



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR

TESIS DE DOCTOR EN AGRONOMIA

METODOLOGIA PARA OPTIMIZAR EL MANEJO DE UN DISTRITO DE RIEGO,
APLICABLE AL ALTO VALLE DE RIO NEGRO

GABRIELA M. POLLA

BAHIA BLANCA

ARGENTINA

2017

PREFACIO

Esta Tesis se presenta como parte de los requisitos para optar al grado Académico de Doctor en Agronomía, de la Universidad Nacional del Sur y no ha sido presentada previamente para la obtención de otro título en esta Universidad u otra. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el ámbito del Departamento de Agronomía durante el período comprendido entre el 4 de abril de 2013 y el 28 de setiembre del 2017, bajo la dirección del Dr. Federico E. Horne y la Co-dirección del Lic. Juan Darío Paoloni

El Director es Profesor Titular de la Cátedra de Hidráulica e Hidrología Agrícola de la Universidad Nacional del Comahue.

[Firma del Alumno]



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SUR
Secretaría General de Posgrado y Educación Continua

La presente tesis ha sido aprobada el/....../..... , mercedo la calificación de(.....)

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi especial agradecimiento al Dr. Federico Horne y al Lic. Juan Darío Paoloni, por sus invaluable aportes, acertadas y objetivas observaciones y permanentes estímulos para la culminación de esta Tesis.

A la Secretaría de Políticas Universitarias por haberme otorgado la beca Doctorar Agronomía, instrumento que permitió el financiamiento de las instancias académicas requeridas y el desarrollo de las actividades de esta Tesis.

Al Distrito de Riego de Cipolletti, en especial a Nancy Miguelisse, por la información aportada, por compartir su visión técnica del Distrito y su permanente colaboración.

A la Lic. Ayelen Montenegro por ser una compañera incondicional en las tareas de campo realizadas, y en el aprendizaje de nuevas herramientas aplicadas en este trabajo.

Al INTA Alto Valle, a través de la Ing. Agr. Lucia Mañueco, por brindarnos su instalaciones y colaboración para realizar algunos de los ensayos de riego programados.

A mis compañeros de la FCA por su aliento y por hacer mi lugar de trabajo un espacio fundamental para el desarrollo de esta ardua tarea.

A la Ing. Patricia Villarreal por su asesoramiento en los aspectos económicos relacionados con esta Tesis.

A los alumnos de la Facultad de Ciencias Agrarias por su colaboración en la realización de los distintos ensayos y tareas de campo.

A los productores por su predisposición y voluntad de poner a disposición sus chacras para realizar los ensayos.

A mi familia, que a pesar de la distancia, estuvieron presentes con un mensaje de aliento permanente.

A Daniel, por su paciencia y comprensión del tiempo resignado. A Victoria y Lautaro motor y motivación de mi vida.....

RESUMEN

El Distrito de Riego de Cipolletti (38° 56' latitud Sur y 68° 00' longitud Oeste), forma parte del Alto Valle del Río Negro, extensa zona de agricultura bajo riego. El proyecto de riego del Alto Valle se inicia en el año 1898 a cargo del Ing. Cipolletti. La conducción troncal del agua para el riego sirve 60000 has, que se extiende desde Barda del Medio hasta Chichinales (120 km). A partir del año 1992 se concreta el traspaso de los sistemas de riego administrados por la Nación a través de Agua y Energía Eléctrica (AyEE) a las provincias, a través del Departamento Provincial de Aguas. En una segunda etapa se produce el traspaso de los distritos de riego a los productores organizados en asociaciones de regantes denominados Consorcios de Riego y Drenaje. Como consecuencia de estos cambios, los problemas heredados de la anterior administración (AyEE) aun persisten: no se ha racionalizado la red de canales de menor orden, no se cuenta con estructuras de aforo que permitan una distribución equitativa del agua riego sumado a las bajas eficiencias de aplicación, entre algunos de los problemas principales (Requena et al., 2011).

El objetivo de la presente Tesis fue desarrollar una metodología que permita optimizar el uso del agua a nivel de distrito y facilitar así el manejo a los encargados del mismo.

Para diagnosticar el funcionamiento del Distrito se realizaron evaluaciones de distribución en los canales terciarios, a nivel de predio y en parcela. Se implementó un Sistema de Información Geográfica (SIG) donde se ingresó información de propietarios, parcelas, canales, turnados de riego, para que el Distrito centralice toda la información existente. Asimismo se pudieron construir gráficos de consumo de agua para distintos canales, hectáreas de cada uno de los cultivos existentes, consumo en m³ por canal de riego, etc. Posteriormente se aplicó un modelo de simulación en flujo no saturado (HYDRUS-1) que permitió comprender la interrelación de las variables y la interacción de los distintos procesos en la zona de raíces. Además de analizar distintas propuestas de manejo para las problemáticas identificadas en el Distrito, como presencia de capa freática poco profunda, salinidad y/o aplicación de dosis de riego en exceso. Finalmente se utilizó un programa de optimización matemática que permitió analizar la combinación de cultivos que producen el máximo margen bruto incluyendo en el análisis limitaciones físicas tales como salinidad, profundidad de la capa freática y ocurrencia de heladas.

Se identificaron eficiencias de aplicación muy bajas, entre 20 y 30 %. Dentro de las propuestas de manejo analizadas se simularon distintos escenarios donde se aplicaba riego controlado sin estrés en distintos períodos del cultivo, eligiendo la alternativa que resultaba más eficiente. En relación a zonas con capa freática poco profunda el modelo permitió analizar la construcción de un dren parcelario con una reprogramación posterior del momento y las láminas de riego aplicadas. Los resultados más significativos del modelo de optimización

determinaron a la salinidad como una de las limitaciones físicas que más influía sobre los márgenes brutos.

ABSTRACT

The Irrigation District of Cipolletti (38° 56 'South latitude and 68° 00' West longitude), is part of the Alto Valle del Río Negro, an extensive area of agriculture under irrigation. The project of irrigation of the Alto Valle begins in the year 1898, in charge of Ing. Cipolletti, The trunk of water for irrigation can be use for 60000 has, which extends from Barda del Medio to Chichinales (120 km). Since 1992, the irrigation systems administered by the Nation through Water and Electric Power (AyEE) are transferred to the provinces, through the Provincial Water Department. In a second stage, the irrigation districts are transferred to the producers who were organized in associations of irrigators called Consortiums of Irrigation and Drainage. As a consequence of these changes, the problems inherited from the previous administration (AyEE) still persist: the network of lesser order channels has not been rationalized, there are no gauging structures that allow an even distribution of irrigation water added to the low efficiency of implementation, are some of the main problems (Requena et al., 2011).

