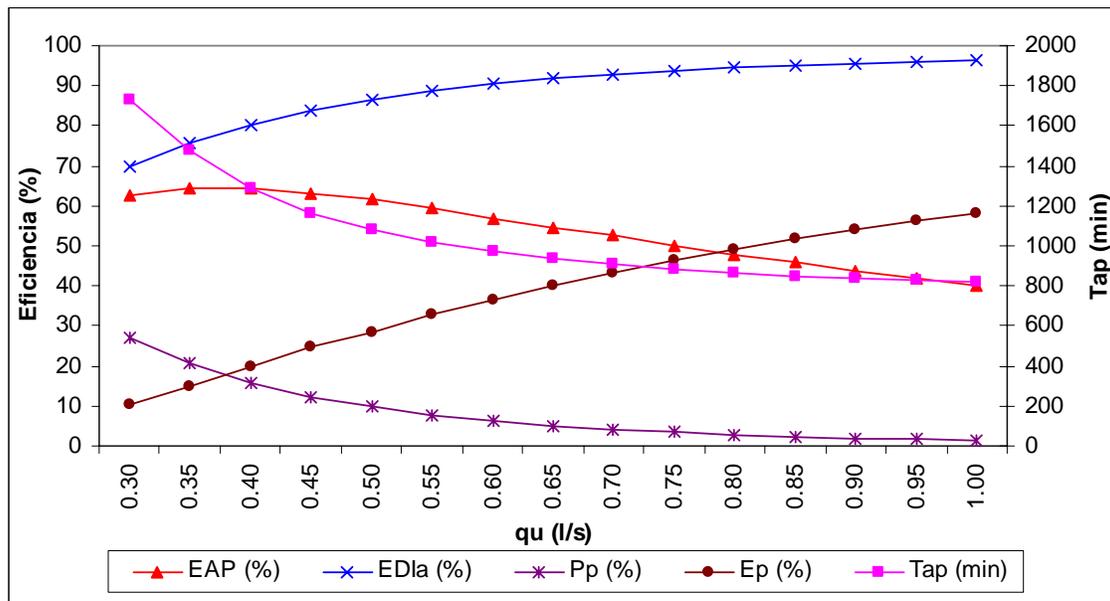


Figura 21: Zona norte, cultivo frutícola, $d_r = 50 \text{ mm}$

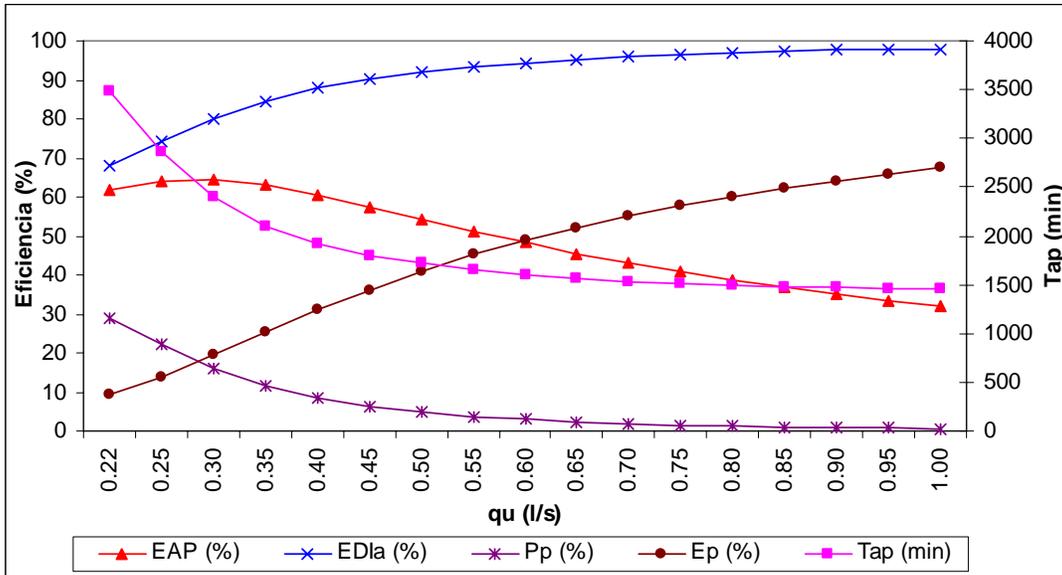


Figura 22: Zona norte, cultivo frutícola, dr = 70 mm

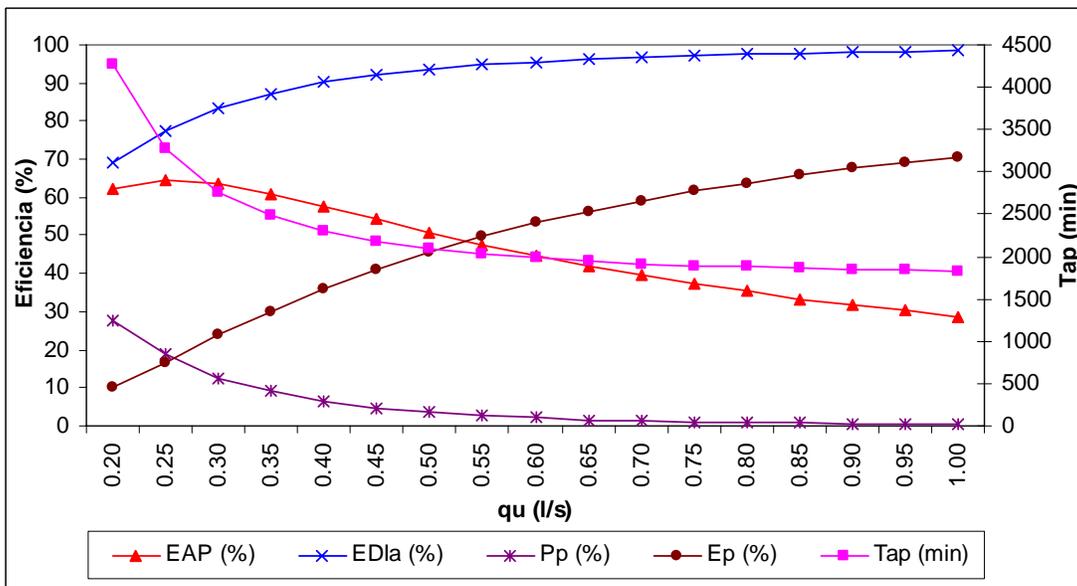


Figura 23: Zona norte, cultivo frutícola, dr = 80 mm

3.8.2 Escenarios de optimización – zona centro norte

Las figuras 24, 25 y 26, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por melgas con desagüe al pie en cultivos frutícolas, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo centro norte, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (50, 70 y 100 mm), longitud de la unidad de riego (170 m), infiltración básica de suelo ($6,03 \text{ mm h}^{-1}$), pendiente ($0,0058 \text{ m m}^{-1}$), para un rango de caudales unitarios ($0,45 \text{ a } 2 \text{ L s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) razonables.

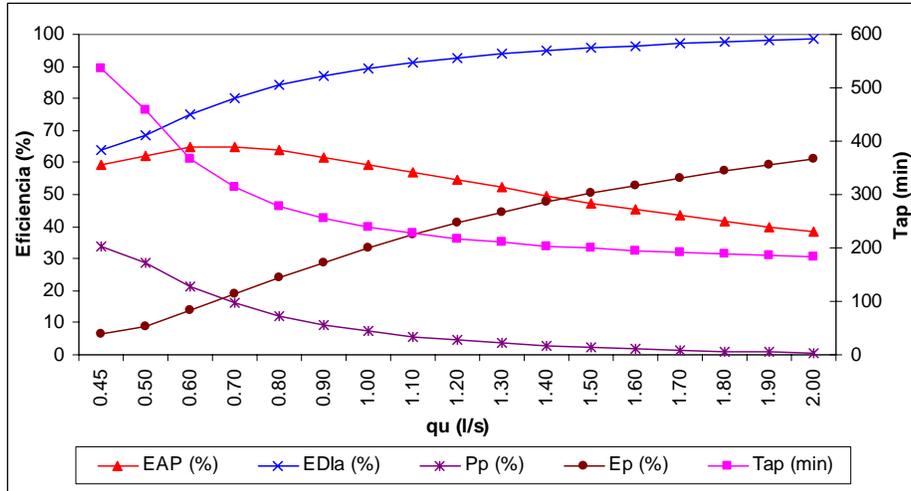


Figura 24: Zona centro norte, cultivo frutícola, dr = 50 mm

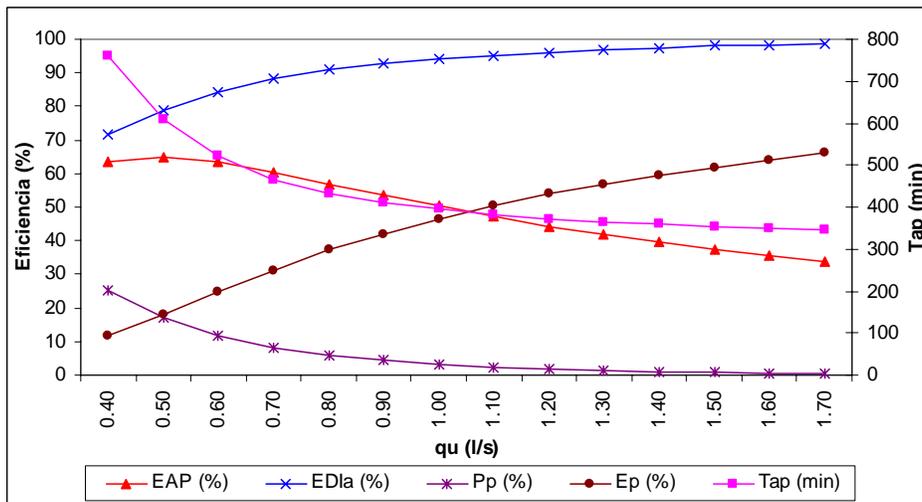


Figura 25: Zona centro norte, cultivo frutícola, dr = 70 mm

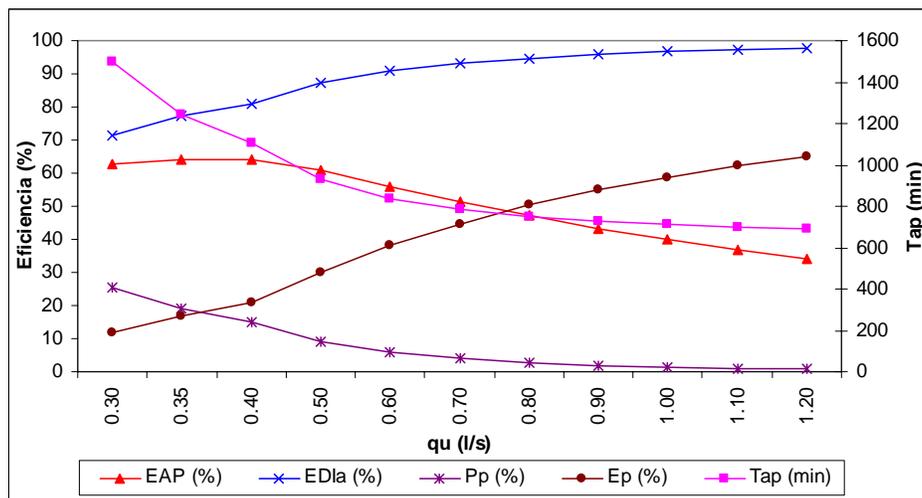


Figura 26: Zona centro norte, cultivo frutícola, dr = 100 mm

Las figuras 27, 28 y 29, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por surcos con desagüe al pie en cultivos hortícolas, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo centro norte, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (30, 40 y 50 mm), longitud de la unidad de riego (210 m), infiltración básica de suelo ($2,30 \text{ mm h}^{-1}$), pendiente ($0,0066 \text{ m m}^{-1}$) y espaciamiento de surcos (0,50 m), para un rango de caudales unitarios ($0,35 \text{ a } 1,20 \text{ L s}^{-1}$) razonables.

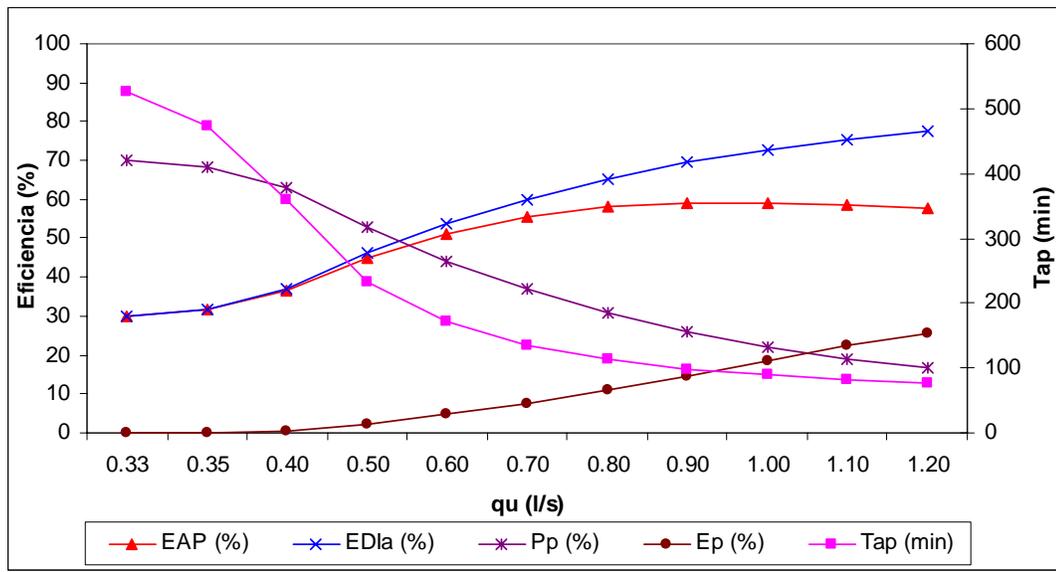


Figura 27: Zona centro norte, cultivo hortícola, dr = 30 mm

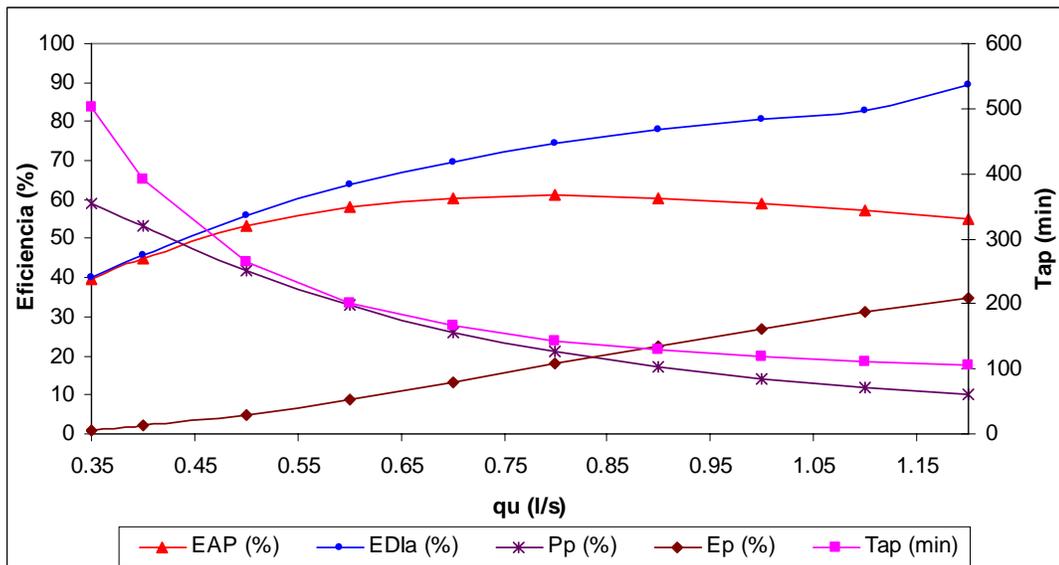


Figura 28: Zona centro norte, cultivo hortícola, dr = 40 mm

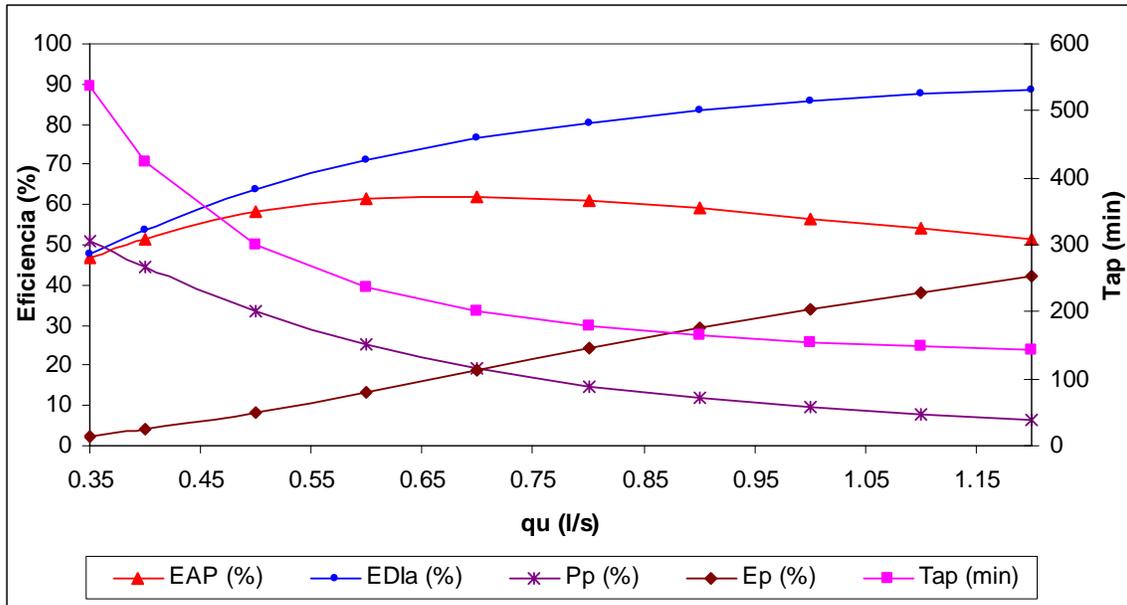


Figura 29: Zona centro norte, cultivo hortícola, dr = 50 mm

3.8.3 Escenarios de optimización – zona centro sur

Las figuras 30, 31 y 32, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por surcos con desagüe al pie en cultivos frutícolas, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo centro sur, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (50, 70 y 100 mm), longitud de la unidad de riego (189 m), infiltración básica de suelo (10,20 mm h⁻¹), pendiente (0,014 m m⁻¹) y espaciamiento de surcos (2,01 m), para un rango de caudales unitarios (0,50 a 2,00 L s⁻¹ m⁻¹) razonables.