The objective of the present thesis was to develop a methodology that allows to optimize the use of water at the district level and thus facilitate the management of water managers.

In order to diagnose the operation of the District, distribution evaluations were carried out in the tertiary channels, at the farm level. A Geographic Information System (GIS) was implemented, where information from owners, plots, channels, irrigation turns were incorporated so the District could condense all existing information. Also graphs of water consumption could be constructed for different channels, hectares of each of the existing crops, consumption in m³ per irrigation channel, etc. Subsequently, an unsaturated flow simulation model (HYDRUS-1) was applied to understand the interrelationship of the variables and the interaction of the different processes in the root zone. In addition to analyzing different management proposals for the problems identified in the District as presence of shallow water table, salinity and / or application of excessive irrigation doses. Finally, a mathematical optimization program was used to analyze the combination of crops that produce the maximum gross margin including in the analysis physical limitations such as salinity, water table depth and frost occurrence.

They were identified very low application efficiencies between 20 and 30%. Within the management proposals analyzed, different scenarios were simulated where the irrigation deficit was applied in different periods of the crop, choosing the one that was more efficient. In relation to areas with shallow water table, the model allowed to analyze the construction of a parcel drainage with a later reprogramming of the moment and the irrigation slides applied. The most significant results of the optimization model determined that

salinity as one of the physical limitations that most influenced gross margins.

Certifico que fueron incluidos los cambios y correcciones sugeridas por los jurados.

Firma del Director

INDICE DE CONTENIDOS

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLA

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL, HIPÓTESIS Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1. Introducción	1
1.2. Área de Estudio	2
1.3. Hipótesis.....	7
1.4. Objetivos	7
1.5. Secuencia Metodológica	8
1.6. Resultados Esperados	8
1.7. Contenido de la Tesis	9

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Evaluación de riego	1
2.2. Sistemas de Información Geográfica	5
2.3. Tipos de modelos de simulación aplicados a la zona no saturada. Modelos que lo explican.	8
2.4. Modelo de Optimización	18
2.5. Revisión de trabajos regionales	21

CAPÍTULO 3: SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

3.1. Introducción	1
3.2. Materiales y Métodos	1
3.2.1. ADOR-Características Principales	2
3.2.2. Datos de ingreso	3
3.3. Resultados	5
3.3.1. Resultados en pantalla	5
3.3.2. Listado de Planillas y gráficos	15
3.4. Discusión	16

CAPÍTULO 4: EVALUACIONES EN EL DISTRITO DE RIEGO

4.1. Introducción	1
4.2. Materiales y Métodos	2
4.2.1. Determinación de eficiencias	2
4.2.1.1 Eficiencia de distribución en los canales del sistema de riego.....	2
4.2.1.2 Eficiencia de aplicación a nivel predio.....	3
4.2.1.3. Eficiencia de aplicación, almacenaje y distribución a nivel de parcela sin desagüe al pie.....	4
4.2.2. Calibración de las compuertas del distrito	8
4.3. Resultados	9
4.3.1. Eficiencia de distribución.....	9
4.3.2. Eficiencia de aplicación a nivel global.....	12
4.3.3. Eficiencia de aplicación, almacenaje y distribución a nivel de parcelas – melgas niveladas sin desagüe al pie.....	14
4.3.4. Calibración de compuertas.	24

4.4. Discusión	27
----------------------	----

Capítulo 5: Modelo de Simulación

5.1. Introducción	1
5.2. Conceptos teóricos- modelos de simulación: Winsareg e HYDRUS-1.....	2
Modelo Winsareg	2
Modelo HYDRUS-1.....	5
Curva de retención.....	7
Absorción de agua de la raíz	12
Captación de agua de la raíz sin compensación.....	12
Modelación de la absorción por parte de las raíces	15
Condiciones iniciales	16
Condiciones de borde	16
Ecuación adicional.....	17
Coefficiente de dispersión.....	17
5.3. Materiales y Métodos	18
5.3.1. Relevamiento de datos.....	18
5.3.1.1. Datos sitio 1	18
5.3.1.2. Datos sitio 2 y 3	19
5.3.2. Calibración del modelo HYDRUS-1	24
5.4. Resultados	26
5.4.1. Comparación de los modelos de balance hídrico y modelo dinámico-Sitio 1	26
5.4.2. Situaciones críticas identificadas en el distrito-sitio 2 y 3	31
5.4.2.1. Análisis sitio 2.....	33
5.4.2.1.1. Diagnóstico de situación- sitio 2	33
5.4.2.1.2. Manejo y programación del riego-sitio 2.....	35
5.4.2.2. Análisis sitio 3.....	42
5.4.2.2.1. Diagnóstico de situación- sitio 3.....	42
5.4.2.2.2. Manejo y programación del riego-sitio 3.....	43
5.4.3. Análisis del efecto de las concentraciones salinas al cabo de 20 años.....	48
5.5. Discusión	53

CAPITULO 6: MODELO DE OPTIMIZACIÓN

6.1. Introducción	1
6.2. Materiales y Métodos	1
6.2.1. Programación Lineal.....	2
6.2.2. Optimización lineal – sin influencia de componentes físicos.....	5
6.2.3. Optimización lineal – con influencia de componentes físicos	14
6.3. Resultados	22
6.4. Discusión	24

CAPITULO 7: PAGINA WEB

CAPITULO 8:CONCLUSIONES

CAPITULO 9: BIBLIOGRAFÍA

ANEXO 1

ANEXO 2

ANEXO 3

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1: Introducción General, Hipótesis y objetivos del estudio

Figura 1: Plano Argentina-Provincia de Río Negro.....	4
Figura 2: Área de estudio: Distrito de riego de Cipolletti – Alto Valle de Río Negro	4

Capítulo 3: Sistemas de Información Geográfica

Figura 1: Datos de la Comunidad de Regantes	6
Figura 2: Coordenadas estación meteorológica.....	6
Figura 3: Pantalla usuarios	7
Figura 4: Listado de Usuarios de la Comunidad de Regantes	7
Figura 5: Información de cada parcela de la Comunidad de Regantes.....	8
Figura 6: Tabla de parcelas de la Comunidad de Regantes.....	8
Figura 7: Información usos de las parcelas	9
Figura 8: Dimensiones de las melgas	9
Figura 9: Características del suelo de la parcela	10
Figura 10: Esquema distribución red de riego	10
Figura 11: Pantalla para ingresar los datos del mantenimiento de cada elemento de la red	11
Figura 12: Hidrante y parcela asociadas.....	11
Figura 13: Pantalla de asignación de las parcelas al hidrante.....	12
Figura 14: Unidades de Gestión	12
Figura 15 Asignación de riego a los propietarios de la Comunidad de Regantes}.....	13
Figura 16: Datos del cultivo de Manzano.....	13
Figura 17: Datos del cultivo de Peral.....	14
Figura 18: Datos del cultivo de Vid.....	14

Capítulo 4: Evaluaciones en el Distrito de Riego

Figura 1: Sección hidráulica definida para el cálculo del caudal circulante	3
Figura 2: Calibración de compuerta	8
Figura 3: Ubicación de canales donde se determinó la eficiencia de distribución	10
Figura 4: Curva de avance ensayo 1	17
Figura 5: Curva de avance ensayo 2	22

Capítulo 5: Modelo de Simulación

Figura 1: Curva de retención	8
Figura 2: Esquemas de la función de respuesta al estrés hídrico, $\alpha(h)$, a) Feddes, R.A. et al.(1978) y b) van Genuchten, M.(1987).Fuente Manual HYDRUS-1	14
Figura 3 :Ubicación de los sitios de muestreo.....	20
Figura 4: Evolución de la humedad del suelo en la zona de la rizósfera – 40 cm	27
Figura 5: Evolución de la humedad del suelo en la zona de la rizósfera – 60 cm	27
Figura 6 :Evapotranspiración potencial-sitio 1.....	29
Figura 7 :Evapotranspiración real-sitio 1.....	29
Figura 8: Infiltración acumulada-sitio 1	29
Figura 9 : Flujo acumulado fondo del perfil-sitio 1	29
Figura 10: Evapotranspiración Potencial y Real-sitio 2	34
Figura 11: Tensiones en la zona de raíces-sitio 2.....	35
Figura 12: Programación de riego para el sitio 2 mediante programa CROPWAT.....	37

Figura 13: Tension en zona de raíces-CROPWAT	38
Figura 14: Tensión en la zona de raíces-Simulación 1	38
Figura 15: Tensión en zona de raíces-Simulación 2	38
Figura 16: Tensión en zona de raíces-Simulación 3	39
Figura 17: Tensión en zona de raíces-Simulación 3 suelo limoso	40
Figura 18: Tensión en la zona de raíces (frecuencia de riegos 6 durante el período)-sitio 2	41
Figura 19: Evapotranspiración potencial y real-sitio 3	42
Figura 20: Tensión en la zona de raíces-sitio 3	42
Figura 21: Percolación a través del fondo del perfil-sitio 3.....	43
Figura 22: Tensión en la zona de raíces. Instalación de un sistema de drenaje sin riego-sitio 3....	45
Figura 23: Evapotranspiración potencial acumulada-sditio 3	47
Figura 24: Evapotranspiración real acumulada-sitio 3	47
Figura 25: Tensión en la zona de raíces-sitio 3	47
Figura 26: Flujo a través del fondo del perfil-sitio 3.....	47
Figura 27: Tensión en la zona de raíces-sitio 3	48
Figura 28: Concentración salina en la zona de raíces CE inicial del suelo 0.1 dS/m-sitio 2	49
Figura 29: Concentración salina en la zona de raíces CE inicial del suelo 3 dS/m-sitio 2	50
Figura 30: Concentración salina en la zona de raíces CE inicial del suelo 0.1 dS/m-sitio 3	51
Figura 31: Concentración salina en la zona de raíces CE inicial del suelo 3 dS/ms 3.....	51
Figura 32: Concentración salina en la zona de raíces CE del agua de riego 3 dS/m-sitio 3	52
Figura 33: Concentración salina en la zona de raíces CE de la Napa freática de 3 dS/m-sitio 3.....	53

Capítulo 6: Modelo de Optimización

Figura 1: Producción relativa manzana, peral y cereza.....	19
Figura 2: Producción relativa de vid.....	19
Figura 3: Producción relativa lechuga y zapallo	19
Figura 4: Producción relativa de vid.....	19

Capítulo 7: Pagina web Distrito de Cipolletti

Figura 1: Página Principal	2
Figura 2: Datos meteorológicos	3
Figura 3: Actividades del Distrito	3
Figura 4: Cursos de Capacitación	4
Figura 5: Contacto y Ubicación del Distrito.....	4

ANEXO 2

Figura 1: Curva de calibración Watermark 1
Figura 2: Curva de calibración Watermark 2
Figura 3: Curva de calibración Watermark 3
Figura 4: Curva de calibración Watermark 4
Figura 5: Curva de calibración Sensor estación 1
Figura 6: Curva de calibración Sensor estación 2

ANEXO 3

Figura 1: Esquema de la red de riego del Distrito de Cipolletti.
Figura 2: Listado de paraje, parcelas y usos.
Figura 3: Listado de consumo por unidad de riego.
Figura 4: Listado por cultivo y superficie asignada a cada uno.
Figura 5: Listado de peticiones por propietario en el momento del riego.

Figura 6: Gráfico de barra de superficie regable por cultivo.

Figura 7: Gráfico de barra de superficie regable por hidrante.

Figura 8: Grafico de torta de superficie regable por hidrante

INDICE DE TABLAS

Capítulo 1: Introducción General, Hipótesis y objetivos del estudio

Tabla 1: Características Consorcios de Riego Alto Valle. Datos suministrados por el Departamento Provincial de Aguas de Río Negro.....	5
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---

Capítulo 4: Evaluaciones en el Distrito de Riego

Tabla 1: Ejemplo de calculo de una evaluación de riego en parcela sin desagüe al pie	6
Tabla 2: Determinación de la eficiencia de distribución en los canales terciarios y cuaternarios..	11
Tabla 3: Parámetros de Kostiakov ensayo 1	14
Tabla 4: Curva de avance ensayo 1	16
Tabla 5: Curva de receso ensayo 1	17
Tabla 6: Láminas almacenada, infiltrada, y percolada ensayo 1.....	18
Tabla 7: Determinación evaluaciones de riego ensayo 1.....	19
Tabla 8 : Parámetros de Kostiakov ensayo 2.....	20
Tabla 9: Curva de avance y receso ensayo 2.....	21
Tabla 10: Láminas almacenada, infiltrada, y percolada ensayo 2.....	23
Tabla 11: Determinación de las eficiencias de riego ensayo 2.....	24
Tabla 12: Determinación coeficientes de descarga compuertas calibradas.....	25
Tabla 13: Resumen eficiencias globales, de aplicación, almacenamiento y distribución	30
Tabla 14: Problemas que presenta el Distrito y posibles soluciones	32