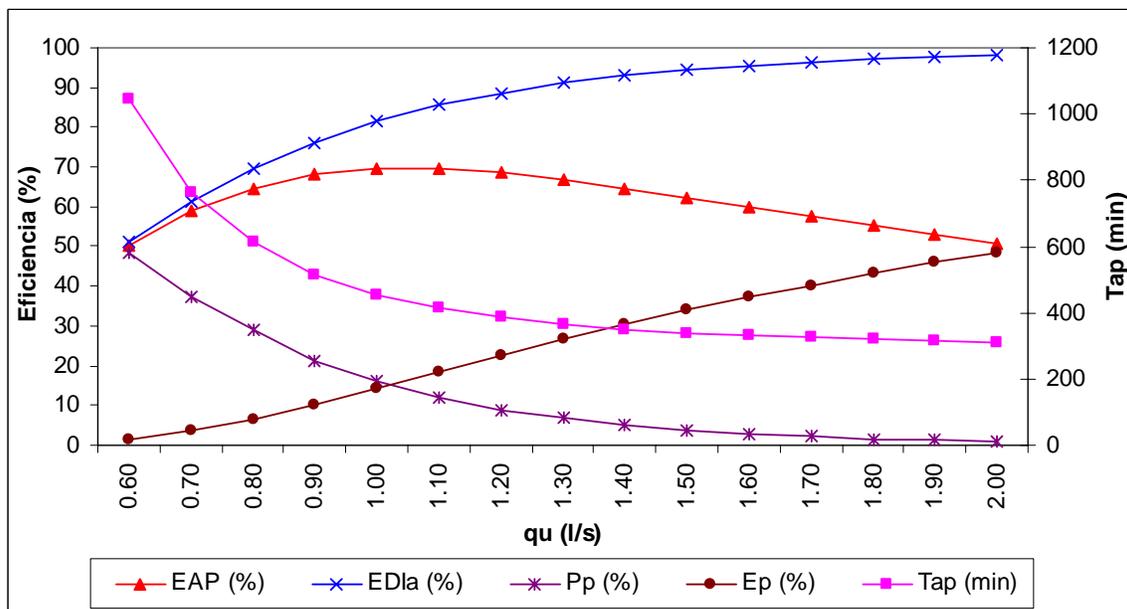


Figura 30: Zona centro sur, cultivo frutícola, dr = 50 mm

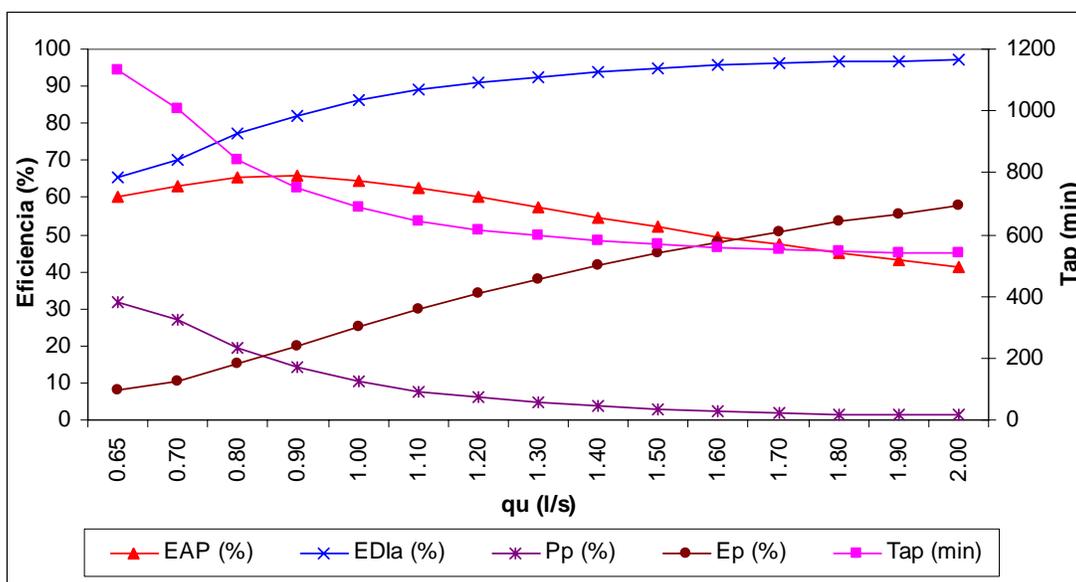


Figura 31: Zona centro sur, cultivo frutícola, dr = 70 mm

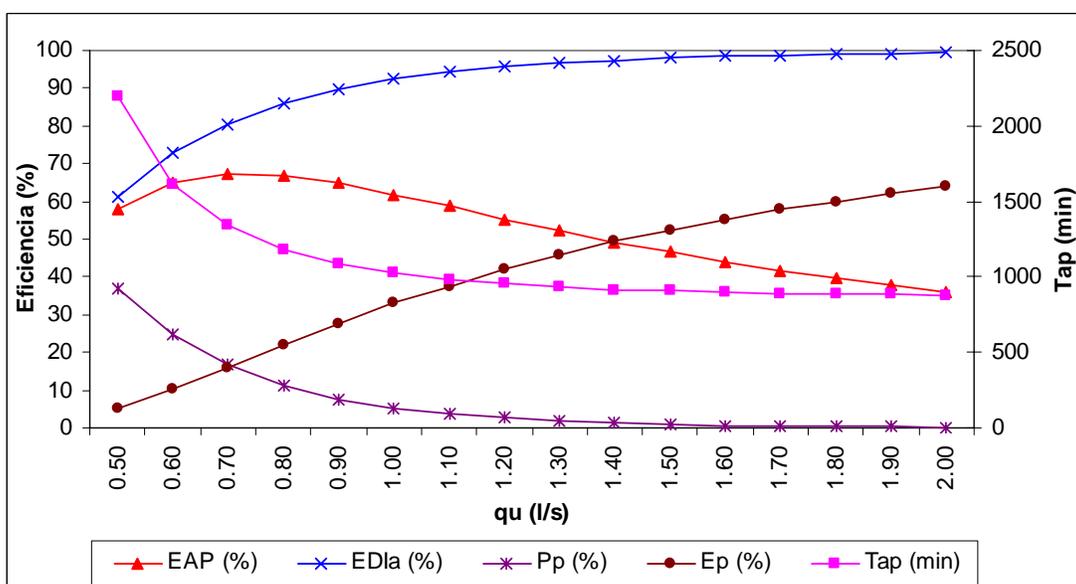


Figura 32: Zona centro sur, cultivo frutícola, dr = 100 mm

Las figuras 33, 34 y 35, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por surcos con desagüe al pie en cultivos hortícolas, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo centro sur, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (30, 40 y 50 mm), longitud de la unidad de riego (217 m), infiltración básica de suelo ($18,16 \text{ mm h}^{-1}$), pendiente ($0,0070 \text{ m m}^{-1}$) y espaciamiento de surcos (0,50 m), para un rango de caudales unitarios ($0,40 \text{ a } 1,20 \text{ L s}^{-1}$) razonables.

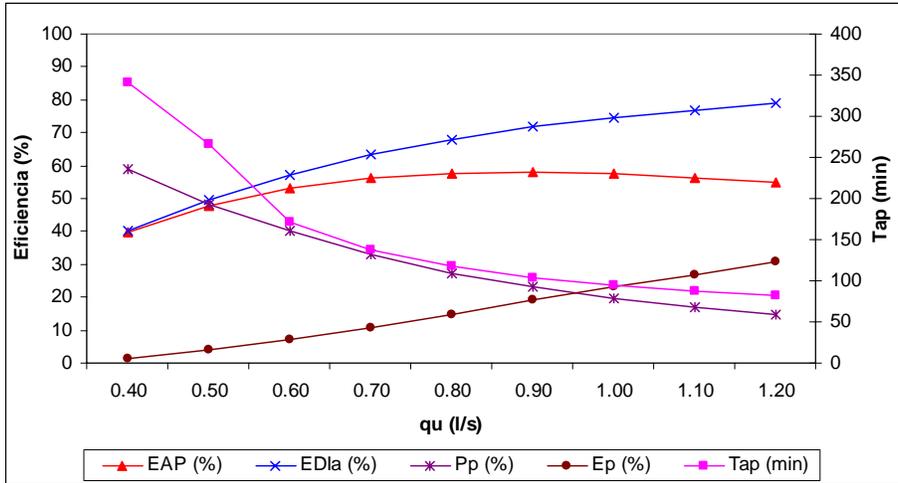


Figura 33: Zona centro sur, cultivo hortícola, dr = 30 mm

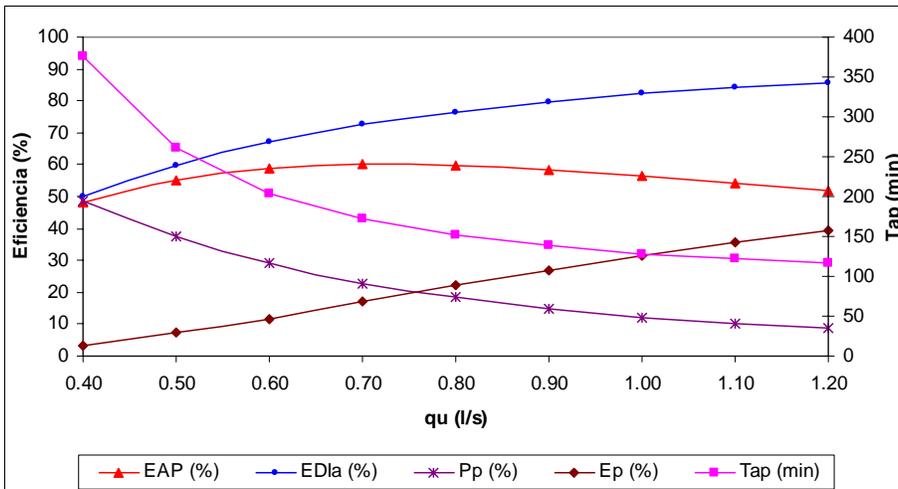


Figura 34: Zona centro sur, cultivo hortícola, dr = 40 mm

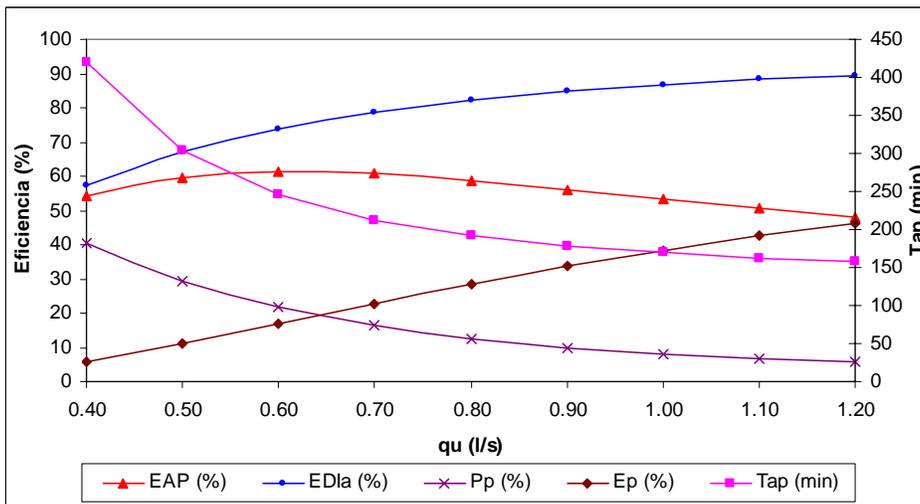


Figura 35: Zona centro sur, cultivo hortícola, dr = 50 mm

3.8.4 Escenarios de optimización – zona sur

Las figuras 36, 37 y 38, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por surcos con desagüe al pie en cultivos hortícolas, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo sur, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (30, 40 y 50 mm), longitud de la unidad de riego (250 m), infiltración básica de suelo ($5,49 \text{ mm h}^{-1}$), pendiente ($0,0062 \text{ m m}^{-1}$) y espaciamento de surcos (0,70 m), para un rango de caudales unitarios ($0,55 \text{ a } 2,00 \text{ L s}^{-1}$) razonables.

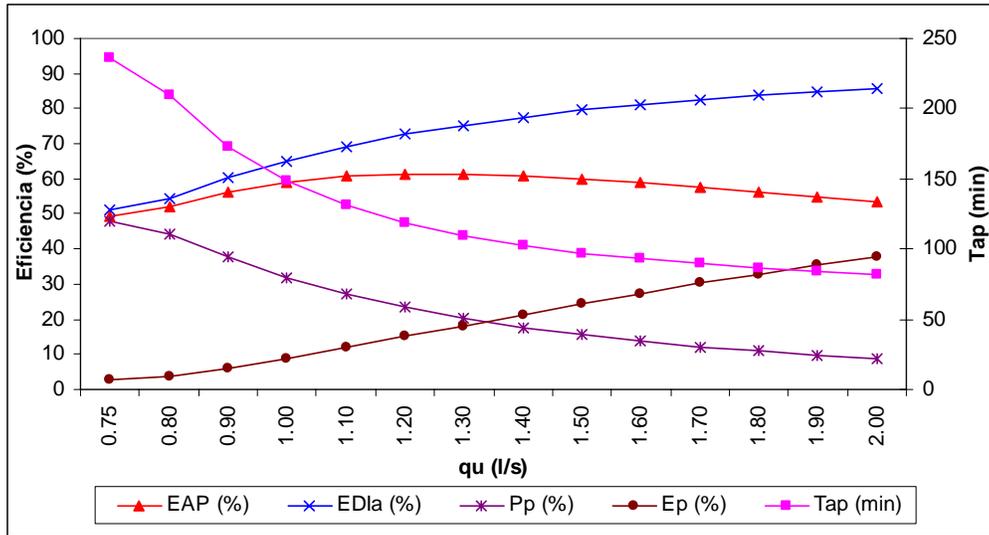


Figura 36: Zona sur, cultivo hortícola, dr =30 mm

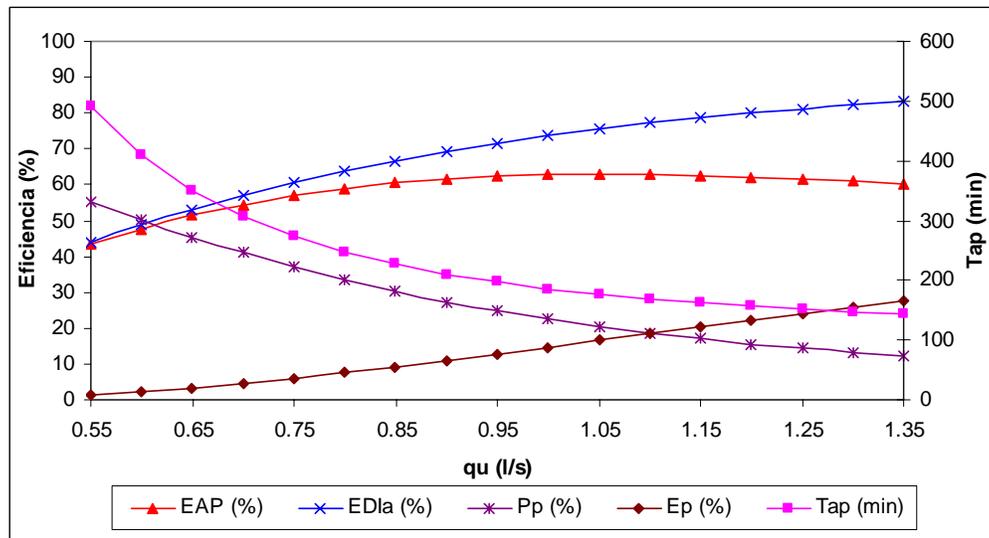


Figura 37: Zona sur, cultivo hortícola, dr =40 mm

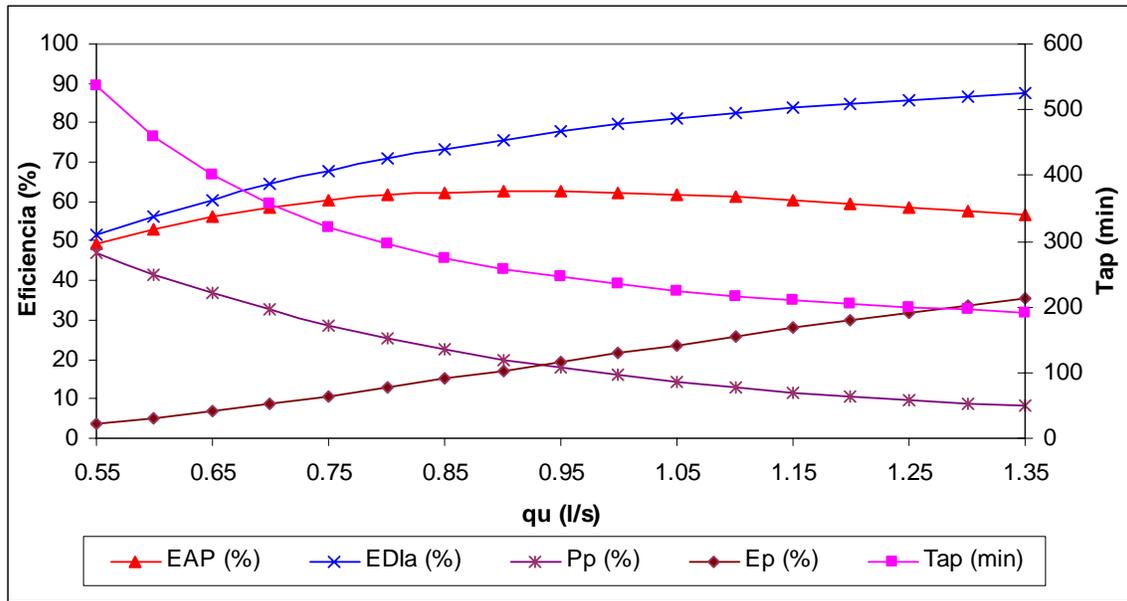


Figura 38: Zona sur, cultivo hortícola, dr = 50 mm

Las figuras 39, 40 y 41, muestran los escenarios de optimización del riego superficial para métodos de riego por melgas con desagüe al pie en cultivos frutícolas, para la modalidad promedio de riego de la zona de manejo sur, de la cuenca del río Tunuyán Superior, definida por láminas de reposición promedio a aplicar (50, 70 y 100 mm), longitud de la unidad de riego 150 m), infiltración básica de suelo ($4,45 \text{ mm h}^{-1}$), pendiente ($0,0070 \text{ m m}^{-1}$), para un rango de caudales unitarios ($0,30$ a $1,50 \text{ L s}^{-1}$) razonables.