Capítulo 5: Modelo de Simulación

Tabla 1: Síntesis de ecuaciones usadas para calcular los flujos de agua subterránea y sus respectivos parámetros (Liu et al., 2006).....	4
Tabla 2: Valores ajustados de los parámetros del suelo en sitio 2 y 3.....	25
Tabla 3: Errores del obtenidos en la calibración sitio 1 y 2.....	26
Tabla 4: Comparación de resultados entre modelo Winlsareg e HYDRUS-1	30
Tabla 5: Profundidades freáticas en los Distritos de riego en los meses de julio y noviembre. Fuente "Análisis y Elaboración de datos freáticos e hidroquímicos del Alto Valle de Río Negro". ITAC (1995)	32
Tabla 6: Estados fenológicos del cultivo-Pera Williams	36
Tabla 7: Escenarios simulados con el modelo HYDRUS-1	37
Tabla 8: Resultados obtenidos para los distintos escenarios-sitio 2.....	39
Tabla 9: Valores de los coeficientes de cultivo ajustados.....	40
Tabla 10: Programación de riegos posterior al sistema de drenaje-sitio 3.....	46

Capítulo 6: Modelo de Optimización

Tabla 1: Dotación de los cultivos.....	7
Tabla 2: Fertilizantes aplicados a cada cultivo	7
Tabla 3: Pesticidas utilizados en cada cultivo.....	8
Tabla 4: Costos por componente de cada cultivo, precios febrero 2016	9
Tabla 5: Mano de obra utilizada para cada cultivo	11
Tabla 6: Horas de maquinaria utilizada en cada cultivo.....	11
Tabla 7: Calculo de amortizaciones.....	12
Tabla 8: Determinación de intereses	13
Tabla 9: Costos totales de cada cultivo	13
Tabla 10: Beneficio obtenido para cada cultivo.....	14

Tabla 11: Máxima profundidad radicular (Fuente: Nolting, J. (1976)).....	16
Tabla 12: Zona radicular típica, que contribuye con la mayor parte del agua aprovechable.(Adaptado con modificaciones, Grassi, C. 1976).....	16
Tabla 13: Productividad relativa para diferentes profundidades de nivel freático y diferentes cultivos	17
Tabla 14: Grado de tolerancia a las sales según los cultivos para distintos porcentajes de decremento de la productividad (Fuente: Ayers y Westcot, 1976).....	18
Tabla 15: Porcentaje de producción, para distintos cultivos, según valores de concentración del extracto de saturación (CE_e) extraídos de Tabla 14	19
Tabla 16: Funciones de producción relativa para cada cultivo, en función de la conductividad del extracto de saturación	20
Tabla 17: Disminución de rendimiento por efecto de heladas	22
Tabla 18 Productividad relativa (%) para cada cultivo $CE_e = 10 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	23
Tabla 19: Productividad relativa (%) para cada cultivo, $CE_e = 7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	23
Tabla 20: Productividad relativa (%) para cada cultivo, $CE_e = 4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$	23

ANEXO 1

Tabla 1: Mediciones de humedad a 40 y 60 cm sitio 1.
Tabla 2: Características físicas del suelo sitio 1.
Tabla 3: Coeficiente de cultivo sitio 1
Tabla 4: Características del perfil del suelo. Sitio 1
Tabla 5: Curva de retención sitio 2.
Tabla 6: Valores propuestos por Feddes para frutales de hojas caedizas sitio 2
Tabla 7: Valores de humedad registradas en los sensores sitio 2.
Tabla 8: Curva de retención sitio 3.
Tabla 9: Características edáficas del perfil sitio 3.
Tabla 10: Valores propuestos por Feddes para frutales de hojas caedizas sitio 3.
Tabla 11: Registros de humedad de suelo a 30 y 60 cm sitio 3.

ANEXO 2

Tabla 1: Datos obtenidos de los sensores watermark
Tabla 2: Datos Sensores de humedad estación meteorológica

CAPITULO 1

INTRODUCCION GENERAL, HIPOTESIS Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.1. INTRODUCCION

El Alto Valle de Río Negro es una extensa zona de agricultura bajo riego ubicado en el extremo oeste de la provincia de Río Negro con una superficie cercana a los 50.000 km².

Los ríos Limay y Neuquén, de cuya confluencia nace el río Negro, son los auténticos motores del desarrollo regional con caudales módulo de 650 y 320 m³*s⁻¹ respectivamente, que se utilizan para irrigar a través de un extenso sistema de canales, una superficie de casi 100.000 hectáreas correspondientes al Alto Valle de Río Negro y Neuquén.

A partir del año 1992 se concreta el traspaso de los sistemas de riego administrados por la Nación a través de Agua y Energía Eléctrica (AyEE) a las provincias. En el caso particular de Río Negro la administración queda a cargo, en una primera etapa, del Departamento Provincial de Aguas. En una segunda etapa se produce el traspaso de los distritos de riego a los productores organizados en asociaciones de regantes denominados Consorcios de Riego y Drenaje. Como consecuencia de estos cambios, los problemas heredados de la anterior administración (AyEE) aún persisten sin solución: no se ha racionalizado la red de canales de menor orden (comuneros) ya sea en la relación longitud/hectárea como en el redimensionamiento de las secciones de turnado. Por otra parte, tampoco se cuenta con estructuras de aforo que permitan una distribución equitativa del agua de riego sumado a las bajas eficiencias de aplicación, entre algunos de los problemas principales (Requena et al., 2011).

Los sistemas agrícolas se caracterizan por la interdependencia y complejidad de sus componentes, y por la variabilidad y riesgo asociado a su manejo. Los agricultores actualmente están afrontando presiones económicas y medioambientales, fluctuaciones de ingresos año tras año debidas a las variaciones en las condiciones climáticas, y cambios en los precios y mercados. El uso de fertilizantes químicos y productos fitosanitarios son una parte esencial de una explotación moderna: representan buena parte de los costos de producción y son el principal objetivo de la crítica medioambiental (Ortega et al., 1999).

El desconocimiento de los requerimientos reales de agua para los cultivos, la falta de estaciones que registren el comportamiento del clima en tiempo real, la casi inexistencia de estudios de suelos y escala fenológica de las especies cultivadas y la ausencia de asistencia técnica sobre la agronomía del riego, han llevado a un uso indiscriminado del agua, con niveles excesivamente bajos de eficiencia de aplicación (Castro Franco et al., 2009).

De esta manera, la toma de decisiones ha pasado de la planeación global que abarcaba un distrito de riego, a la particular donde el módulo de riego es el responsable de administrar el recurso agua (Mejía Saénz et al., 2002).

En muchos países del mundo, hay una creciente preocupación por el funcionamiento de los sistemas de riego, dado que muchas áreas no están produciendo los rendimientos esperados, o sufren restricciones de abastecimiento de agua y/o problemas de calidad del agua (Malano et al., 1999).