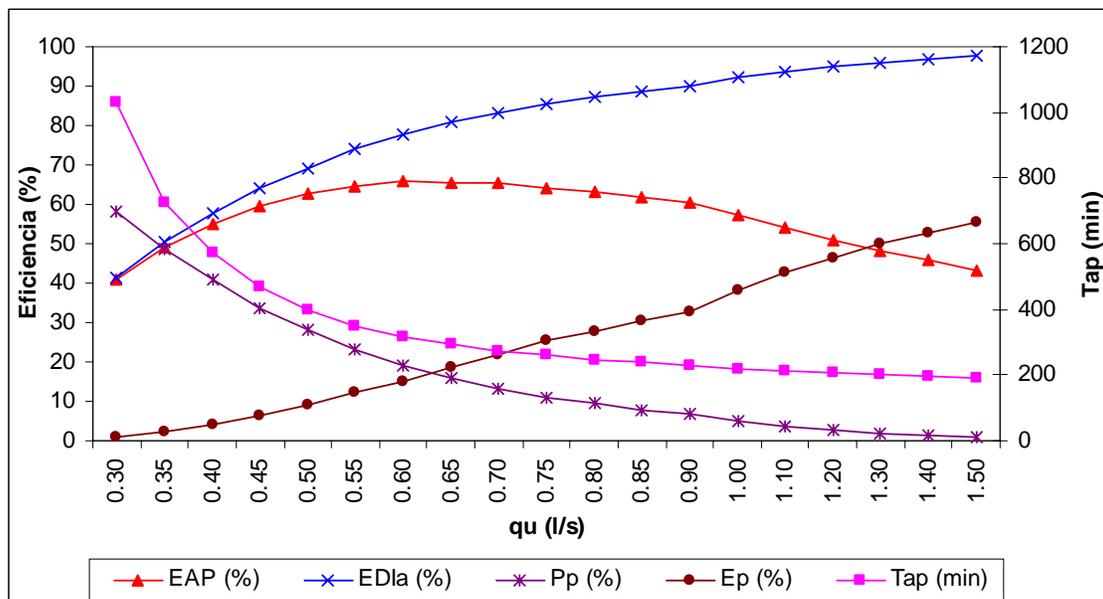


Figura 39: Zona sur, cultivo frutícolas, dr = 50 mm

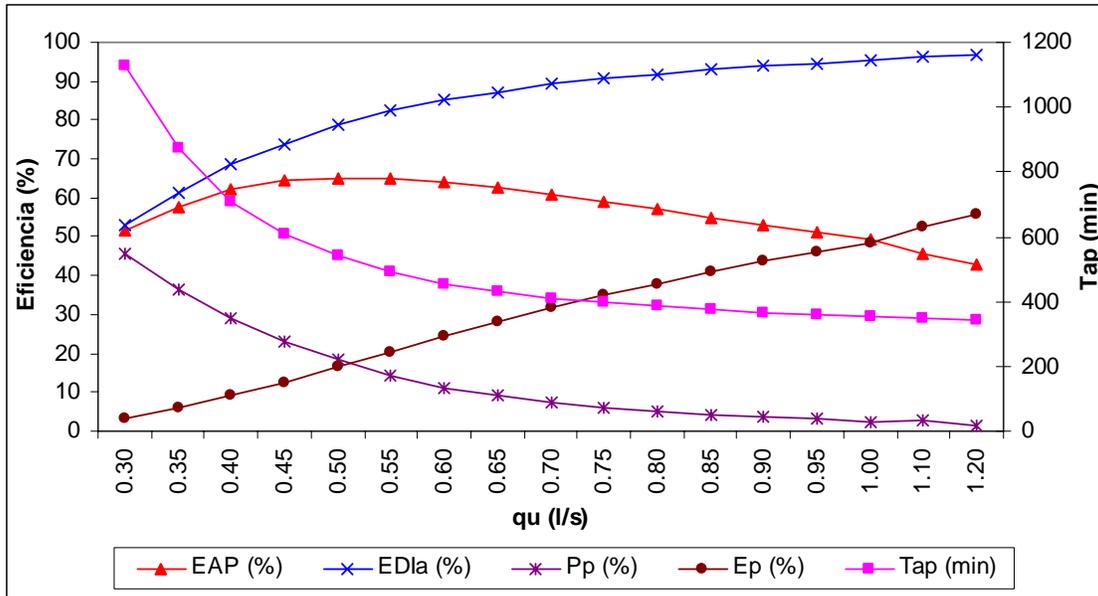


Figura 40: Zona sur, cultivo frutícolas, dr = 70 mm

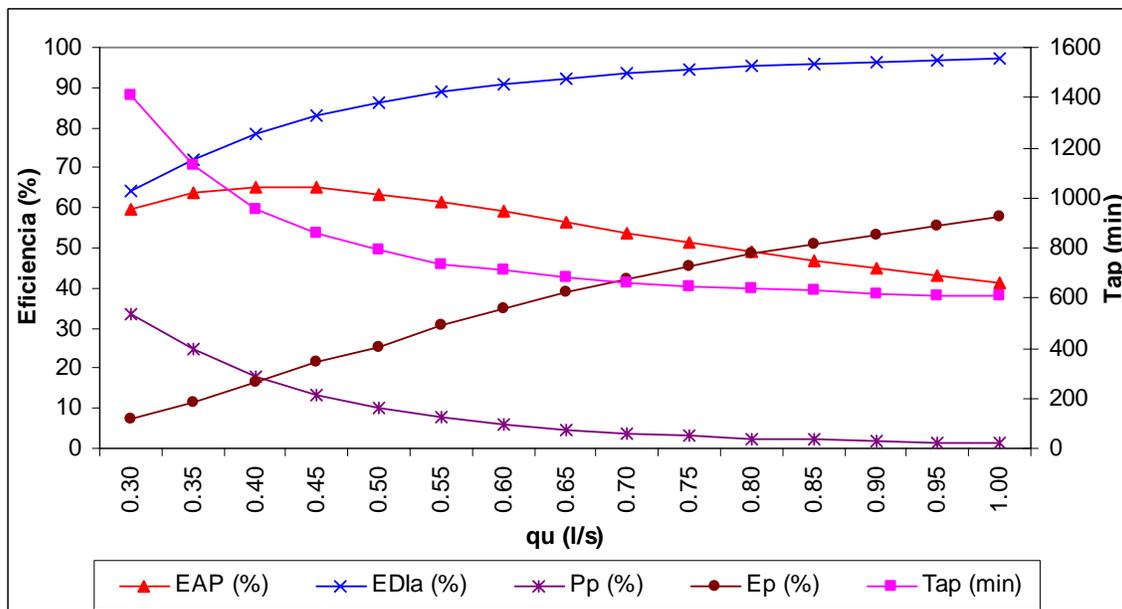


Figura 41: Zona sur, cultivo frutícolas, dr = 100 mm

3.8.5 Validación de escenarios de optimización

La eficiencia de aplicación optimizada en los diferentes escenarios planteados mediante el módulo “Operations Analysis” del modelo WINSRFR, son ampliamente coincidentes con las calculadas por el modelo SIRMOD. Sólo se observan pequeñas diferencias máximas del 3% al comparar ambos modelos (Figura 42).

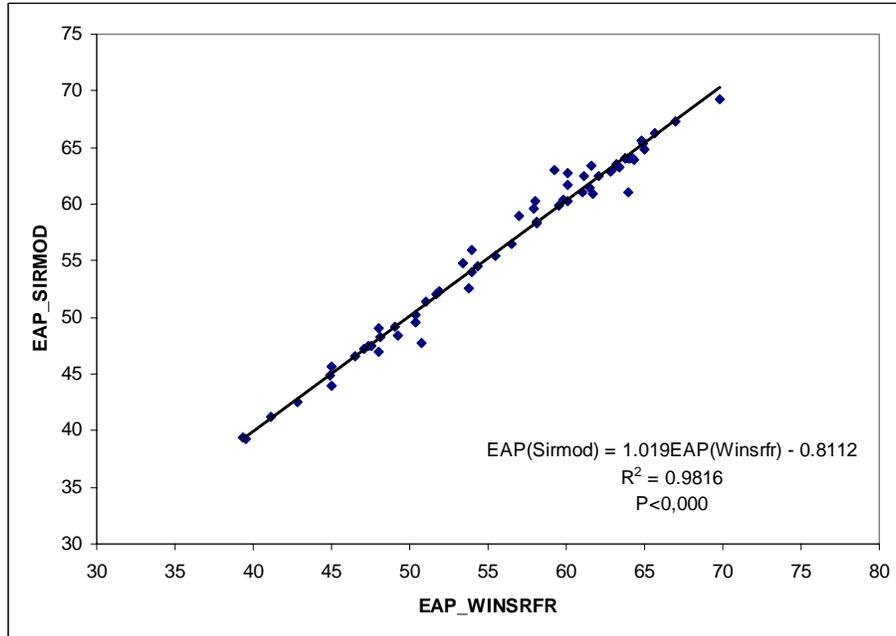


Figura 42: Comparación de EAP optimizadas con los modelos SIRMOD y WINSRFR

4. DISCUSION

La ecuación de infiltración promedio que caracteriza la cuenca del río Tunuyán Superior, presenta valores más bajos que los normales para las texturas de suelos predominantes (franco arenosos), clasificándola en la familia de infiltración (Fn): Lenta (L) a muy lenta (ML), comportándose como suelos de textura “franco arcillosos”, tal comportamiento podría explicarse por lo bajos contenidos de materia orgánica, presencia de capas compactadas y de caliche observadas en los suelos de algunas de las evaluaciones realizadas a campo; como así también la presencia de arenas muy finas. Los valores extremos de las ecuaciones de velocidad de infiltración para las diferentes unidades de suelos caracterizadas por Vallone et al. (2008), toman valores de 22 mm h^{-1} para la unidad “Las Tunas”, presentando valores similares que la unidad “Las Carreras” (16 mm h^{-1}) y $2,46 \text{ mm h}^{-1}$ para la unidad “Aguanda”, el resto de la unidades de suelos toma valores promedios cercanos a la infiltración básica promedio de la cuenca bajo estudio ($5,29 \text{ mm h}^{-1}$). Ello se explica, porque las evaluaciones realizadas en la unidad “Las Tunas” y unidad “Las Carreras”, presentaron en el perfil de suelo analizado un importante porcentaje de piedras y/o cantos rodados, respecto de la unidad “Aguanda”, su comportamiento podría explicarse por la falta de materia orgánica y estructura de los suelos, también en una de las evaluaciones realizadas a campo en esta zona se encontró una capa de caliche de un espesor importante a 50 cm de profundidad. La caracterización de la infiltración de los suelos, así como su variabilidad espacial y temporal, resulta de suma importancia para los métodos de riego superficiales ya que afecta de forma significativa el desempeño del método, como así también las prácticas de diseño y manejo (Raine et al, 1998; Khatri y Smith 2006; Gillies et al 2008). La consideración del carácter variable de la infiltración unida a un sistema de decisión en tiempo real del riego, permitiría conseguir altas eficiencias de riego a campo (Camacho et al, 1997).

Respecto de las ecuaciones de avance los valores obtenidos del coeficiente “p” y del exponente “r”, muestran valores normales con aquellos mencionados en literatura nacional e internacional (Salatino et al, 1992; Morábito 2003; Cuesta et al, 2005; Walker et al, 2006). Las diferentes ecuaciones que explican el avance del frente de agua no presentan diferencias importantes.

En función de la geometría de surcos medida a campo, se definen tres categorías de surcos y se obtienen para las mismas los distintos coeficientes de surco (σ_1 , σ_2 , γ_1 , γ_2 , α_1 , α_2 , ρ_1 , ρ_2), similares a los valores obtenidos en literatura internacional (Dawit et al, 1997). Para el diseño de los métodos de riego por superficie en cultivos hortícolas en la zona bajo riego de la cuenca del río Tunuyán Superior, se recomienda considerar los parámetros de la categoría de surcos “pequeño”. Para cultivos frutícolas y hortícolas de gran expansión vegetativa (zapallo y papa), se recomienda considerar los parámetros de la categoría de surcos “mediano”. Para cultivos frutícolas con métodos de riego sin desagüe al pie es recomendable considerar para el diseño de los sistemas de riego los parámetros de surco de las categorías de surcos “pequeño” y “mediano”.

Respecto de los caudales de manejo, estos resultan ser mayores en la “zona sur” respecto de las demás zonas de manejo bajo análisis. Sus magnitudes son adecuadas para obtener

eficiencias de riego aceptables en función de los sistemas de riego mayormente utilizados (con desagüe al pie). Respecto del método de riego no existen diferencias en el caudal de manejo, ello se debe a que predominan melgas pequeñas (0,80 a 1 m), lo cual determina que el caudal de manejo no tenga grandes variaciones. El caudal unitario se encuentra dentro de valores que frecuentemente se mencionan en bibliografía nacional e internacional (Salatino et al, 1992; Raine, 1998; Feyen y Zerihum, 1999; Morábito 2003; Cuesta et al, 2005; Playan et al, 2005). Sus valores sólo presentan diferencia respecto del tipo de cultivo, debido a la conformación de melgas o surcos para conducir el agua y a la cantidad de estos regados en forma simultánea.

Las láminas de reposición en función de la estación no resultan ser diferentes entre si, aquellas correspondientes a la estación verano están influenciadas por las abundantes lluvias producidas en el periodo estival, por lo cual no muestran valores normales que deberían ser superiores a los obtenidos en primavera y otoño. Las láminas brutas aplicadas para cada estación no son diferentes entre si, inclusive aquellas de verano, lo cual muestra una deficiente programación de los riegos para la estación verano. Las láminas de reposición son mayores en frutales respecto de cultivos hortícolas, ello resulta lógico respecto de la profundidad de suelo explorada por las raíces de los cultivos antes mencionados, el mismo comportamiento se traduce cuando analizamos las láminas almacenadas. Respecto de las láminas aplicadas o brutas en función del método de riego, los sistemas de riego con desagüe al pie aplican mayores láminas brutas, debido a su mayor tiempo de aplicación. Para las láminas infiltradas se observan diferencias respecto del tipo de cultivo, siendo mayores para frutales que para hortalizas. Los cultivos hortícolas al ser regados con eficiencias bajas y generalmente en suelos con buen tenor de humedad, logran infiltrar de esta manera láminas más pequeñas respecto de los frutales. Si bien, no hay diferencias significativas respecto de las láminas escurridas, tal particularidad produce que en los cultivos hortícolas las láminas escurridas al pie sean mayores que para los cultivos frutícolas.

Los modelos de simulación utilizados resultaron de utilidad para interpretar las evaluaciones de riego realizadas a campo en cada caso en particular, como así también para el planteo de escenarios de optimización de los sistemas de riego evaluados. Los resultados del modelo SIRMOD se consideran más precisos que los del modelo ERFIN, ya que su método de cálculo se ejecuta por el modelo hidrodinámico y no por balance de volúmenes, además permite dar más detalle respecto de la pendiente de riego. Si bien el modelo WINSRF presenta sólo los módulos de cálculo por inercia-cero y onda cinemática, como ventajas podemos mencionar que es de licencia pública sin costo alguno de adquisición, permite dar una mayor precisión al parámetro pendiente del terreno y presenta una serie de informes de resultados muy prácticos que incluyen el detalle de láminas de riego, porcentaje de percolación y porcentaje de escurrimiento. A su vez posee módulos muy interesantes para plantear escenarios de optimización y diseño de métodos de riego superficiales. Como desventajas podemos mencionar que no posee la opción de cálculo por el método hidrodinámico. Un buen manejo de estos modelos por parte de los extensionistas en riego, contribuirían a dar soluciones específicas y precisas a los diferentes agricultores de la zona.

En cuanto a los parámetros de desempeño del riego por superficie, para la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior, se han obtenido valores bajos para la eficiencia de aplicación (43%), y valores adecuados para las eficiencias de conducción, almacenaje y distribución; 91%, 99% y 91% respectivamente, similares a los obtenidos en bibliografía internacional (Salatino et al, 1992; Morábito, 2003; Raine, 1998; Cuesta et al, 2005; Pereira et al, 2005; Playán et al 2005; Zerihum y Ketema, 2006). Como se mencionara anteriormente, sólo se observa diferencias en EAP, respecto del factor método de riego, para el resto de los factores analizados no se observan diferencias para EAP, EAL y EDI. Para las zonas donde predominen los sistemas de riego con desagüe al pie, es recomendable la evaluación del desempeño de los métodos de riego con el criterio de riego en “finca”, el mismo considera la unidad de riego teniendo en cuenta la totalidad de cuarteles donde se ha encadenado el riego, ello evitaría la subestimación de EAP y la sobreestimación de EDI.