Varios autores han señalado la importancia de mejorar la calidad de los servicios de los distritos de riego. Clemmens y Freeman (1987) analizaron cómo los distritos de riego influyen en el rendimiento de un proyecto de riego, teniendo en cuenta la importancia del flujo de información bidireccional entre el distrito y sus agricultores. Dedrick et al. (1989) propusieron el concepto del Programa de Mejoramiento de la Gestión como un procedimiento para desarrollar las capacidades de gestión y hacer cumplir las políticas de conservación del agua en un distrito de riego.

Se han desarrollado diferentes manuales para ayudar en la gestión de los sistemas de riego (FAO 39, 1982 y Skogerboe y Merkley, 1996), en los cuales se establecieron los conceptos para la gestión de estas instalaciones, y describieron la planificación, operatividad, mantenimiento, administración, monitoreo y evaluación de las actividades y procedimientos. Sin embargo, la aplicación de conceptos de “gestión apropiada” y sus procedimientos no siempre son sencillos en la práctica. Varios sistemas de soporte de decisiones para la planificación de proyectos de riego han sido reportados en la literatura (Chávez-Morales et al., 1992), (Prajamwong et al., 1997) y (Kuo et al., 2000). Suryavanshi y Reddy (1986) utilizaron la programación lineal para determinar los parámetros óptimos de operación.

1.2.ÁREA DE ESTUDIO

El Alto Valle de Río Negro representa un área muy extensa que abarca los valles aluviales superiores del río Negro, formando una faja angosta de 130 Km de largo y ancho variable entre 2 a 12 Km. Esta área productiva comprende unas cien mil hectáreas de las cuales el 60% está bajo riego.

El avance del ferrocarril en el Alto Valle, la destrucción originada por la inundación del año 1889, así como las dificultades surgidas en la operación y administración de los canales existentes, motivaron a las autoridades nacionales a concretar las grandes obras de irrigación del Alto Valle.

Se construyó el Dique Ballester sobre el Río Neuquén y una red de canales incorporando al riego a partir de 1916 a la zona más cercana al dique, hasta completar la habilitación de todo el sistema en 1932.

La fruticultura constituye la principal actividad productiva en el Alto Valle de Río Negro (AVRN) liderando la producción de manzana y pera del país. En orden de importancia continúan la vid, frutas de carozo y, en menor medida, frutos secos. Estas actividades se desarrollan en una superficie bajo cultivo del orden de las 42.000 ha. Para tal fin, sumado el suministro urbano e industrial, se utilizan $100 \text{ m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$ de agua. Un porcentaje de lo utilizado retorna nuevamente al río (fuente de origen) como efluentes urbanos, drenaje agrícola, drenaje de industrias y agroindustrias. Previo a su ingreso al río atraviesa y percola por suelos agrícolas, conforma y alimenta el acuífero. Durante su recorrido, el agua está sujeta a concentración salina, carga de fertilizantes, biocidas, residuos industriales, efluentes urbanos y otros.

El método de riego por superficie (melgas y surcos) posee un predominio casi absoluto en los valles irrigados de la provincia de Río Negro, desde los comienzos de la colonización. Si bien con este método de riego, convenientemente diseñado, mantenido y operado, se pueden obtener buenas eficiencias de riego, la eficiencia del uso del agua en el Alto Valle puede alcanzar valores tan bajos como del 20-30 %. Es decir que el 70-80 % restante se pierde, atravesando la zona de raíces del cultivo, acercado la capa freática a la superficie del terreno, creando problemas de drenaje y salinizando los suelos (Requena, 2011). El trabajo se desarrolla en uno de los Distritos del Alto Valle de Río Negro-Provincia de Río Negro, denominado Distrito de riego Cipolletti, que se tomará como área piloto. El mismo se encuentra ubicado en el tramo inferior del valle del río Neuquén, recostándose sobre la margen izquierda del mismo (Figura 1 y 2).



Área de estudio: Distrito de riego de Cipolletti-Alto Valle de Río Negro

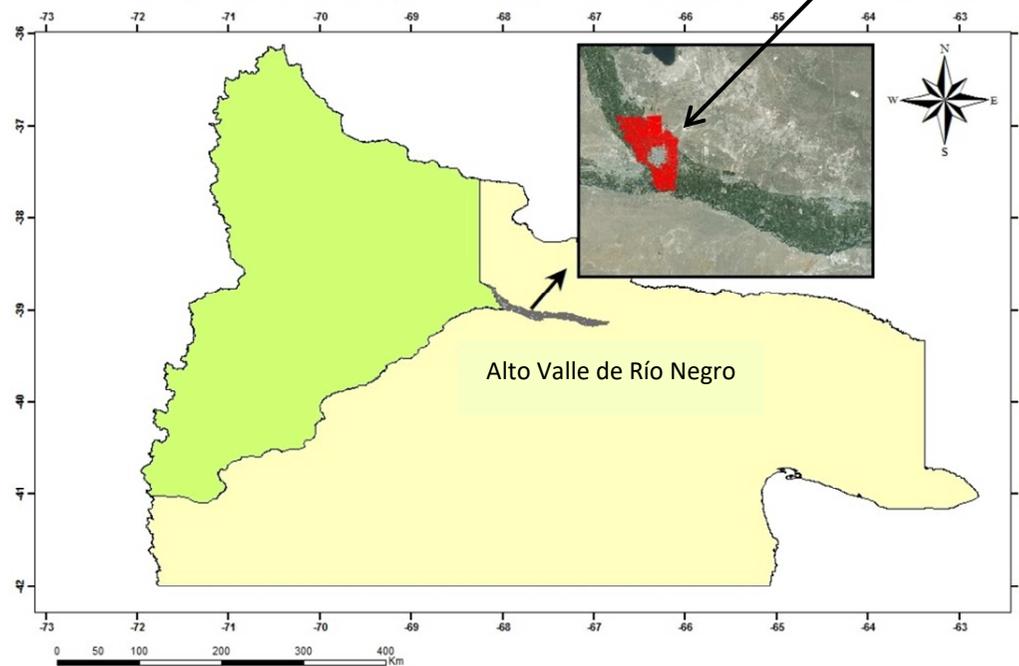


Figura 2: Área de estudio: Distrito de riego de Cipolletti – Alto Valle de Río Negro. (Elaboración Lic. Ayelén Montenegro)

Figura 1: Plano Argentina-Provincia de Río Negro (Fuente:https://es.wikipedia.org/wiki/Provincia_de_R%C3%ADO_Negro).

En el Alto Valle del río Negro y bajo del río Neuquén en una superficie empadronada de 58.511 ha, funcionan siete consorcios que comprenden 6.573 regantes; en la Tabla 1 se muestra el padrón de regantes con la superficie empadronada de los Consorcios de Riego (Storti, 2008).

Tabla 1: Características Consorcios de Riego Alto Valle. Datos suministrados por el Departamento Provincial de Aguas de Río Negro (Peri, 2004).

Consortio de 1er grado.	Consortio de 2do grado.	Área/Consortio/Red oficial	Sup. Empadronada (ha)	Cantidad de usuarios
	1	Consortio de 2do grado canal principal	60201	7039
1		Cinco Saltos	4248	663
2		Cipolletti	7077	1133
3		Allen	9555	1045
4		General Roca	13207	1607
5		Cervantes	4787	457
6		Ing. Huergo y Mainque	7686	735
7		Villa Regina	13641	1399
		Campo Grande	6401	350
		Valle Azul	2870	200

En particular el consorcio de Cipolletti cuenta con 7077 ha empadronadas y con aproximadamente 1133 regantes (Peri, 2004) y con un caudal de ingreso al Distrito de riego que oscila entre 6 y $6.6 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Los usuarios pagan un canon de riego que se divide entre el Consorcio de Primer grado y el Consorcio de Segundo Grado (mantenimiento del canal principal). En la actualidad del total de productores solo el 50 % paga dicho monto.

Desde el Dique Ballester a Fernández Oro se encuentran los montes más antiguos, predominando los frutales de pepita; desde Fernández Oro a Guerrico la superficie cultivada se reparte entre frutales y viñedo; mientras que desde Guerrico a Villa Regina predomina la diversificación produciéndose frutales de pepita y carozo, vid, tomate y alfalfa.

Se reconoce una aceptación generalizada del sistema de entrega denominado “por turnos”, donde el ciclo de turnado varía entre los cinco y los diez días, con tiempos unitarios de riego de $1.15 \text{ hs} \cdot \text{ha}^{-1}$ y $1.8 \text{ hs} \cdot \text{ha}^{-1}$ respectivamente (Storti, 2008).

De la totalidad de la superficie del Distrito, solo 4000 ha se riegan efectivamente, el resto se divide en loteos urbanos y chacras abandonadas.

Son marcadas las deficiencias que se observan en el área de riego, desde la construcción de la red parcelaria, la determinación de las unidades de riego y finalmente su operación, que se realiza sin tener presente el caudal que se maneja y las necesidades del cultivo.

Se han realizado distintas evaluaciones, observando que la sistematización para riego por superficie sigue en todos los predios un criterio dependiente de las características catastrales, sin tener en cuenta las condiciones texturales del suelo, esto genera que las longitudes de las unidades de riego (melgas y surcos), sean mayores a las recomendadas.

En la zona en estudio, el **clima** es continental, templado y árido. La temperatura media anual es de 15 °C por lo que las necesidades de frío invernal de los frutales de hojas caducas son normalmente satisfechas. La precipitación media anual es 190 mm.

Los vientos predominantes son del sector O-SO con una velocidad media de 6 km*h⁻¹, su intensidad hace necesaria la implantación de cortinas protectoras.

Los suelos son típicos del desierto, suelos grises que no han sufrido meteorización, salvo aquellos que se hallan al alcance de las inundaciones y los que han sido sometidos a cultivos, los cuales son aluviales.

Lo suelos clasificados desde el punto de vista textural se pueden dividir en:

Suelos de Barda: formados por arenas muy gruesas, que se encuentran al pie de las elevaciones llamadas “bardas”. El 6% del área mapeada lo constituyen estos suelos.

Suelos de Media Barda: De textura franco limosa a limosa a menudo asociados a problemas de salinidad y alcalinidad y su productividad parece vinculada al drenaje. Ocupan el 50% del área.

Suelos a media costa (coluvio): incluyen texturas franco arenosa a arenosa-franco. Ocupan el 30 % del área. Baja retención hídrica.

Suelos de Costa: Bordean las márgenes de los río Negro y Neuquén, de textura arenosa y ocupan el 14 % del área mapeada.

La red de distribución adolece de las deficiencias propias de un sistema con casi un siglo de funcionamiento y una precaria conservación, en algunos lugares se ha impermeabilizado consiguiendo aumentar de manera sustancial la sección útil y por ende su capacidad de conducción y operación. Pero en general el canal principal y el resto de la red funcionan con caudales menores a los de diseño, debido a la disminución de su sección producto de embanques y crecimiento de vegetación.

Desde que funciona el complejo Cerros Colorados (obra que embalsa el río Neuquén y regula los caudales que llegan al Dique Ballester) el problema se ha agravado, pues al modificar el régimen de escurrimiento y retener los sedimentos que transporta el río Neuquén se

incrementaron las malezas acuáticas producto de la la transparencia que adquiere el agua (efecto de aguas claras).

La red de desagües fue construida con posterioridad a la red de distribución de riego, cuando ya se había producido la elevación del manto freático y la salinización de los suelos, principalmente en el sector medio del valle en su sentido longitudinal, pues ésta es la parte de cota más baja. El sistema de desagües cumplió su cometido cuando tuvo una correcta conservación y mantenimiento .También fue usado como derivador pluvial de las aguas que bajan de la meseta y como descargador del agua de riego excedente (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 1987).

1.3. HIPOTESIS

- 1) La formulación de una metodología de decisión para gestionar la distribución del agua, es una herramienta básica para los responsables del manejo del recurso, a los fines de optimizar su uso en los distritos.
- 2) La implementación de una base digital de datos, propone a las autoridades del Distrito, disponer de un conocimiento mucho más completo e integrado sobre el funcionamiento del mismo.
- 3) Las pautas obtenidas a través de los resultados conforma una información relevante a los efectos de elevar los valores de eficiencias de aplicación y distribución, mejorando así el uso del agua por parte de los encargados de la distribución y principalmente los usuarios o regantes.