Los métodos de riego con desagüe resultaron ser menos eficientes en la aplicación, pero presentan una menor percolación profunda respecto los métodos de riego sin desagüe. Estos últimos presentan una eficiencia de distribución menor, si bien no se observan diferencias significativas, debido a su elevada pendiente para el método de riego ($0,0042 \text{ m m}^{-1}$), lo que produce que el agua infiltrada sea mayor al pie de la unidad de riego. Si bien los métodos de riego sin desagüe al pie son los menos frecuentes en la zona bajo estudio (21%), éstos se observaron en mayor proporción para la zona centro norte (60%), respecto de las zonas norte y sur (20% en cada zona), en la zona centro sur no se observó ningún método de riego sin desagüe en el muestreo realizado.

Los cultivos frutícolas presentan una mayor EAP, si bien no se observan diferencias significativas respecto de los cultivos hortícolas. Tal comportamiento es debido a que los cultivos frutícolas presentan un mayor perfil de suelo explorado por las raíces, sin embargo en la zona centro sur los cultivos hortícolas evaluados presentan una excepción a tal comportamiento, obteniendo EAP satisfactorias del 61 %, asociadas a EDI malas o no aceptables del 79 %.

Al analizar los volúmenes escurridos y percolados en las evaluaciones realizadas, para la zona bajo estudio no se observan diferencias entre ambas variables. Como se mencionara anteriormente no se observa el mismo comportamiento respecto del factor método de riego, donde los métodos de riego con desagüe al pie presentan los menores valores de porcentaje de percolación profunda y sólo en éstos métodos se observa escurrimiento al pie. Particularmente resulta interesante destacar el comportamiento observado en la zona norte, la cual presenta valores elevados de porcentaje de escurrimiento al pie (45%), ello está asociado a las elevadas pendientes promedio observadas en dicha zona ($0,015 \text{ m m}^{-1}$).

Estudios preliminares (Salatino et al, 1992) para la zona de Arroyo Claro (Tabla 49), muestran concordancia en los datos obtenidos respecto de la presente evaluación para toda la cuenca y en particular para la zona centro norte donde estaría incluida la zona Arroyo Claro. Al analizar las eficiencias de conducción para ambas campañas de evaluación sus diferencias resultan poco importantes. Al analizar el resto de los

principales indicadores se observan fundamentalmente diferencias en las eficiencias de aplicación y almacenaje. Tal comportamiento se explica debido al alcance del muestreo realizado en ambas campañas, al ciclo húmedo con gran cantidad de precipitaciones para la campaña 2008, que elevó la EAL y al uso para el cálculo de los correspondientes indicadores -en la campaña de análisis (2008)- de modelos de simulación, que no consideran con suficiente precisión las variaciones microtopográficas y las variaciones espaciales de suelo en cuanto a profundidad, textura, compactación e infiltración, por lo tanto sobreestiman la eficiencia de distribución. Si resulta interesante mencionar que, en 16 años se ha producido un incremento de la EAP del 8% (44%-36%), que resulta baja en valor absoluto pero relevante en valores relativos (8% de aumento de la eficiencia / 36 % de eficiencia en el año 1992) en un aumento relativo del 22%, tal comportamiento puede estar influenciado por el crecimiento de la agricultura en la zona durante los últimos años.

Tabla 49: Eficiencia de conducción interna (ECI), aplicación (EAP), distribución (EDI) y eficiencia de almacenaje (EAL) para las campañas de muestreo 1992 y 2008.

Indicadores	Campaña 1992		Campaña 2008	
	Arroyo Claro	Centro Norte	Tunuyán Superior	
ECI	96	93	91	
EAP	36	44	43	
EDI_H	70	74	72	
EDI		91	91	
EAL	87	99	99	

Al analizar la salinidad del suelo (CEes), se observan diferencias significativas por zonas de manejo, siendo la zona sur la que presenta los menores tenores salinos en el perfil explorado por las raíces de los cultivos. Debido a la calidad del agua de riego, textura de los suelos y a las ineficiencias de riego, es que no se observan diferencias significativas de CEes respecto del método de riego, ubicación en la parcela y estrato de suelo considerado. Resulta interesante analizar el comportamiento de la salinidad de suelos para el caso específico de los métodos de riego sin desagüe al pie, pues como se mencionara anteriormente, sus pendientes promedio son elevadas ($0,0042 \text{ m m}^{-1}$) y ello conduciría a que se infiltrara una mayor lámina de riego al pie de la parcela, lo cual debería estar asociado a una menor salinidad al pie de la misma. Tal comportamiento sólo se observa en el 30% de los casos evaluados, ya que en el 70% restante las irregularidades topográficas y las variaciones texturales interfieren la visualización del hecho.

Sólo para los sistemas de riego sin desagüe al pie caracterizados por cultivos frutícolas cuya eficiencia de almacenaje puede tomar cualquier valor, se ha podido establecer una relación entre la uniformidad de riego (EDI) y la variación de la salinidad del suelo dentro de la parcela regada. Por lo tanto, al aumentar la eficiencia de distribución se observa una disminución de la variabilidad del tenor salino en el perfil de los suelos analizados (1 m de profundidad), tal efecto ayuda a mejorar la productividad de los cultivos de raíces profundas (Katerji et al, 2003; citado por Morábito 2003).

Respecto de la salinidad del agua de riego se observa que las zonas centro norte y centro sur presentan valores de CEes más elevados que el resto de las zonas analizadas. Ello puede deberse a la fuente origen del agua y su recorrido hasta la zona bajo riego. Las zonas norte y sur poseen como fuentes de agua una gran cantidad de arroyos y vertientes, con cortos recorridos hasta llegar a la zona bajo riego, diferente situación se presenta para la zona centro (norte y sur), que es atravesada por el río Tunuyán y cuyas nacientes se adentran en la cordillera, sus aguas se cargan con un mayor contenido salino en su camino hasta llegar a las zonas bajo riego. Sin embargo, los tenores de CEes no producen ninguna restricción al potencial productivo de los cultivos bajo riego. Si analizamos los valores de salinidad de la zona sur en la cual observamos los menores tenores salinos, podemos detallar que el incremento del tenor salino en el resto de las zonas analizadas son: 233% para la zona centro sur, 162% para la zona centro norte y 60 % para la zona norte. Si aplicáramos un volumen de riego medio en parcela de $7.000 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, los incrementos antes mencionados producirían 3,21, 2,23 y 0,82 T $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de sales adicionales en las zonas centro sur, centro norte y norte respectivamente.

La eficiencia potencial a alcanzar en la zona bajo estudio, mejorando el manejo del riego en finca, sería del 68%. La mejora del manejo del riego implica equilibrar y disminuir aproximadamente a la mitad los volúmenes escurridos al pie y disminuir en un 40% los volúmenes percolados, respecto de los medidos. Si bien estos valores se manifiestan mayores que los actuales se estima que la eficiencia potencial real de manejo puede tomar valores del 55% - 60%, ya sea por falencias propias del agricultor o por falta de coordinación entre la demanda del cultivo y el sistema de turnados de entrega del agua para riego, debido a que los sistemas de distribución empleados en la cuenca se basan en la oferta del recurso y no en la demanda de los cultivos a regar. Raine et al (1998) obtienen valores similares para regiones de Queensland-Australia, determinando que si los parámetros de manejo son optimizados para cada evento de riego a lo largo del ciclo de cada cultivo, se simularía un control del riego en tiempo real, incrementando aún más las eficiencias de aplicación (20 a 30% por encima de las optimizadas con los valores promedios), sin afectar la calidad de las eficiencias de almacenaje.

Es importante destacar que al analizar las eficiencias de aplicación potenciales según balance salino factibles de alcanzar, para distintos niveles productivos según diferentes autores (Maas y Hoffman, 1977; Vallone y Nijensohn, 2002), las mismas sólo se ven limitadas por las eficiencias de distribución. Ello muestra la excelente calidad de agua y salinidad de suelos que garantizarían en la zona bajo estudio el 100% de la productividad para los cultivos bajo riego.

Resulta interesante la comparación de las eficiencias potenciales según el sistema de riego a utilizar para toda la cuenca del río Tunuyán Superior. Si comparamos la situación actual respecto de la potencial de manejo para sistemas de riego superficiales, la eficiencia de aplicación podría incrementarse en un 25%, valores similares se reportan en bibliografía internacional (Raine, 1998; Cuesta et al, 2005; Playán et al 2005; Smith et al, 2009). Con sistemas de riego superficiales tecnificados (riego por pulsos), este valor se incrementaría al 32% y con sistemas de riego presurizados (goteo, microaspersión), llegaríamos a un máximo potencial del 47%.

Los escenarios de optimización planteados permiten seleccionar diferentes estrategias de aplicación del agua en los métodos de riego superficiales según la finalidad productiva del cultivo. Así, para la producción de cultivos industriales se podría admitir un valor de eficiencia de distribución de hasta el 75%, ello conllevaría al máximo de eficiencia de aplicación según cada caso. Para cultivos cuya cosecha es exigente en calidad o destinado al consumo en fresco, deberían asegurarse eficiencias de distribución mayores al 85%, tal condición definiría para cada situación en particular el caudal unitario, tiempo de riego y eficiencia de aplicación factible de obtener a campo (menor a la máxima posible), según el esquema productivo planteado. Es relevante recalcar que el valor agregado producido en los resultados, se sitúa en el hecho de que, con sólo una mirada sobre los gráficos obtenidos, se puede evaluar la respuesta del sistema en términos de indicadores de desempeño (Feyen, Jan y Zerihum, Dawit, 1999).

La planificación inteligente de escenarios de optimización para el riego por superficie que permitan integrar las demandas de los cultivos, sus funciones de producción con el sistema de turnados o distribución del agua de riego, seguido de su adecuada materialización a campo, garantizarían el uso racional del recurso hídrico, asegurando la sustentabilidad económica y ambiental del sistema productivo.

5. CONCLUSIONES

En cuanto a los métodos de riego superficiales utilizados para regar los cultivos localizados en la cuenca estudiada, predominan los métodos de riego con desagüe al pie (79%), respecto de los métodos de riego sin desagüe (21%), prevaleciendo los métodos de riego por surcos con desagüe (63%), posteriormente las melgas con desagüe (17 %), finalmente los surcos y melgas sin desagüe (ambos aproximadamente en un 10%).

Las velocidades de infiltración representativas para las unidades de suelo del río Tunuyán Superior, se consideran bajas, alcanzando valores extremos de infiltración básica de 2,46 y 22,18 mm h⁻¹ que corresponden a las familias de infiltración del “NRCS-USDA” de Muy Lenta (ML) y Moderadamente lenta (Mod. L).

Se determinaron ecuaciones de avance del frente de agua que caracteriza el área regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior, en función del tiempo, como así también en función del tiempo y caudal unitario.

Se pudo caracterizar en forma adecuada la geometría de los surcos en tres categorías, definidas por las dimensiones del ancho superior, medio e inferior de los surcos. Para cada categoría de surco se ha podido cuantificar sus respectivos coeficientes de surco (σ_1 , σ_2 , α_1 , α_2 , ρ_1 , ρ_2 , γ_1 , γ_2). Los surcos de categoría “pequeño” (< 40 cm), pueden ser utilizados para el diseño de sistemas de riego con desagüe al pie para cultivos hortícolas en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior. En caso de cultivos hortícolas de mayor tamaño (papa, zapallo) regados con el mismo método de riego, se recomienda la utilización de los parámetros de la categoría de surco “mediano” (40-50 cm), igualmente para el caso particular de los cultivos frutícolas regados con métodos de riego con desagüe al pie. Para cultivos frutícolas con métodos de riego sin desagüe al pie es recomendable considerar para el diseño de los sistemas de riego los parámetros de surco caracterizados por la categoría de surco “mediano y pequeño”.

El caudal promedio de manejo para la zona de estudio de la cuenca del río Tunuyán Superior es de 53 L s⁻¹. Sólo se observan caudales de manejo mayores para la zona sur respecto del resto de las zonas analizadas. Los caudales unitarios son mayores para cultivos frutícolas (1,46 L s⁻¹ o L s⁻¹.m⁻¹) comparados al de los cultivos hortícolas (0,67 L s⁻¹).

La pendiente longitudinal, como el tiempo de aplicación y el número de surcos y melgas regadas en forma simultánea son mayores para los métodos de riego con desagüe al pie. El número de surcos regados en forma simultánea es mayor para los cultivos hortícolas respecto de los cultivos frutícolas. Los cultivos hortícolas y los métodos de riego con desagüe al pie presentan las mayores longitudes de la unidad de riego.

Las láminas de riego promedio para la lámina de reposición (dr), bruta (db), infiltrada (dinf), escurrida (de), almacenada (dal) y percolada (dper), son 63 mm, 153 mm, 79 mm, 75 mm, 55 mm, 26 mm respectivamente. Los métodos de riego con desagüe al pie logran aplicar láminas brutas mayores (132 mm) respecto de los métodos de riego sin desagüe

al pie (64 mm). Las láminas infiltradas para los cultivos frutícolas son mayores (72 mm) que para los cultivos hortícolas (49 mm).

Respecto de las variables analizadas en cada evaluación a campo podemos determinar que la EAP para el río Tunuyán Superior, corresponde a la calificación de desempeño “Mala”, debido a que su valor medio es del 43%, (Roscher, 1985) y estaría caracterizada por circunstancias y prácticas de riego, pobres (Hisao et al, 2007). No se observan diferencias significativas para las distintas zonas de manejo de la cuenca del río Tunuyán Superior, ni en los distintos períodos de muestreo analizados, sólo se observan diferencias respecto de los métodos de riego, observándose los mayores valores de eficiencias de aplicación en los métodos de riego sin desagüe.

La eficiencia de almacenaje media (EAL) resulta ser del 99%, para la zona regadía de la cuenca del río Tunuyán Superior, respondiendo a una clasificación de desempeño “Buena” muy cerca del límite superior, 100%. No resultan ser diferentes según zona de manejo, estación, cultivo y método de riego. La eficiencia de distribución media (EDI) resulta ser del 91%, respondiendo a una calificación “Buena”, presenta el mismo comportamiento que EAL, ya que no presenta diferencias respecto a los factores antes mencionados. Es recomendable realizar la evaluación del desempeño de los métodos de riego con el criterio de riego en “finca”, el mismo considera la unidad de riego teniendo en cuenta la totalidad de cuarteles donde se ha encadenado el riego, ello evitaría la subestimación de EAP y la sobreestimación de EDI.

Para la zona bajo estudio de la cuenca del río Tunuyán Superior, los porcentajes medios de percolación profunda y escurrimiento al pie son respectivamente; 32% y 25%. Los métodos de riego sin desagüe presentan los mayores valores de percolación profunda. En la zona de manejo norte se observa un elevado porcentaje de escurrimiento respecto de la percolación profunda. Las evaluaciones realizadas sobre las fincas manejadas por los agricultores han mostrado que la eficiencia de distribución generalmente es alta, indicando una performance del sistema de riego apropiada, pero con eficiencias de aplicación bajas, lo cual indicaría un pobre manejo del método de riego (Pereira et al, 2005).

Los estudios de salinidad de suelos muestran una salinidad media para el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior de $1,126 \text{ dS m}^{-1}$. Las zonas que presentan mayor salinidad en el perfil de suelo analizado son las zonas centro norte y centro sur. Tal comportamiento se debe a la calidad de sus aguas y a la presencia de napas freáticas en las zonas antes mencionadas.

La salinidad promedio del agua de riego en bocatoma de finca para la zona bajo estudio es de $0,697 \text{ dS m}^{-1}$. El agua de riego posee un nivel de sales significativamente mayor para las zonas centro norte y centro sur respecto de las zonas norte y sur. La zona centro sur presenta una CEagua 233% mayor que aquella definida como referencia (zona sur) y la zona centro norte presenta una CEagua 162% mayor, respecto de la zona de referencia antes mencionada.

La precisión del muestreo realizado respecto de las eficiencias de riego evaluadas a campo, como para el muestreo de suelos y aguas en la zona del regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior corresponden a una precisión respecto a la media de: EAP = 18%, EAL = 5%, EDI = 3%, Ep = 26%, Pp = 23%, CEes = 3% y CEagua = 8%. Tales valores se consideran satisfactorios para cumplir con los objetivos del presente estudio. Particularmente este análisis de precisión de muestreo, permite fijar un punto de partida para futuros estudios sobre la cuenca del río Tunuyán Superior.

El principal problema encontrado en el manejo de los métodos de riego por superficie para toda la cuenca del río Tunuyán Superior es el excesivo tiempo de aplicación o de riego el cual produce importantes desperdicios del recurso agua por desagüe superficial y percolación profunda que son factibles de corregir mejorando las prácticas de campo. Para cada zona de manejo los problemas secundarios en el manejo del riego superficial son: a) zona norte: bajos caudales unitarios, b) zona centro norte: deficiente nivelación c) zona centro sur: excesivos caudales unitarios y d) zona sur: deficiente nivelación.

La eficiencia de aplicación media potencial para los métodos de riego por superficie en la cuenca bajo riego de río Tunuyán Superior es del 68 %. Para las zonas de manejo norte y centro sur toma valores del 66%, para la zona sur 69% y para la zona centro norte 71%. La eficiencia potencial factible a alcanzar cambiando el método de riego a sistemas de riego presurizados, considerando la situación más pesimista de operación y mantenimiento del equipo de riego, sería aproximadamente del 85%. En todos los casos mencionados anteriormente debido a la calidad de aguas y suelos se aseguraría la máxima producción potencial de los cultivos.

6. RECOMENDACIONES

Debe entenderse que el estudio realizado permite obtener conclusiones generales, detectando los principales problemas y soluciones para optimizar el manejo del agua dentro de las propiedades agrícolas, en ningún caso los ensayos permiten recomendar una estrategia de manejo particular para cada una de las propiedades evaluadas. No obstante ello sería de gran utilidad avanzar en la elaboración de un manual de asesoramiento en riego superficial que presente una gran variedad de alternativas, de manera que los extensionistas en riego, rápidamente puedan analizar la situación particular y contribuir con una solución rápida que puede ser implementada por el regante, en un sector de su propiedad, de manera de analizar las producciones logradas y los ahorros de agua conseguidos antes de hacerlo extensivo a toda la finca.

6.1 Zonas de Manejo

En general se recomienda reducir los tiempos de aplicación para garantizar el adecuado almacenamiento del agua de riego en la zona de raíces de los cultivos. Para la zona norte es recomendable disminuir el número de surcos o melgas regadas en forma simultánea lo opuesto se recomienda para la zona centro sur, para las zonas centro norte y sur se deberá optimizar y prestar mayor atención en la nivelación de los suelos a regar.

Respecto de la futura tecnificación del área estudiada, la zona norte presenta excelentes condiciones para la instalación de sistemas de riego presurizados comunitarios, debido a los excesivos volúmenes escurridos y presencia de cultivos altamente rentables. Las zonas centro norte y centro sur, principalmente en su expansión hacia el pedemonte presentan condiciones óptimas para la implementación de sistemas de riego por goteo o microaspersión. La zona sur caracterizada por cultivos hortícolas y aromáticas, presenta condiciones óptimas para la implementación de sistemas de riego por goteo de baja presión.

6.1 Métodos de riego con desagüe

Son los métodos de riego que predominan en la zona bajo estudio. La principal causa de la baja eficiencia de riego, es la excesiva pérdida por escurrimiento observada al pie de la parcela. Por lo tanto la estrategia recomendada para optimizar este método de riego sería: reducir el volumen del agua escurrida al pie, asegurando el mojado del suelo en la zona de la rizósfera del cultivo considerado. Para lograr esta estrategia en función de cada caso particular, podrían reducirse los caudales unitarios, regando una mayor cantidad de surcos en forma simultánea, incluso utilizar la técnica de riego con dos caudales (caudal de avance mayor y caudal de infiltración menor) o el método de riego discontinuo. Finalmente es muy importante el control de los tiempos de aplicación que aseguren el adecuado mojado de la zona radical. Para adecuar cada caso particular a campo, se recomienda ir ajustando la operación del riego con un adecuado control in situ, realizando calicatas y/o extrayendo muestras de humedad que permitan verificar el adecuado mojado de la zona radical. Ello permitirá definir con precisión el tiempo de riego y la lámina a reponer a lo largo del ciclo del cultivo que permita optimizar el uso del recurso agua y maximizar el potencial productivo del cultivo bajo riego. Se debe considerar para tal estrategia el ciclo hidrológico y climático del año bajo consideración.

6.2 Métodos de riego sin desagüe.

Se observan en menor medida bajo la zona en estudio. El mayor problema radica en la excesiva lámina percolada e inadecuada uniformidad de riego. Dicha uniformidad se debe a la pendiente en el sentido de riego, que determina que el agua se acumule al pie de la parcela, reduciendo las eficiencias de aplicación y distribución. La estrategia a seguir será: disminuir las láminas percoladas y asegurar una adecuada distribución del agua almacenada a lo largo de toda la unidad de riego. Se recomienda asegurar una adecuada nivelación de los suelos y ajustar los tiempos de aplicación en función del ciclo de cultivo, teniendo en consideración el ciclo hidrológico y climático del año bajo consideración.

6.3 Acciones políticas e institucionales

La implementación a futuro de sistemas de asesoramiento en riego a los agricultores de la zona (SIAR) mediante la coordinación y ejecución de los mismos por parte de todas las instituciones que administran el recurso hídrico a nivel provincial conjuntamente con el apoyo de agricultores líderes por zona de manejo, sería de gran ayuda para adoptar

nuevas técnicas y tecnologías que incrementen la productividad, ahorren agua, minimizando los riesgos ambientales, y contribuyan a la sustentabilidad del sector agropecuario. Las decisiones políticas que fomenten el uso eficiente del recurso, y desalienten al ineficiente y contaminador, darán un marco legal y preciso que ayude al sector agrario a incrementar el comercio nacional e internacional (Chambouleyron, 2005). Sería estratégico investigar el impacto que podría lograrse mediante la implementación a nivel de cuenca de: buenas prácticas de riego, establecimiento de cuotas máximas de entrega de agua a los agricultores, tarifa de riego en función de su eficiencia de uso, leyes que fomenten la tecnificación de los regadíos, etc. Si bien el canon o costo del agua puede ser un instrumento útil para promover nuevas tecnologías que ayuden a un uso más eficiente del uso del agua, presenta muchas limitaciones si se aplica en forma rígida en zonas rurales pobres (Hussian et al, 2007, mencionado por Hsiao et al, 2007). Un adecuado y efectivo plan de implementación de ajustes tarifarios en el canon del riego es complejo y requiere consideración de: la modernización física del sistema de distribución, de su implementación con estructura escalonada y debe considerar finalmente el nivel o sofisticación del sistema de entrega (Burt, 2007).

6.4 Estudios futuros

A futuro deberá realizarse la evaluación del re-uso del recurso agua comprendiendo los desagües de riego utilizados por las zonas bajas, como así también la incorporación de análisis económicos y medioambientales para la optimización de las eficiencias de riego. En ese sentido es necesario avanzar con el estudio de indicadores a nivel de cuenca que contribuyan a tener una visión global de la gestión del uso del agua. Para el planteo de estrategias racionales del uso del agua a nivel de cuenca, es imprescindible el estudio y optimización de los esquemas de distribución actuales, tendiendo a aquellos que se ajusten a las demandas del cultivo, como la demanda programada o por entrega volumétrica.

Resulta interesante la implementación y validación a campo de los diferentes escenarios de optimización del riego por superficie que puedan plantearse en las diferentes zonas de riego. Aquellos deberían incorporar el efecto de la variabilidad de la infiltración de los suelos y la longitud de la unidad de riego, con el objetivo de determinar el patrón de diseño más conveniente desde el punto de vista de manejo y económico, para todo el ciclo de riego del cultivo, indicando a nivel de cuenca los ahorros en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ del recurso agua por la reducción de los volúmenes escurridos y percolados en cada caso.

A futuro sería recomendable que el presente estudio o estudios similares se integren a una aproximación sistemática que permita caracterizar la eficiencia del uso del agua de cada paso o eslabón del complejo proceso productivo agrícola de la cuenca, según menciona Hsiao et al 2007. Esto proveerá un proceso conceptual para establecer los niveles actuales de desempeño a través de los diferentes caminos o pasos del uso del agua en la agricultura y analizar de forma integral sus ineficiencias, para precisar las potenciales mejoras que puedan realizarse en cada parte de la cadena de la eficiencia del uso del agua, los costos asociados en la optimización del desempeño en cada paso o eslabón,

permitiendo dirigir de forma eficiente y precisa los recursos necesarios para maximizar la eficiencia del uso del agua en forma integral y sustentable para la cuenca.

7. BIBLIOGRAFIA

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.

ASAE, STANDARS 2000. Evaluation of irrigation furrows. American 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.

AVELLANEDA, M; BERMEJILLO, A.; MASTROANTONIO, L. 2004. Aguas de riego. Calidad y evaluación de su factibilidad de uso. Universidad Nacional de Cuyo, Ediunc. 143 p.

AYERS, R.S. y D.W. WESTCOT. 1976. Water quality for Agriculture. FAO. Irrigation and Drainage Paper N° 29. Rome, Italy.

BANCO MUNDIAL 2000. Argentina, gestión de los recursos hídricos. Elementos de política para su desarrollo sustentable en el siglo XXI. Volumen I – Informe principal. Informe N° 20729/AR.

BAUTISTA, E.; CLEMMENS, A.; STRELKOFF, T.; SCHLEGEL J. 2009a. Modern analysis of surface irrigation with WinSRFR. Agricultural Water Management 96 1146–1154.

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.; 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.

BONDURANT, J.A. 1957. Developing a furrow infiltrometer. Agric. Engineering pp 602604.

BOOHER, 1974. Surface Irrigation. FAO, Rome.

BOONSTRA and JURRIENS. 1988. BASCAD: a design and operation level basin irrigation model. ILRI Publication # 43, Wageningen, The Netherlands.

BOS, M.; BURTON, M.; MOLDEN D. 2005. Irrigation and drainage performance assessment, practical guidelines. Internacional Water Management Institute. 158 p.

BOS, M. Y CHAMBOULEYRON J. 1998. Parámetros de desempeño de la agricultura de riego en Mendoza, Argentina. Instituto Internacional del Manejo del Agua, Serie Latinoamericana: N° 5. 111 p.

BOS, M. AND NUGTEREN, J. 1990. On irrigation efficiencies. Publication 19 ILRI. The Netherlands.

BOS, M.; REPLOGE J., CLEMMENS A. 1986. Aforadores de caudal para canales abiertos. Publication 38 ILRI. The Netherlands. 293 p.

BOS, M.G. 1980. Irrigation efficiencies at the crop production level. ICID Bull 29(2):18–26.

BURT, C. M. 2007. Volumetric irrigation water pricing considerations. Irrigation Drainage Systems 21:133-144.

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(6):423-442.

CAMACHO, E.; PEREZ, C.; ROLDÁN, J.; ALCAIDE, M. 1997. Modelos de manejo y control en tiempo real del riego por surcos. Departamento de Agronomía E.T.S.I. Universidad de España Córdoba. Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE), 123 (4), pp. 264-269.

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., SALATINO, S., MORÁBITO, J. y FORNERO, L. 1993. Diseval: A model for the design and evaluation of surface irrigation”. Workshop of Crop Models, en el Congreso Mundial de Riego y Drenaje. La Haya. Holanda.

CHAMBOULEYRON J.; MENENTI M.; FORNERO L.; MORÁBITO J. Y STEFANINI L. 1982a. Evaluación y optimización del uso del agua en grandes redes de riego. INCyTH – IILA, Roma.

CHAMBOULEYRON J. Y MORÁBITO J. 1982b. Evaluación del riego en fincas. INCyTH-CRA, Mendoza.

CHAMBOULEYRON J. 1977. Evaluación de la eficiencia de uso del agua de riego a nivel zonal. INCyTH – CRA, Mendoza – Argentina (18 pp).

CHRISTIANSEN, J. E. 1942. Irrigation by sprinkling. University of California. Agr. Exp. Sta. Bull. 610, 120 p.

CLEMMENS, J. 2000. Measuring and improving irrigation system performance at field level [en línea]. U.S Water Conservation Laboratory, USDA-Agricultural Research Service. [<http://www.uswcl.ars.ag.gov/pdf/uswclpubs/WCLPUB-2210-Clemmens.pdf>], [Consulta: 20 agosto de 2009].

CLEMMENS, A.J.; DEDRICK, A.R. AND STRAND, R.J., 1995. BASIN—a computer program for the design of level-basin irrigation systems, version 2.0, WCL Report 19. USDA-ARS U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.

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, R.H. 1989. Irrigation System Design: an Engineering Approach. Prentice-Hall, New Jersey. Chapter 6: Surface System Design. pp. 189-244.

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.

DGI 2004. Plan Director de Ordenamiento de Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Tunuyán. Gobierno de Mendoza, Departamento General de Irrigación, Proyecto PNUD-FAO/ARG/00/08. 119 p.

DGI 1987. Descripción Preliminar de la Subcuenca Río Tunuyán Superior. Departamento General de Irrigación, Mendoza. 86 p.

ELLIOT, R.L. AND WALKER, W. R. 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE*, 25 (2):396-400.

ERIE, L.J. 1968. Management: a key to irrigation efficiency. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 94(IR3):285–293.

FAO 2008. Transferencia de la gestión del riego, esfuerzos y resultados globales. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma. 71 p.

FAO 2002. Irrigation Manual. Planning, development, monitoring and evaluation of irrigated agricultural with farmer participation. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Subregional office for East and Southern Africa (SAFR).

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.

FEMENÍA, A. Y MUSTONI, N. 2009. Usos del suelo mediante interpretación visual de imágenes de alta resolución. Publicación Interna. Departamento General de Irrigación, Mendoza.

GILLIES, M. H.; SMITH, R. J. Y RAINE, S.R 2008. Accounting for temporal inflow variation in the inverse solution for infiltration in surface irrigation. *Irrigation Science* (2007) 25:87-97.

GRASSI, C. J. 1998. Fundamentos del riego. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida. Venezuela. 391 p.

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.

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.

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.

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.

HERNÁNDEZ, J. Y MARTINIS, N. 2008. Particularidades de las cuencas hidrogeológicas con fines de riego en la provincial de Mendoza. IV Jornadas de Riego y Fertirriego, 4 y 5 de Diciembre de 2008, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina.

HSIAO, T. C.; STEDUTO, P.; FERERES, E. 2007. A systematic quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Journal of Irrigation Science* 25:209-231.

HUSSIAN, I.; TURRAL, H.; MOLDEN D.J.; MOBIN-UD-DIN, A. 2007. Measuring and enhancing the value on agricultural water in irrigated river basin. *Irrigation Science*, Volume 25, Number 3, 263-282.

ICID (International Commission on Irrigation and Drainage) 1978. Standards for the calculation of irrigation efficiencies. *ICID. Bull* 27(1):91–101.

INDEC. 2002. Censo Nacional Agropecuario 2002. Resultados para el total del país por provincia [en línea]. Buenos Aires, Argentina, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

de la Republica Argentina. [<http://www.indec.mecon.gov.ar>], [Consulta: 10 de febrero de 2006].

ISRAELSEN, O.W. 1932. Irrigation principles and practices, 1st edn. Wiley, New York.

ISRAELSEN, O. Y HANSEN, V. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Universidad del estado de Utah, Logan, Utah, Estados Unidos. 385 p.

JAMES, L.G. 1988. Principles of Farm Irrigation Design. John Wiley & Sons Ltd., New York. Chapter 7: Surface Irrigation. pp. 301-382.

JENSEN M. 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science* 25:233–245.

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.E. 1967. Evaluating irrigation efficiency. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 93(IR1):83–98.

JURRIENS M., D. ZERIHUM, J. BOONSTRA and FEYEN, J. 2001. Surface irrigation Software. Design, operation and evaluation of basin, border and furrow irrigation with SURDEV computer package. ILRI publication. Wageningen, The Netherlands.

KAY, M. 1986. Surface irrigation - systems and practice. Cranfield Press, Bedford, U.K.

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.

KELLER, A.A. AND KELLER, J. 1995. Effective efficiency: a water use efficiency concept for allocating freshwater resources. Discussion paper 22, Center for Economic Policy Studies, Winrock International, 19 p.

KETERJI, N.; VAN HOORN, J.W.; HAMDY, A. AND MASTRORILLI M. 2003. Salinity effect on crop development and yield, analysis of salt tolerance according to several classification methods. *Agricultural Water Management*. Volume 62, Issue 3.

KHATRI, K. L.; SMITH, R. J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrigation Science* (2006) 25:33-43.

KINDSVATER, C.E; CARTER, R.W. 1957. Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs. *J. Hydraulics Div. ASAE*, 83(HY6), Paper 1453.

KOSTIAKOV, A.N. 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration". VI Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo, Paris, Francia.

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.

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.

MAAS, E. V. Y HOFFMAN, G. J. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. J. Irrig. Drain. ASCE 103:115-134.

MERRIAM, J.; KELLER, J. Y ALFARO, J. 1973. Irrigation system evaluation and improvement. Department of agriculture and Utah State University, Logan, Utah, USA.

MERRIAM, J.; AND KELLER, J. 1978. Farm Irrigation System Evaluation. A guide for management. Department of Agriculture and Irrigation Engineering. Utha State University, Logan, Utah, USA.

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 Maestria. 91 p.

MORÁBITO, J. A. - 1997 - El riego en el mundo, Argentina y Mendoza. Publicación interna INA CRA.

MORÁBITO J., CHAMBOULEYRON J., SALATINO S. Y FORNERO L. 1991. ERFIN – Modelo para el cálculo de eficiencias de riego en finca. Curso utilización de modelos de simulación en manejo del agua, EE Mendoza del INTA.

NIJENSOHN, L. 1978. Determinación de la textura de suelos por el método del Volumen de Sedimentación. Cátedra de Hidrología, Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.

NUGTEREN, J. 1969. Ingenieurscollage Veldirrigatie. Landbouwhogeschool.

PEREIRA, L.; HORST, M. G.; SHAMUTALOV, S. S.; GONCALVES, J. M. 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea basin. Agricultural Water Management 77 210-231.

PEREIRA, L.; THEIB, O.; ABDELAZIZ. 2002. Irrigation management under water scarcity. Agricultural Water Management 56 175-206.

PEREIRA, L. 1999. "Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion". *Agricultural Water Management* 40 (1999) 153-169.

PIZARRO, F. 1996. *Riegos localizados de alta frecuencia*. 3ª Edición. Ed. Mundi Prensa. España.

PLAYÁN, E.; LECINA, S.; ISIDORO, D.; DECHMI, F.; CAUSAPÉ, J.; FACI, J.M; 2005. Irrigation evaluation and simulation at the Irrigation District V of Bardenas (Spain). *Agricultural Water Management* 73 223-245.

RAINE, S. R; MCCLUMONT, D. J.; SMITH R. J. 1998. *The Effect of Variable Infiltration on Design and Management Guidelines for Surface Irrigation*. National Centre for Engineering in Agriculture, The University of Southern Queensland, Qld 4350, Australia.

ROBINSON, A.R. AND CHAMBERLAIN, A.R. 1960. Trapezoidal flumes for open channel flow measurement. *Trans. ASAE*, vol 3, num 2, pag 120-124.