1.4. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

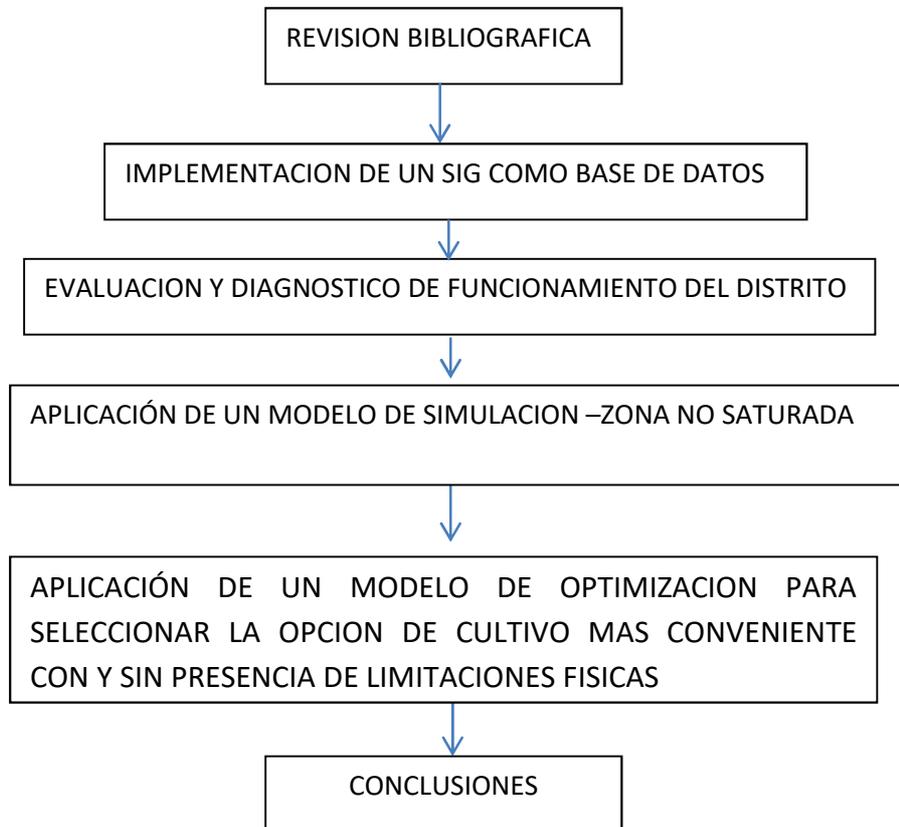
Desarrollar una metodología que permita optimizar el uso del agua a nivel de distrito, enmarcado en la sustentabilidad integral del sistema productivo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Implementar una base de datos, en un Sistema de Información Geográfica, que incluya los componentes principales de un Distrito de riego del Alto Valle que se utilizará como área piloto.
- ✓ Evaluar el funcionamiento de los sistemas de distribución y conducción así también como el de las obras hidráulicas menores existentes en el distrito.

- ✓ Identificar una herramienta que actúe como soporte de decisión para el manejo óptimo de un distrito de riego.

1.5. SECUENCIA METODOLOGICA



1.6 RESULTADOS ESPERADOS

- Disponer de una base de datos, en un Sistema de Información Geográfica, que complemente la que actualmente existe y que permita el conocimiento de variables específicas de un sistema de riego.
- Realizar un diagnóstico del funcionamiento actual del Distrito de Riego a partir de la realización de evaluaciones de riego y proponer acciones para su mejoramiento
- Implementar un modelo de simulación, como herramienta de decisión, que permita el entendimiento de los principales procesos que ocurren en la zona no saturada y que influirán en el rendimiento óptimo de los cultivos.
- Identificación del cultivo o los cultivos que producen el máximo beneficio para un área determinada a través de la utilización de un modelo de optimización con y sin influencia de componentes físicas en el análisis.

1.7 CONTENIDO DE LA TESIS

Esta tesis se divide en nueve Capítulos y 3 Anexos. En el Capítulo 1 se define la problemática analizada, las hipótesis, los objetivos, las características del área de estudio, la secuencia metodológica y los resultados esperados.

En el Capítulo 2 se presenta la revisión bibliografía de todas las componentes analizadas en el trabajo tales como: SIG, Evaluación de distritos de riego, modelos de simulación y modelos de optimización.

El Capítulo 3 describe las características del Sistema de Información Geográfica utilizado, analizado los resultados que surgieron de la base de datos implementada.

El Capítulo 4 describe las distintas evaluaciones realizadas sobre el Distrito de riego y los resultados obtenidos, permitiendo determinar un diagnóstico global de su funcionamiento.

En el Capítulo 5 se detalla la herramienta que actuará como soporte de decisión en el manejo del riego en función de las distintas características edafológicas, de la profundidad de la capa freática y de los cultivos, entre los más importantes.

En el Capítulo 6 se describe la técnica de optimización utilizada en éste trabajo, la cual se analizará inicialmente como problema puramente económico y posteriormente el análisis incluirá la incorporación de componentes físicas que pueden variar la solución encontrada.

En el Capítulo 7 se presenta el diseño de una página web que se propone implementar en el Distrito de riego de Cipolletti. En el Capítulo 8 se describen las conclusiones finales del trabajo y en el Capítulo 9 se indica la bibliografía consultada para desarrollar el trabajo.

Además se incluyen 3 Anexos con información referida a: relevamiento de datos, curvas de ajuste de los sensores de humedad y listado de planillas y gráficos que contiene el Sistema de Información Geográfica.

CAPITULO 2

REVISION BIBLIOGRAFICA

El presente capítulo incluye la revisión bibliográfica realizada de los componentes que se analizaron en este trabajo. Se incluyen trabajos de revistas científicas, libros, trabajos presentados a congresos y reuniones científicas, así como los desarrollados en la región que están relacionados con el tema de estudio.

2.1. EVALUACION DE RIEGO

El riego produce resultados muy favorables para una zona o región con déficit hídrico, pero su mal manejo puede llevar al deterioro del suelo y agua, en particular, y del ambiente en general. Usar racionalmente el agua desde el punto de vista agrícola, implica maximizar el beneficio a obtener y manejarla apropiadamente, en cuanto a la oportunidad del riego, en cantidad necesaria y suficiente, de manera de reducir al mínimo posible las pérdidas y desperdicios.

La evaluación de la eficiencia del riego en un área determinada constituye una forma de establecer el grado de racionalidad en el uso del agua. Con el avance científico se han establecido criterios de evaluación de ésta práctica, como una forma de calificarla o de evaluar su desempeño (Morabito, 2003).

Según Bos y Nugteren (Morabito, 2003) el movimiento del agua a través de los sistemas de riego, desde la fuente de agua hasta el cultivo, puede ser visto como tres operaciones separadas: conducción, distribución y aplicación en la parcela. La conducción implica el movimiento del agua desde la fuente de agua a través de los canales primarios y secundarios. La distribución de agua comprende al movimiento del agua en la red de canales terciarios, cuaternarios e internos a la propiedad. La aplicación del agua en la parcela corresponde al movimiento del agua superficial y subsuperficial, en toda la longitud de la unidad de riego (surco-melga) y en el perfil del suelo.

Chambouleyron (Morabito 2003) presenta un trabajo sobre eficiencia de riego en la zona de Mendoza. Se mencionan varios conceptos de eficiencias y esencialmente las divide en dos grandes grupos. Las eficiencias de la red de riego (eficiencias externas) y las eficiencias en el interior de la propiedad (eficiencias internas). La eficiencia de riego interna (ERI) está definida como el producto de la eficiencia de aplicación y la eficiencia de conducción interna (ECI). Esta última calculada como el cociente entre el caudal recibido en la parcela y regada respecto del caudal derivado en bocatoma de finca.