ROMAY, C.; MORÁBITO, J.; SALATINO, S.; ROBY, O.; SOLSONA, J. y ALTURRIA, L. 2001. "Evaluación integral del riego por pulsos en los oasis regadíos argentinos. Eficiencia de riego, análisis económico y evaluación de los usuarios". En IV Diálogo Interamericano de Gerenciamiento de Aguas. En busca de soluciones. Foz de Iguazú. Paraná. Brasil.

ROSCHE 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.

SCHUURMANS, W. 1989. Impact of unsteady flow on irrigation water distribution. In: Rydzewski JR, Ward CF (eds) *Irrigation: theory and practice*, Pentech Press, London.

SECKLER, D.; AMARASINGHE, U.; MOLDEN, D.; DE SILVA, R. AND BARKER, R. 1998. World water demand and supply, 1990 to 2025: scenarios and issues. In: Res Rept. 19, International water management institute, Colombo, Sri Lanka, 13 pp.

SECKLER, D. 1996. The new era of water resources management: from "Dry" to "Wet" Water Savings. In: Res. Rept., no. 1, International water management institute, Colombo, Sri Lanka, 20 pp.

SHEN J. 1960. Discharge characteristics of triangular thin-plate weirs. Water supply Paper 1617B. US Department of the Interior, Geological Survey. US Government Printing Office, Washington D.C.

SKOGERBOE, G.V.; HYATT, M.L.; ENGLAND, J.D AND JOHSON, J.R. 1967. Design and calibration of submerged open channel flow measurements structures. Utah Water Research Laboratory. Logan Utah.

SRH 2006. Bases para un plan nacional de recursos hídricos de la República Argentina [en línea]. Secretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina. [<http://www.hidricosargentina.gov.ar/Base-PlanNac.pdf>], [Consulta: 15 de agosto de 2009].

STRELKOFF, T.; CLEMMENS A.; BAUTISTA, E. 2000. Field-parameter estimation for surface irrigation management and desing [en línea]. [<http://www.uswcl.ars.ag.gov/pdf/uswclpubs/WCLPUB-2234-strelkoff.pdf>], [Consulta: 20 agosto de 2009].

STRELKOFF, T. 1999. SRFR: a computer program for simulating flow in surface irrigation. Version 39. WCL report # 46 US Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona. 58 pp.

STRELKOFF, T.S., A.J. CLEMMENS, AND B.V. SCHMIDT. 1998. SRFR, Version 3.31 – A model for simulating surface irrigation in borders, basins and furrows. USWCL, USDA/ARS, 4331 E. Broadway, Phoenix, AZ.

STRELKOFF, T.S.; CLEMMENS, A.J.; SCHMIDT, B.V. AND SLOSKY, E.J., 1996. BORDER—A Design and Management Aid for Sloping Border Irrigation Systems. WCL Report 21. US Department of Agriculture Agricultural Research Service, U.S. Water Conservation Laboratory, Phoenix, AZ.

STRELKOFF, T. 1990. SRFR: a computer program for simulating flow in surface irrigation. Version 20. WCL report # 17 US Water Conservation Laboratory, Phoenix, Arizona. 69 pp.

STRELKOFF, T. 1985. BRDRFLW: a mathematical model of border irrigation. USDA, Agricultural Research Service Report # 29, Phoenix, Arizona. 104 pp.

USDA, 1983. SCS National Engineering Handbook. Section 15, Chapter 5. Furrow Irrigation. US Government Printing Office, Washington, D.C.

USDA, 1974. SCS National Engineering Handbook. Section 15, Chapter 4, Border Irrigation. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

USDA 1954. Manual de diagnóstico y recuperación de suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura N°60. USA.

USDA 2009. WinSRFR 3.1 User Manual. U.S Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Arid Land Agricultural Research Center. 193 p.

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.

VALLONE, R.; MAFFEI, J.; MORÁBITO, J.; MASTROANTONIO, L.; LIPINSKI, V.; FILIPPINI, F.; OLMEDO, F. 2008. Mapa utilitario de suelos y riesgo de contaminación edáfica en los oasis irrigados de la provincia de Mendoza. Jornadas de Investigación en Recursos Hídricos, 27 de septiembre de 2008, Espacio para la Ciencias y Tecnología, Mendoza.

VALLONE, R.; NIJENSOHN, L. 2002. Guía de orientación para regantes de zonas áridas. Con énfasis en el manejo del agua en áreas salinas. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina.

WALKER, R.; PRESTWICH, C.; SPOFFORD, T 2006. Development of revised USDA-NRCS intake families for surface irrigation. Agricultural Water Management 85 (2006) 157-164.

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. 1993. SIRMOD: Surface Irrigation Simulation Software. Biological and Irrigation Engineering Department. Utah State University, Logan, Utah, USA.

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. AND SKOGERBOE. 1987. Surface Irrigation Theory and Practice. Utah State University, Prentice – Hall.

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. AND ALLEN, R.G. 1998. Definitive basin water management. In: Burns JI, Anderson SS (eds) Proceedings of the 14th technical conference on irrigation, drainage and flood control, USCID, Phoenix, Arizona, June 3–6 1998, pp 117–126.

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

WITHERS, B. and VIPOND, S. 1974. Irrigation - design and practice. Batsford, London.

WOLTERS, W 1992. Influences on the efficiency of irrigation water use. Publication 51 ILRI. The Netherlands.

ZERIHUM BEKELE Y KETEMA TILAHUN 2006. On-farm performance evaluation of improved traditional small-scale irrigation practices: A case study from Dire Dawa area, Ethiopia. Irrigation and Drainage Systems 20:83:98.

ZERIHUN, D.; WANG Z.; RIMAL S.; FEYEN J.; MOHAN REDDY J. 1997. Analysis of surface irrigation performance terms and indices. Agricultural Water Management 34 25-46.

8. ANEXO

8.1 Propiedades evaluadas en la cuenca del río Tunuyán Superior

Se detalla, estación de muestreo (Período), código de encuesta (Encuesta), fecha de realización (dd/mm/aaaa), coordenadas geográficas en sistema posgar 94 (X,Y,Z), zona de manejo (Zona), titular de la propiedad visitada (Titular) y cultivo.

Tabla 50: Propiedades evaluadas durante el período 2007-2008

<i>Período</i>	<i>Encuesta</i>	<i>Fecha</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>Zona</i>	<i>Titular</i>	<i>Cultivo</i>
Verano	TS 01	20/03/2007	2482854	6311607	1219	Norte	Pablo Calandria	Vid
Otoño	TS 02	4/11/2007	2490057	6267132	949	Centro Sur	Gladis Blanco	Ajo
Otoño	TS 03	4/18/2007	2494396	6264667	962	Centro Sur	Carlos Bourget	Vid
Otoño	TS 04	25/04/2007	2489211	6270143	1000	Centro Sur	Carlos Testa	Manzana
Otoño	TS 05	27/4/2007	2487471	6268490	1034	Centro Sur	Rizzo Jose	Vid
Otoño	TS 06	5/5/2007	2488659	6305903	1026	Norte	Alicia Monfarrel	Vid
Otoño	TS 07	17/5/2007	2496514	6288701	880	Centro Norte	Arlin Osvaldo	Ajo
Primavera	TS 08	8/28/2007	2497267	6267879	940	Centro Sur	Vitaliti Armando	Ajo
Primavera	TS 09	8/30/2007	2488269	6264548	1041	Centro Sur	Angulo	Peral
Primavera	TS 10	9/5/2007	2498855	6289636	885	Centro Norte	Moron	Ajo
Primavera	TS 11	9/12/2007	2491022	6283429	912	Centro Norte	Carlos Steindl	Peral
Primavera	TS 12	9/28/2007	2490466	6267840	998	Centro Sur	Bianchetti Andres	Vid
Primavera	TS 13	10/19/2007	2483870	6311169	1165	Norte	Sid Carlos	Vid
Primavera	TS 14	10/30/2007	2490077	6265629	1011	Centro Sur	Rebón Adriana	Vid
Primavera	TS 15	11/1/2007	2492755	6284103	904	Centro Norte	Palleres Roberto	Peral
Primavera	TS 16	11/5/2007	2488150	6308974	1069	Norte	Carlos Correa	Vid
Primavera	TS 17	11/8/2007	2493238	6249524	1025	Sur	Moronta Jose	Ajo
Primavera	TS 18	11/15/2007	2491770	6244102	1087	Sur	Luffi Daniel	Orégano
Primavera	TS 19	11/20/2007	2493974	6247481	1042	Sur	Guevara Guillermo	Alfalfa
Primavera	TS 20	12/4/2007	2494805	6259828	966	Sur	Jacinto Ríos	Zapallo
Primavera	TS 21	12/6/2007	2484546	6278072	974	Centro Norte	Hinojosa	Manzana
Primavera	TS 22	12/10/2007	2481543	6275419	1021	Centro Norte	Cairo Mario	Durazno
Primavera	TS 23	12/12/2007	2489278	6274678	962	Centro Norte	Palorma Eduardo	Nogal
Primavera	TS 24	12/14/2007	2470439	6298940	1427	Norte	Salentein	Nogal
Verano	TS 25	1/16/2008	2494264	6269600	944	Centro Sur	Eduardo Enrique	Vid
Verano	TS 26	1/18/2008	2490849	6266176	997	Centro Sur	Alejandro Ríos	Vid
Verano	TS 27	1/21/2008	2491467	6282936	912	Centro Norte	Carlos Cuervo	Manzana
Verano	TS 28	2/4/2008	2487287	6263892	1051	Centro Sur	Suarez	Manzana
Verano	TS 29	2/6/2008	2494084	6264899	962	Centro Sur	Hidalgo	Vid
Verano	TS 30	2/13/2008	2483556	6278664	982	Centro Norte	Sergio Suarez	Vid
Verano	TS 31	2/15/2008	2485040	6276512	974	Centro Norte	Tito Garbuyo	Vid
Verano	TS 32	2/27/2008	2493093	6247231	1045	Sur	Antonio Sierra	Oregano
Verano	TS 33	2/28/2008	2484622	6308062	1088	Norte	Rosas Cremaschi	Vid
Verano	TS 34	2/29/2008	2490855	6241431	1124	Sur	Geovani Morea	Manzana
Verano	TS 35	3/5/2008	2494418	6255446	988	Sur	Dominguez	Papa
Verano	TS 36	3/15/2008	2492121	6283242	902	Centro Norte	Lanzilot Domingo	Peral
Verano	TS 37	3/18/2008	2489970	6275960	941	Centro Norte	Troilo Nicolás	Vid

<i>Período</i>	<i>Encuesta</i>	<i>Fecha</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>Zona</i>	<i>Titular</i>	<i>Cultivo</i>
Otoño	TS_38	4/9/2008	2495413	6262925	950	Sur	Passardone	Ajo
Otoño	TS_39	4/12/2008	2493659	6280053	901	Centro Norte	Carlos Sid	Vid
Otoño	TS_40	4/15/2008	2486166	6277788	963	Centro Norte	Piermarini Humberto	Durazno
Otoño	TS_41	4/19/2008	2483629	6285267	985	Centro Norte	Porcel Gabriel	Ajo
Otoño	TS_42	4/22/2008	2482470	6275605	1002	Centro Norte	Felip Roule	Vid
Otoño	TS_43	4/29/2008	2484549	6313059	1223	Norte	Victor Hugo Tejera	Vid
Otoño	TS_44	4/30/2008	2484913	6308661	1094	Norte	Santone	Vid
Otoño	TS_45	5/12/2008	2494228	6257006	979	Sur	Manso	Vid
Otoño	TS_46	5/15/2008	2495442	6261000	965	Sur	Neila	Ajo
Otoño	TS_47	7/1/2008	2486064	6282207	962	Centro Norte	Lito Dipietro	Ajo
Otoño	TS_48	7/4/2008	2473158	6292237	1223	Norte	Hernan Correa	Nogal

8.2 Salinidad de agua de riego y suelo en las propiedades evaluadas

Se consigna: estación de muestreo (Período), código de encuesta (Encuesta), cultivo, conductividad eléctrica del agua de riego en bocatoma de finca expresada en dS m^{-1} (CEagua), profundidad radical de cultivo (Profundidad), conductividad eléctrica promedio de suelo expresada en dS m^{-1} (CEespr), conductividad eléctrica promedio de suelo en cabeza de la unidad de riego expresada en dS m^{-1} (CEescab), conductividad eléctrica promedio de suelo en medio de la unidad de riego expresada en dS m^{-1} (CEesmed), conductividad eléctrica promedio de suelo al pie de la unidad de riego expresada en dS m^{-1} (CEespie).

Tabla 51: Salinidad de agua de riego y suelos en las propiedades evaluadas

<i>Período</i>	<i>Encuesta</i>	<i>Cultivo</i>	<i>CEagua</i>	<i>Profundidad</i>	<i>CEespr</i>	<i>CEescab</i>	<i>CEesmed</i>	<i>CEespie</i>
Verano	TS_01	Vid	0,580	1,00	1,155	0,811	0,860	1,786
Otoño	TS_02	Ajo	1,063	0,50	0,537	0,610	0,518	0,482
Otoño	TS_03	Vid	1,118	1,00	1,488	1,435	1,305	1,725
Otoño	TS_04	Manzana	1,115	1,00	1,284	1,158	1,353	1,376
Otoño	TS_05	Vid	1,102	1,00	1,077	1,138	0,924	1,168
Otoño	TS_06	Vid	0,552	1,00	1,140	1,506	0,658	1,256
Otoño	TS_07	Ajo	0,552	0,50	2,227	2,227	2,298	2,415
Primavera	TS_08	Ajo	1,219	0,50	1,040	1,134	0,970	1,018
Primavera	TS_09	Peral	1,210	1,00	1,389	1,476	1,009	2,060
Primavera	TS_10	Ajo	1,216	0,50	1,620	2,126	0,667	2,068
Primavera	TS_11	Peral	0,612	1,00	0,632	0,856	0,670	0,561
Primavera	TS_12	Vid	1,332	1,00	1,710	1,531	2,037	1,562
Primavera	TS_13	Vid	0,569	1,00	0,590	0,646	0,573	0,569
Primavera	TS_14	Vid	0,826	1,00	1,238	1,429	1,179	0,973
Primavera	TS_15	Peral	0,600	1,00	1,297	1,017	0,818	2,057
Primavera	TS_16	Vid	0,581	1,00	0,941	0,947	0,698	1,177
Primavera	TS_17	Ajo	0,203	0,50	0,611	0,495	0,750	0,587
Primavera	TS_18	Orégano	0,168	0,50	0,414	0,276	0,544	0,291
Primavera	TS_19	Alfalfa	0,607	1,00	0,395	0,390	0,275	0,520

<i>Período</i>	<i>Encuesta</i>	<i>Cultivo</i>	<i>CE H₂O</i>	<i>Profundidad</i>	<i>Cespr</i>	<i>Cecab</i>	<i>Cemed</i>	<i>Cepie</i>
Primavera	TS_20	Zapallo	0,162	0,50	0,795	0,750	0,900	0,735
Primavera	TS_21	Manzana	0,917	1,00	0,942	0,885	0,890	1,050
Primavera	TS_22	Durazno	0,917	1,00	0,934	0,960	0,825	1,100
Primavera	TS_23	Nogal	0,867	1,00	1,410	1,210	1,670	1,350
Primavera	TS_24	Nogal	0,132	1,00	0,340	0,330	0,360	0,335
Verano	TS_25	Vid	0,805	1,00	1,677	1,119	2,221	1,690
Verano	TS_26	Vid	0,782	1,00	1,222	1,135	1,375	1,155
Verano	TS_27	Manzana	0,486	1,00	1,640	1,710	1,915	1,295
Verano	TS_28	Manzana	0,873	1,00	1,207	0,925	1,705	0,990
Verano	TS_29	Vid	0,833	1,00	1,627	1,500	1,370	2,010
Verano	TS_30	Vid	0,869	1,00	0,977	1,010	0,735	1,185
Verano	TS_31	Vid	0,799	1,00	0,937	1,105	0,685	1,020
Verano	TS_32	Oregano	0,245	0,50	0,632	0,840	0,590	0,570
Verano	TS_33	Vid	0,389	1,00	0,518	0,560	0,485	0,510
Verano	TS_34	Manzana	0,255	1,00	0,420	0,505	0,410	0,345
Verano	TS_35	Papa	0,462	0,50	0,908	0,760	0,775	1,190
Verano	TS_36	Peral	0,522	1,00	1,568	1,580	1,560	1,565
Verano	TS_37	Vid	1,063	1,00	1,033	1,010	1,095	0,995
Otoño	TS_38	Ajo	0,266	0,50	1,718	1,945	1,775	1,435
Otoño	TS_39	Vid	1,359	1,00	2,022	2,770	1,815	1,480
Otoño	TS_40	Durazno	1,222	1,00	1,155	1,335	1,175	0,955
Otoño	TS_41	Ajo	0,213	0,50	0,807	0,550	0,975	0,895
Otoño	TS_42	Vid	1,165	1,00	1,042	1,150	0,940	1,030
Otoño	TS_43	Vid	0,586	1,00	1,082	1,225	1,030	0,900
Otoño	TS_44	Vid	0,815	1,00	1,352	1,565	1,295	1,195
Otoño	TS_45	Vid	0,255	1,00	0,852	0,590	1,075	0,890
Otoño	TS_46	Ajo	0,450	0,50	1,070	1,355	1,025	0,830
Otoño	TS_47	Ajo	0,310	0,50	2,533	3,040	2,605	1,955
Otoño	TS_48	Nogal	0,212	1,00	0,478	0,415	0,500	0,520

8.3 Láminas de riego en las propiedades evaluadas

Se detalla código de encuesta (Encuesta), método de riego, números de surcos o melgas regadas simultáneamente, ancho y/o espaciamiento entre surcos y/o melgas, longitud de la unidad de riego (considerando encadenamiento de riego), lámina de reposición (dn), lámina bruta (db), lámina infiltrada (dinf), lámina escurrida al pie (de), lámina almacenada (dal), lámina percolada (dper).

Tabla 52: Láminas de riego en las propiedades evaluadas

<i>Encuesta</i>	<i>Método de riego</i>	<i>Número Surcos Melgas</i>	<i>Ancho Esp, (m)</i>	<i>Tap, (min)</i>	<i>Long, (m)</i>	<i>dn (mm)</i>	<i>db (mm)</i>	<i>dinf (mm)</i>	<i>de (mm)</i>	<i>dal (mm)</i>	<i>dper (mm)</i>
TS_01	S s/D	15	1,80	81	100	70	43	43	0	43	0
TS_02	S c/D	10	0,50	182	240	43	131	51	80	43	8

<i>Encuesta</i>	<i>Método de riego</i>	<i>Número Surcos Melgas</i>	<i>Ancho Esp, (m)</i>	<i>Tap, (min)</i>	<i>Long, (m)</i>	<i>dn (mm)</i>	<i>db (mm)</i>	<i>dinf (mm)</i>	<i>de (mm)</i>	<i>dal (mm)</i>	<i>dper (mm)</i>
TS_03	S c/D	9	2,00	406	239	90	88	81	7	81	0
TS_04	S c/D	9	1,00	344	147	107	216	74	142	74	0
TS_05	S c/D	7	1,25	1440	275	142	209	115	94	115	0
TS_06	S s/D	17	1,03	180	138	168	63	63	0	63	0
TS_07	S c/D	16	0,50	220	107	11	235	45	190	11	34
TS_08	S c/D	13	0,50	125	193	35	38	35	3	33	2
TS_09	S c/D	30	0,60	206	270	66	124	85	39	66	19
TS_10	S c/D	30	0,50	1091	290	12	165	84	81	12	72
TS_11	M c/D	2	4,50	360	300	83	1241	134	1107	83	51
TS_12	S c/D	10	2,50	340	143	119	172	135	37	119	16
TS_13	S c/D	22	2,40	600	285	26	71	55	16	26	29
TS_14	S c/D	10	2,50	175	106	41	133	51	82	41	10
TS_15	M c/D	2	5,00	145	150	85	117	126	3	83	43
TS_16	S c/D	10	2,50	1107	272	70	179	75	104	70	5
TS_17	S c/D	10	0,50	190	330	16	28	20	8	16	4
TS_18	S c/D	10	0,70	600	405	16	100	36	64	16	20
TS_19	M c/D	5	14,00	81	153	84	40	27	13	27	0
TS_20	S c/D	20	1,50	150	141	47	92	72	20	47	25
TS_21	M c/D	5	4,00	240	180	67	106	96	10	67	29
TS_22	M s/D	14	4,00	210	77	152	196	196	0	152	44
TS_23	S s/D	40	2,50	240	90	51	77	77	0	51	26
TS_24	S c/D	22	3,00	240	129	28	45	18	27	18	0
TS_25	M c/D	20	2,20	235	196	18	201	81	120	18	63
TS_26	S c/D	6	2,00	378	150	51	113	53	60	51	2
TS_27	M s/D	8	4,00	104	90	9	72	72	0	72	63
TS_28	S c/D	15	4,00	900	262	110	305	271	34	110	161
TS_29	S c/D	16	2,00	372	104	15	105	30	75	15	15
TS_30	M s/D	8	2,20	190	90	33	55	55	0	33	22
TS_31	S c/D	5	2,20	376	280	88	221	85	136	84	1
TS_32	S c/D	12	0,70	360	319	25	52	25	27	24	1
TS_33	S c/D	12	1,25	1236	249	100	394	135	259	100	35
TS_34	M s/D	8	4,00	69	114	76	115	115	0	76	39
TS_35	S c/D	8	0,90	1441	303	36	158	41	117	36	5
TS_36	S s/D	4	5,00	229	93,8	42	53	53	0	42	11
TS_37	S c/D	12	1,00	131	77	111	107	83	24	83	0
TS_38	S c/D	10	0,70	495	162,8	70	246	187	59	70	117

<i>Encuesta</i>	<i>Método de riego</i>	<i>Número Surcos Melgas</i>	<i>Ancho Esp, (m)</i>	<i>Tap, (min)</i>	<i>Long, (m)</i>	<i>dn (mm)</i>	<i>db (mm)</i>	<i>dinf (mm)</i>	<i>de (mm)</i>	<i>dal (mm)</i>	<i>dper (mm)</i>
TS_39	M c/D	13	1,25	177	128	28	71	63	8	28	35
TS_40	M s/D	9	5,00	158	117	62	75	75	0	75	13
TS_41	S c/D	24	0,40	182	97	26	70	28	42	26	2
TS_42	M c/D	10	1,80	142	66	100	67	55	12	55	0
TS_43	S c/D	42	5,00	294	61,2	38	104	51	53	38	13
TS_44	M c/D	10	2,50	3157	101	135	593	225	368	134	91
TS_45	S s/D	11	2,50	45	57,7	139	26	26	0	26	0
TS_46	S c/D	17	0,50	92	89,7	18	120	68	52	18	50
TS_47	S c/D	10	0,70	401	144,6	30	87	77	10	30	47
TS_48	S c/D	8	1,87	175	155	25	40	25	15	24	1

8.4 Caracterización de suelo y lámina de reposición de las propiedades evaluadas

Se detalla: código de encuesta (Encuesta), humedad del suelos (g%g) antes y después del riego, volumen de sedimentación en ml%g (VS), textura de suelo predominante, peso específico aparente de cada propiedad evaluada expresado en g/cm³ (PEA), profundidad radical (m) y lámina de reposición (mm).

Tabla 53: Caracterización de suelo y lámina de reposición de las propiedades evaluadas

<i>Encuesta</i>	<i>Humedad del suelo (%) (g % g de suelo seco)</i>		<i>VS (mL%g)</i>	<i>Textura predominante</i>	<i>PEA (g /cm³) Estimado</i>	<i>Profundidad radical (m)</i>	<i>Lámina reposición (mm)</i>
	<i>Antes</i>	<i>Después</i>					
TS_01	16,3	22,4	114	Franco Limoso	1,35	0,8	66
TS_02	9,3	15,0	78	Franco Arenoso	1,50	0,5	43
TS_03	15,0	21,0	87	Franco Arenoso	1,50	1,0	90
TS_04	12,1	19,3	84	Franco Arenoso	1,50	1,0	108
TS_05	13,0	23,1	97	Franco	1,40	1,0	142
TS_06	10,7	22,7	97	Franco	1,40	1,0	168
TS_07	18,4	20,0	91	Franco-Arenoso	1,40	0,5	11
TS_08	26,8	29,0	107	Franco Limoso	1,35	0,5	15
TS_09	13,6	19,1	83	Franco Arenoso	1,50	0,8	66
TS_10	14,6	16,0	85	Arenoso	1,65	0,5	12
TS_11	18,5	24,4	99	Franco	1,40	1,0	83
TS_12	12,4	20,3	88	Franco Arenoso	1,50	1,0	119
TS_13	14,5	16,1	80	Arenoso	1,65	1,0	26
TS_14	14,2	16,9	86	Franco Arenoso	1,50	1,0	41

<i>Encuesta</i>	<i>Humedad del suelo (%)</i> <i>(g % g de suelo seco)</i>		<i>VS</i> <i>(mL%g)</i>	<i>Textura</i> <i>predominante</i>	<i>PEA</i> <i>(g /cm³)</i> <i>Estimado</i>	<i>Profundidad</i> <i>radical</i> <i>(m)</i>	<i>Lámina</i> <i>reposición</i> <i>(mm)</i>
	<i>Antes</i>	<i>Después</i>					
TS_15	26,9	33,0	103	Franco	1,40	1,0	85
TS_16	15,2	19,9	84	Franco Arenoso	1,50	1,0	71
TS_17	16,2	18,3	85	Franco Arenoso	1,50	0,5	16
TS_18	15,8	17,9	87	Franco Arenoso	1,50	0,5	16
TS_19	5,8	11,4	85	Franco Arenoso	1,50	1,0	84
TS_20	11,6	17,9	86	Franco Arenoso	1,50	0,5	47
TS_21	15,5	20,0	91	Franco Arenoso	1,50	1,0	68
TS_22	7,8	18,4	86	Franco Arenoso	1,50	1,0	159
TS_23	12,0	7,9	83	Arenoso	1,65	1,0	67
TS_24	11,8	14,6	81	Arenoso	1,65	0,8	29
TS_25	18,7	20,3	103	Franco	1,40	1,0	22
TS_26	9,5	13,1	89	Franco Arenoso	1,50	1,0	54
TS_27	26,6	27,2	98	Franco	1,40	1,0	8
TS_28	9,0	16,3	87	Franco Arenoso	1,50	1,0	110
TS_29	15,3	16,3	94	Franco Arenoso	1,50	1,0	15
TS_30	13,4	15,6	91	Fanco Arenoso	1,50	1,0	33
TS_31	11,7	17,5	95	Fanco Arenoso	1,50	1,0	87
TS_32	13,5	16,7	85	Arenosa Fina	1,55	0,5	25
TS_33	9,7	16,0	95	Fanco Arenoso	1,50	1,0	95
TS_34	15,2	19,8	88	Fanco Arenoso	1,50	1,0	69
TS_35	17,1	22,3	98	Franco	1,40	0,5	36
TS_36	27,9	31,0	105	Franco Arcilloso	1,35	1,0	42
TS_37	10	17,4	88	Franco Arenoso	1,50	1,0	111
TS_38	10,7	20,0	92	Franco Arenoso	1,50	0,5	70
TS_39	22,7	24,5	91	Franco Arenoso	1,50	1,0	27
TS_40	13,5	18,0	104	Franco	1,40	1,0	63
TS_41	20,2	23,8	98	Franco	1,40	0,5	26
TS_42	13,5	20,7	102	Franco	1,40	1,0	100
TS_43	12,9	17,3	90	Franco Arenoso	1,50	1,0	66
TS_44	12,9	22,6	98	Franco	1,40	1,0	136
TS_45	8,1	10,4	96	Franco	1,40	1,0	32
TS_46	17,6	20,0	94	Franco Arenoso	1,50	0,5	18
TS_47	45,8	50,2	135	Franco Arcilloso	1,35	0,5	30
TS_48	11,2	12,9	84	Franco Arenoso	1,50	1,0	26

8.5 Parámetros físicos del riego superficial en las propiedades evaluadas

Se detalla: código de encuesta (Encuesta), Números de cuarteles regados y encadenados (N° Cuart.), longitud de cuartel (m), coeficiente de infiltración (A), exponente de infiltración (B), infiltración básica (Ib), coeficiente de la ecuación de avance (p), exponente de la ecuación de avance (r), caudal de manejo (l/s, l/s.m), caudal unitario (l/s, l/s.m), pendiente de riego (m/m), relación del volumen infiltrado respecto al volumen entrado (Vinf/Ven).

Tabla 54: Parámetros físicos del riego superficial en las propiedades evaluadas

Encuesta	N° Cuart,	Long Cuartel (m)	Infiltración			Avance		Caudal		Pendiente (m/m)	Vinf/Ven
			A	B	Ib	p	r	Qm (L/s)	qu (L/s)		
TS_01	1	100	39,63	0,34	16,2	8,62	0,58	49,1	1,64	0,013	100
TS_02	2	140	28,71	0,46	34,8	5,18	0,98	44,0	0,49	0,010	99
TS_03	2	119	19,30	0,44	19,6	4,03	0,99	40,3	1,84	0,006	93
TS_04	2	147	27,06	0,20	2,3	11,21	0,64	38,1	1,41	0,009	47
TS_05	2	115	25,64	0,43	23,2	11,36	0,55	33,5	0,83	0,009	59
TS_06	1	138	22,27	0,21	2,1	9,27	0,57	45,8	0,83	0,001	100
TS_07	1	107	6,78	0,27	1,4	6,78	0,86	30,6	0,96	0,008	15
TS_08	2	77	14,81	0,21	1,5	6,43	0,68	61,7	0,33	0,004	92
TS_09	2	136	24,66	0,21	2,4	4,99	0,97	49,0	1,63	0,014	98
TS_10	3	100	21,73	0,25	3,3	7,25	0,92	56,0	0,36	0,0068	35
TS_11	1	300	17,02	0,22	1,8	15,76	0,91	86,0	8,60	0,0045	41
TS_12	1	143	23,87	0,23	3,0	9,91	0,51	43,0	1,42	0,005	85
TS_13	3	100	19,66	0,32	6,6	4,41	0,73	15,4	0,70	0,023	91
TS_14	2	106	9,66	0,55	25,4	4,78	0,86	56,7	1,67	0,070	65
TS_15	1	150	3,96	0,54	9,4	8,83	0,59	76,5	2,23	0,006	93
TS_16	2	134	1,66	0,61	7,2	1,78	0,93	49,4	0,73	0,001	64
TS_17	2	185	8,66	0,15	0,4	3,40	0,96	40,1	0,41	0,008	94
TS_18	2	118	39,17	0,16	2,0	8,35	0,79	96,0	0,80	0,0106	49
TS_19	1	153	22,96	0,27	4,5	6,87	0,72	108,0	1,25	0,007	67
TS_20	1	141	23,38	0,38	13,3	10,51	0,57	40,5	1,80	0,004	97
TS_21	1	180	18,78	0,21	0,1	9,84	0,57	47,2	1,33	0,008	65
TS_22	1	77	25,86	0,28	0,2	5,06	0,56	53,0	1,20	0,001	100
TS_23	1	90	16,59	0,33	6,1	4,57	0,82	49,3	1,13	0,0038	100
TS_24	2	129	16,66	0,52	33,3	2,60	0,88	55,9	0,42	0,0239	69
TS_25	1	196	13,19	0,27	2,6	7,74	0,79	44,8	1,63	0,003	35
TS_26	2	150	17,13	0,31	4,9	5,35	0,93	32,1	1,48	0,0075	25
TS_27	1	90	20,34	0,24	2,8	5,64	0,59	34,7	1,08	0,0011	100
TS_28	2	130	16,69	0,40	11,7	5,27	0,93	37,3	1,48	0,011	60
TS_29	1	104	56,44	0,23	7,0	6,09	0,72	78,7	0,49	0,0066	27
TS_30	1	90	30,06	0,26	5,3	4,03	0,61	67,1	0,44	0,0044	98

Encuesta	Nº Cuart,	Long Cuartel (m)	Infiltración			Avance		Caudal		Pendiente (m/m)	Vinff/Ven
			A	B	Ib	P	R	Qm	qu		
								(L/s)	(L/s)*m		
TS_31	2	130	15,39	0,42	12,7	5,56	0,94	45,8	2,74	0,0078	50
TS_32	3	108	38,58	0,11	1,0	5,44	0,90	82,2	0,53	0,0116	71
TS_33	2	121	37,70	0,18	2,5	6,89	0,97	34,6	1,66	0,0123	22
TS_34	1	114	23,63	0,25	3,8	3,26	0,87	106,8	3,17	0,0003	100
TS_35	2	143	21,75	0,18	1,5	2,06	0,98	107,3	0,50	0,0035	41
TS_36	1	93,8	33,85	0,21	3,4	2,82	0,72	35,1	0,91	0,0034	100
TS_37	1	77	17,72	0,39	10,8	3,98	0,69	53,4	1,04	0,0101	83
TS_38	1	162,8	11,83	0,50	19,9	5,19	0,66	112,1	0,94	0,004	74
TS_39	1	128	9,88	0,20	0,9	3,27	0,75	30,0	0,95	0,003	68
TS_40	1	117	31,96	0,32	10,3	6,33	0,61	80,7	0,92	0,0075	100
TS_41	1	97	19,55	0,28	4,3	2,60	0,98	51,3	0,25	0,0071	52
TS_42	1	66	21,74	0,31	6,6	6,20	0,54	61,8	0,94	0,0014	99
TS_43	1	61,2	26,35	0,30	6,7	2,20	0,98	18,8	0,45	0,0211	44
TS_44	1	101	15,22	0,30	4,0	1,41	0,92	8,0	0,32	0,0015	35
TS_45	1	57,7	29,60	0,27	5,4	5,61	0,82	44,6	1,32	0,0067	100
TS_46	1	89,7	17,94	0,34	0,3	5,09	0,81	49,9	0,98	0,0015	60
TS_47	1	144,6	26,54	0,28	0,2	9,47	0,49	53,3	0,37	0,0046	75
TS_48	1	155	26,86	0,37	0,5	12,12	0,66	30,0	1,09	0,0375	61

8.6 Eficiencias de riego actuales en las propiedades evaluadas

Se detalla: eficiencia de riego interna (ERI), eficiencia de conducción interna (ECI), eficiencia de aplicación (EAP), eficiencia de almacenaje (EAL), eficiencia de distribución (EDI), eficiencia de distribución absoluta (EDIA), porcentaje de escurrimiento al pie (Ep), porcentaje de percolación profunda (Pp).

Tabla 55: Eficiencias de riego actuales en las propiedades evaluadas

Eficiencia	ERI	ECI	EAP	EAL	EDI	EDIA	Ep	Pp
TS-1	72	93	77	100	83	79	0	0
TS-2	55	85	65	100	87	75	1	56
TS-3	66	92	72	100	84	68	8	1
TS-4	53	84	63	100	96	93	53	0
TS-5	59	93	64	100	96	93	40	4
TS-6	89	93	96	100	98	98	0	0
TS-7	64	85	75	100	87	81	85	9
TS-8	65	84	78	100	88	81	4	18
TS-9	58	95	61	100	74	50	3	36
TS-10	66	91	73	100	86	76	65	29

<i>Eficiencia</i>	<i>ERI</i>	<i>ECI</i>	<i>EAP</i>	<i>EAL</i>	<i>EDI</i>	<i>ED Ia</i>	<i>Ep</i>	<i>Pp</i>
TS-11	58	98	59	100	74	68	59	34
TS-12	62	89	70	100	90	80	15	15
TS-13	55	85	65	100	86	76	10	64
TS-14	56	91	61	100	91	86	34	36
TS-15	59	85	69	100	82	65	7	24
TS-16	61	99	62	100	90	82	36	30
TS-17	62	89	70	100	85	75	6	24
TS-18	60	98	61	100	90	82	51	35
TS-19	61	82	74	99	82	65	31	2
TS-20	54	89	61	99	71	41	4	45
TS-21	57	88	65	98	97	94	34	1
TS-22	68	89	76	100	87	83	0	30
TS-23	66	97	68	100	96	92	0	32
TS-24	62	88	70	99	93	87	31	10
TS-25	63	92	69	95	95	92	65	25
TS-26	52	89	58	100	94	86	75	0
TS-27	84	90	93	100	98	97	0	86
TS-28	59	90	65	100	94	90	40	24
TS-29	59	92	64	100	88	78	73	8
TS-30	62	91	68	100	89	82	0	46
TS-31	58	96	60	100	94	90	50	9
TS-32	60	89	67	100	89	83	30	14
TS-33	53	88	60	99	93	90	78	5
TS-34	81	97	84	100	96	91	0	40
TS-35	59	98	60	100	90	85	59	20
TS-36	69	80	86	100	99	95	0	24
TS-37	59	82	72	100	91	81	19	0
TS-38	60	93	65	100	100	84	26	45
TS-39	68	91	75	100	94	82	31	30
TS-40	52	87	60	100	94	91	0	20
TS-41	65	96	68	100	93	89	48	16
TS-42	73	97	75	100	91	82	3	0
TS-43	51	98	52	100	96	93	58	3
TS-44	50	96	52	98	96	94	66	11
TS-45	78	94	83	100	98	96	0	0
TS-46	58	95	61	100	87	80	42	43
TS-47	51	84	61	100	82	69	25	41
TS-48	56	94	60	95	96	92	40	0

8.7 Eficiencias de riego potenciales de manejo en las propiedades evaluadas

Se detalla: eficiencia de riego interna potencial de manejo (ERI), eficiencia de conducción interna (ECI), eficiencia de aplicación potencial de manejo (EAP), eficiencia de almacenaje potencial de manejo (EAL), eficiencia de distribución potencial de manejo (EDI), eficiencia de distribución absoluta potencial de manejo (EDIA), porcentaje de escurrimiento al pie potencial de manejo (Ep), porcentaje de percolación profunda potencial de manejo (Pp).

Tabla 56: Eficiencias de riego potenciales de manejo en las propiedades evaluadas

<i>Eficiencia</i>	<i>ERI</i>	<i>ECI</i>	<i>EAP</i>	<i>EAL</i>	<i>EDI</i>	<i>EDIA</i>	<i>Ep</i>	<i>Pp</i>
TS-1	72	93	77	100	83	79	0	23
TS-2	55	85	65	100	87	75	13	22
TS-3	66	92	72	100	84	68	8	20
TS-4	53	84	63	100	96	93	37	0
TS-5	59	93	64	100	96	93	33	3
TS-6	89	93	96	100	98	98	0	4
TS-7	64	85	75	100	87	81	7	18
TS-8	65	84	78	100	88	81	4	18
TS-9	58	95	61	100	74	50	3	36
TS-10	66	91	73	100	86	76	8	20
TS-11	58	98	59	100	74	68	0	41
TS-12	62	89	70	100	90	80	15	15
TS-13	55	85	65	100	86	76	12	23
TS-14	56	91	61	100	91	86	22	17
TS-15	59	85	69	100	82	65	7	24
TS-16	61	99	62	100	90	82	24	14
TS-17	62	89	70	100	85	75	6	24
TS-18	60	98	61	100	90	82	16	23
TS-19	61	82	74	99	82	65	1	25
TS-20	54	89	61	99	71	41	9	30
TS-21	57	88	65	98	97	94	34	1
TS-22	68	89	76	100	87	83	0	24
TS-23	66	97	68	100	96	92	0	32
TS-24	62	88	70	99	93	87	28	2
TS-25	63	92	69	95	95	92	30	1
TS-26	52	89	58	100	94	86	32	10
TS-27	84	90	93	100	98	97	0	7
TS-28	59	90	65	100	94	90	31	4
TS-29	59	92	64	100	88	78	16	20
TS-30	62	91	68	100	89	82	0	32
TS-31	58	96	60	100	94	90	32	8
TS-32	60	89	67	100	89	83	23	10
TS-33	53	88	60	99	93	90	37	3
TS-34	81	97	84	100	96	91	0	16
TS-35	59	98	60	100	90	85	27	13
TS-36	69	80	86	100	99	95	0	14

<i>Eficiencia</i>	<i>ERI</i>	<i>ECI</i>	<i>EAP</i>	<i>EAL</i>	<i>EDI</i>	<i>EDLa</i>	<i>Ep</i>	<i>Pp</i>
TS-37	59	82	72	100	91	81	19	9
TS-38	60	93	65	100	100	84	10	25
TS-39	68	91	75	100	94	82	19	6
TS-40	52	87	60	100	94	91	31	9
TS-41	65	96	68	100	93	89	21	11
TS-42	73	97	75	100	91	82	17	8
TS-43	51	98	52	100	96	93	46	2
TS-44	50	96	52	98	96	94	49	0
TS-45	78	94	83	100	98	96	0	17
TS-46	58	95	61	100	87	80	17	22
TS-47	51	84	61	100	82	69	13	27
TS-48	56	94	60	95	96	92	40	0

8.8 Componentes del balance salino que afectan la eficiencia de aplicación potencial

El Tabla 57 detalla: estación meteorológica (SMN), precipitación total efectiva en forma mensual y anual.

Tabla 57 Precipitación total y efectiva de la estación La Consulta y estación San Carlos

<i>Estación La Consulta</i>				<i>Estación San Carlos</i>			
<i>Mes</i>	<i>Probabilidad de ocurrencia (%)</i>			<i>Mes</i>	<i>Probabilidad de ocurrencia (%)</i>		
	20%	50%	80%		20%	50%	80%
<i>enero</i>	92,9	56,0	26,4	<i>enero</i>	92,9	56,0	26,4
<i>febrero</i>	91,3	44,6	17,8	<i>febrero</i>	91,3	44,6	17,8
<i>marzo</i>	55,1	20,4	7,6	<i>marzo</i>	55,1	20,4	7,6
<i>abril</i>	47,3	12,7	4,3	<i>abril</i>	47,3	12,7	4,3
<i>mayo</i>	13,7	5,5	2,1	<i>mayo</i>	13,7	5,5	2,1
<i>junio</i>	33,5	10,9	0,0	<i>junio</i>	33,5	10,9	0,0
<i>julio</i>	49,2	13,9	3,0	<i>julio</i>	49,2	13,9	3,0
<i>agosto</i>	14,7	4,1	1,1	<i>agosto</i>	14,7	4,1	1,1
<i>septiembre</i>	47,3	19,7	6,5	<i>septiembre</i>	47,3	19,7	6,5
<i>octubre</i>	25,0	13,1	7,1	<i>octubre</i>	25,0	13,1	7,1
<i>noviembre</i>	60,2	30,1	11,1	<i>noviembre</i>	60,2	30,1	11,1
<i>diciembre</i>	96,6	63,0	24,1	<i>diciembre</i>	96,6	63,0	24,1
<i>Total</i>	626,7	293,9	111,0	<i>Total</i>	626,7	293,9	111,0
<i>Efectiva</i>	501,4	235,1	88,8	<i>Efectiva</i>	501,4	235,1	88,8

Tabla 58: Evapotranspiración de los cultivos (mm) en la estación meteorológica La Consulta

Prob.	Cultivo/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Demanda m ³ /ha,año	Vol adicional m ³ /ha,año	Demanda Total m ³ /ha,año
20%	Ajo				20,3	15,0	0,0	8,4	31,3	54,6	92,8	71,9		2943	500	3443
	Álamo	117,7	99,6	57,4	20,1	5,1	0,0	0,0	20,4	67,0	141,5	142,8	135,6	8072		8072
	Alfalfa	70,6	61,0	43,7	14,5	5,1	0,0	3,8	40,7	72,1	104,3	94,3	84,7	5948		5948
	Nogal	180,2	146,8	108,6	46,2	15,8	10,5	13,0	22,3	36,5	72,4	124,5	167,6	9444	900	10344
	Duraznero	62,8	50,7	34,3	21,6	5,1	0,0	0,0	15,5	36,5	80,1	85,2	76,2	4680	900	5580
	Olivo	31,4	28,3	25,5	21,1	15,4	0,0	9,2	31,2	43,8	68,9	53,8	42,3	3709	900	4609
	Peral	70,6	56,4	38,0	23,8	5,1	0,0	0,0	16,3	39,4	86,2	93,4	84,7	5139	900	6039
	Tomate	96,4	72,0	19,5									49,9	85,6	3234	500
Vid	31,4	27,8	16,7	7,0	5,1	0,0	0,0	14,1	27,3	58,3	52,6	42,3	2826	900	3726	
50%	Ajo				39,3	26,3	23,1	30,4	43,5	71,4	113,2	95,6		4428	500	4928
	Álamo	153,6	130,4	90,9	45,2	16,4	14,4	19,0	32,6	83,8	161,9	167,3	164,4	10799		10799
	Alfalfa	106,5	91,8	77,2	39,6	16,4	14,4	25,8	52,9	88,9	124,7	118,8	113,5	8705		8705
	Nogal	194,4	150,0	118,1	50,4	17,9	12,6	14,1	26,0	40,5	76,0	129,5	180,2	10097	900	10997
	Duraznero	98,7	81,5	67,9	46,7	16,4	14,4	19,0	27,7	53,4	100,5	109,7	105,0	7409	900	8309
	Olivo	67,3	59,1	59,1	46,2	26,7	23,4	31,3	43,3	60,6	89,3	78,3	71,1	6557	900	7457
	Peral	106,5	87,2	71,6	48,9	16,4	14,4	19,0	28,5	56,3	106,5	117,9	113,5	7867	900	8767
	Tomate	132,1	102,6	41,9									74,9	115,6	4671	500
Vid	67,3	58,6	50,3	32,1	16,4	14,4	19,0	26,3	44,1	78,6	77,1	71,1	5553,4	900	6453,4	
80%	Ajo				39,3	26,3	23,1	30,4	49,0	83,2	120,0	122,2		4935	500	5435
	Álamo	176,6	152,5	100,3	45,2	16,4	14,4	19,0	38,1	95,6	168,8	195,0	192,2	12141		12141
	Alfalfa	129,6	113,9	86,6	39,6	16,4	14,4	25,8	58,4	100,6	131,6	146,4	141,4	10047		10047
	Nogal	205,0	153,2	124,5	54,6	18,9	14,7	15,2	28,5	44,6	79,5	137,0	189,7	10654	900	11554
	Duraznero	121,7	103,6	77,2	46,7	16,4	14,4	19,0	33,2	65,1	107,3	137,3	132,9	8748	900	9648
	Olivo	90,4	81,2	68,4	46,2	26,7	23,4	31,3	48,9	72,3	96,1	106,0	99,0	7899	900	8799
	Peral	129,6	109,3	80,9	48,9	16,4	14,4	19,0	34,0	68,0	113,4	145,6	141,4	9209	900	10109
	Tomate	155,1	124,0	48,2									103,7	142,5	5735	500
Vid	90,4	80,8	59,6	32,1	16,4	14,4	19,0	31,8	55,8	85,5	104,8	99,0	6896	900	7796	

Tabla 59: Evapotranspiración de los cultivos (mm) en la estación meteorológica San Carlos

Prob,	Cultivo/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Demanda m ³ /ha,año	Vol adicional m ³ /ha,año	Demanda Total m ³ /ha,año
20%	Ajo				20,5	15,8	0,0	15,3	34,2	50,8	95,4	83,0		3150	500	3650
	Orégano	115,0	92,1	70,5	40,3	22,5	15,0	18,6	32,9	54,0	89,3	109,2	117,2	7766	900	8666
	Álamo	116,9	89,2	52,6	19,9	5,5	0,0	3,7	22,9	63,9	147,1	158,0	148,3	8280		8280
	Alfalfa	65,9	46,9	37,5	13,7	5,5	0,0	10,6	44,0	69,2	107,7	106,8	94,9	6027		6027
	Duraznero	57,5	35,6	27,2	21,4	5,5	0,0	3,7	17,8	31,7	82,0	97,2	86,0	4656	900	5556
	Olivo	23,5	11,0	17,6	20,9	16,3	0,0	16,1	34,1	39,4	70,1	64,2	50,4	3636	900	4536
	Peral	65,9	41,8	31,3	23,8	5,5	0,0	3,7	18,6	34,8	88,4	105,9	94,9	5146	900	6046
	Tomate	91,8	59,3	14,2									60,5	95,1	3209	500
Vid	23,5	10,5	7,8	5,5	5,5	0,0	3,7	16,4	22,0	58,8	62,9	50,4	2670	900	3570	
50%	Ajo				42,7	27,4	23,1	30,8	43,3	74,0	118,7	112,1		4721	500	5221
	Orégano	121,5	96,0	74,6	42,0	25,5	18,0	21,7	36,1	57,6	93,5	115,5	128,0	8300,56	900	9201
	Álamo	161,7	132,2	90,2	49,3	17,2	14,4	19,2	32,0	87,1	170,4	188,4	184,7	11468		11468
	Alfalfa	110,8	89,9	75,1	43,2	17,2	14,4	26,1	53,1	92,4	130,9	137,2	131,3	9216		9216
	Duraznero	102,3	78,6	64,8	50,9	17,2	14,4	19,2	26,9	54,9	105,2	127,6	122,4	7844	900	8744
	Olivo	68,4	54,0	55,1	50,4	27,9	23,5	31,6	43,2	62,5	93,4	94,6	86,8	6914	900	7814
	Peral	110,8	84,8	68,9	53,3	17,2	14,4	19,2	27,7	57,9	111,6	136,3	131,3	8334	900	9234
	Tomate	137,4	101,3	38,3									93,0	131,8	5018	500
Vid	68,4	53,5	45,4	35,0	17,2	14,4	19,2	25,5	45,1	82,1	93,2	86,8	5858	900	6758	
80%	Ajo				42,7	27,4	23,1	30,8	50,9	87,8	127,3	136,0		5260	500	5760
	Orégano	128,0	100,0	80,6	45,4	28,5	19,5	24,8	39,4	61,2	97,6	121,8	136,7	8835	900	9735
	Álamo	200,4	163,5	110,5	49,3	17,2	14,4	19,2	39,6	101,0	179,0	213,2	213,6	13209		13209
	Alfalfa	149,5	121,2	95,4	43,2	17,2	14,4	26,1	60,7	106,3	139,5	162,0	160,2	10957		10957
	Duraznero	141,0	109,9	85,1	50,9	17,2	14,4	19,2	34,5	68,8	113,8	152,5	151,3	9586	900	10486
	Olivo	107,1	85,3	75,4	50,4	27,9	23,5	31,6	50,8	76,4	102,0	119,4	115,7	8655	900	9555
	Peral	149,5	116,1	89,2	53,3	17,2	14,4	19,2	35,3	71,8	120,2	161,1	160,2	10075	900	10975
	Tomate	177,7	131,7	53,1									119,3	160,1	6419	500
Vid	107,0	84,8	65,7	35,0	17,2	14,4	19,2	33,1	59,0	90,7	118,0	115,6	7597	900	8497	

Tabla 60: Profundidad de suelo explorado por las raíces de los cultivos

<i>Cultivo</i>	<i>Profundidad radical (m)</i>
Vid	1,0
Duraznero	1,0
Peral	1,0
Manzana	1,0
Nogal	1,0
Tomate	0,5
Ajo	0,5
Alfalfa	1,3
Orégano	0,5
Alfalfa	1,3
Alamo	1,0
Espacios Verdes	0,5

Tabla 61: Conductividad eléctrica del estrato de saturación del suelo y conductividad eléctrica del agua superficial, según zona de manejo del río Tunuyán Superior (Schilardi et al, 2010)

<i>Zona de Manejo</i>	<i>CEagua (dS m-1)</i>	<i>CEes (dS m-1)</i>
Norte	0,491	0,981
Centro Norte	0,805	1,344
Centro Sur	1,023	1,288
Sur	0,307	0,669

Tabla 62: Eficiencia de lavado y capacidad de campo según textura de suelo

<i>Textura</i>	<i>Eficiencia de lavado</i>	<i>Wc (g%g)***</i>
Arenoso	0,65*	9
Franco Arenoso	0,60**	14
Franco	0,55**	22
Franco Limoso	0,50**	27
Franco Arcilloso	0,45*	31

*estimado; ** Van Der Molen, 1983; *** Chambouleyron, 2005

Tabla 63: Célula de cultivo por zona de manejo del río Tunuyán Superior, y conductividad eléctrica del extracto de saturación conducente a una producción del 90 y 100% según Pizarro (1996) y de 100% según Vallone y Nijensohn (2002) por cultivo.

<i>Cultivo</i>	<i>Zona de Manejo</i>				<i>CEes (dS m-1)</i>		
					<i>Mass-Hoffman</i>		<i>Nijensohn</i>
	<i>Norte</i>	<i>Centro Norte</i>	<i>Centro sur</i>	<i>Sur</i>	<i>90%</i>	<i>100%</i>	<i>100%</i>
Vid	0,53	0,28	0,50	0,18	2,5	1,5	3,5
Frutales	0,38	0,41	0,23	0,31	2,3	1,7	3,5
Hortalizas	0,07	0,17	0,10	0,34	2,6	1,9	3,1
Pasturas	0,02	0,00	0,02	0,10	3,4	2,0	4,0
Forestales	0,01	0,14	0,16	0,08	2,0	1,5	3,5