Los parámetros físicos que determinan el resultado de un evento de riego pueden agruparse en: (i) variables del sistema (parámetros físicos cuya magnitud puede cambiar en un amplio rango en función de la decisión del usuario) y (ii) parámetros del sistema, son parámetros físicos propios del sistema y que poco o nada de margen de cambio tienen (Reyen y Zerihun, 1999). Como parámetros del sistema se pueden considerar: lámina de riego a aplicar (d_n), 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_o), geometría de surcos o melgas. Las variables del sistema son: caudal de manejo y/o caudal unitario (Q_m, q_u), tiempo de aplicación o corte (t_{opi}), y en menor medida la longitud de la unidad de riego (L) (Schilardi et al., 2009).

Para la mejora de los sistemas de riego es necesario, la caracterización de parámetros físicos ya que influyen en los procesos hidráulicos del riego, determinando la uniformidad y la aplicación del agua sobre la superficie. La uniformidad de distribución (DU) 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).

Con el correr del tiempo, el avance del conocimiento y la tecnología, la visión acerca de cómo cuantificar las evaluaciones de rendimiento en los sistemas de riego fueron cambiando, se incluyó el concepto de sostenibilidad en el manejo del agua.

Lo que definía a la eficiencia de riego, cociente entre láminas o volúmenes, concepto que analizaba el funcionamiento global del riego, fue reemplazado por términos como indicadores de desempeño o por “fracciones”. Entre los autores que proponen este término en reemplazo del de eficiencia pueden citarse a Jensen (1993), Willardson et al. (1994), Allen et al. (1996, 1997), Molden (1997) y Molden y Sakthivadivel (1999). El término fracción describe el uso del agua incluyendo la intervención del hombre.

Jensen (1993) también cuestiona la utilización del término eficiencia, sugiriendo que se utilice el de “fracción de agua”. Dicho autor considera que este término mejora la descripción física y/o la evaluación de la gestión del agua y elimina fuentes de error. Willardson (1994) también apoya el uso del término fracción considerándolo más correcto y descriptivo. Toda agua suministrada para riego que retorne a la fuente en condiciones de reuso debe ser denominada “retornos de riego” o “fracción reusable” y no ser considerada una “pérdida” (los retornos de riego incluyen componentes como los escurrimientos superficiales y la percolación profunda).

Burt et al. (1997) utilizaron el concepto de “usos consuntivos” como el agua irrecuperable y consumida (la evaporación, la transpiración y el agua contenida en los tejidos de los cultivos) en contraposición con el concepto de “usos no consuntivos” que constituyen el agua que deja el área considerada, esencialmente por escurrimiento superficial (RO) y percolación profunda

(D_p). Analiza el tema desde el punto de vista del beneficio obtenido por el agua usada, definiendo “usos benéficos” y “usos no benéficos”. Como ejemplo el uso benéfico se puede considerar el exceso de percolación profunda para control de heladas (con suelo en capacidad de campo), o el agua escurrida al pie pero usada para regar otro cuartel o parcela localizada aguas abajo (riego encadenado), entre otros y el agua almacenada o re-usada/circulada en la parcela o propiedad y “usos no benéficos” como el exceso de percolación profunda, la evapotranspiración de malezas.

Particularmente la eficiencia de aplicación en la parcela, establece una medida del agua que se desaprovecha respecto a las necesidades del cultivo, y que se pierde, por percolación profunda y por escorrentía. Esta eficiencia es la relación entre las necesidades de agua del cultivo y lo que el agricultor aplica en parcela. De la lámina aplicada, el cultivo puede aprovechar como máximo la lámina equivalente al agua útil, que representa la capacidad de almacenamiento del suelo (Navarro Comalrena de Sobregrau et al., 2004). La forma en que dicho parámetro será estimado es calculando el cociente entre la lámina requerida por cada cultivo y la lámina aplicada para áreas con distintas características (suelo, topografía, ubicación, etc.).

En relación a la eficiencia de distribución en particular, la existencia de canales sin revestir, las estructuras de control no adecuadas para mantener el nivel de agua constante (variación en la entrega de agua en los canales) y/o una deficiente conservación de las obras de infraestructura, son las principales causas de las bajas eficiencias de los canales de distribución (Mejía et al., 2002).

La eficiencia de distribución se puede estimar a través de métodos directos, analíticos y empíricos que fueron revisados en el trabajo de Satlari (2011) y se sintetizados en este capítulo.

Dentro de los directos se puede enunciar el estanque o endicamiento propuesto por Alam y Bhutta (2004), que consiste en seleccionar una zona del canal y medir las pérdidas que se producen durante un período de tiempo, habitualmente diario.

Se aconseja que la longitud del sector sea por lo menos de 300 m, y para aislarlo se usen diques temporales sellados en los extremos con una lámina de polietileno, para evitar las pérdidas de agua. Los autores proponen la Ecuación 1, sugerida por Kraatz (Alam y Bhutta, 2004):

$$S = W(d_1 - d_2)L / P * L \quad (1)$$

Donde: S es la infiltración promedio (m³*m⁻²) cada 24 h, W el ancho medio de la superficie del agua estancada (m), d₁ la profundidad del agua al comienzo de la medición (m), d₂ la profundidad del agua después de 24 h (m), P el perímetro mojado promedio (m) y L es la longitud del canal (m).

Dentro de las limitaciones a ésta expresión, se puede mencionar que no puede ser utilizada mientras los canales estén en funcionamiento, solo se aplica a pequeños canales que pueden no tener servicio permanente y requiere la ejecución de diques (Kinzli et al., 2010).

En el área de riego del Alto Valle de Río Negro, es muy difícil de aplicar sobre todos en canales con servicio permanente.

Otro de los métodos directos es el de diferencia de caudales o de entradas y salidas: se realiza sobre un tramo recto del canal, y consiste en aforar, preferentemente con molinete hidrométrico, el inicio y el final del mismo, la diferencia entre los caudales aforados dividido la distancia entre ambos nos da la pérdida de agua que se produce por metro lineal de canal.

El ensayo se realiza cuando el canal esté funcionando, y requiere que el tiempo entre ambos aforos sea pequeño de manera de evitar errores si existieran variaciones del caudal circulante. Se aconseja que el ensayo se realice en tramos de canal lo suficientemente largos, aunque esto requiere de más tiempo y mano de obra.

El método de encharcamiento o endicamiento es más preciso que el de entradas y salidas donde es frecuente la variación del caudal en el canal (Alam y Bhutta, 2004).

El tercer método considerado como directo es el del permeámetro, en el se determina la conductividad hidráulica, en distintos puntos del canal cuando el fondo del mismo se satura con aparatos diseñados para esto. El problema es que requiere de la realización de varias repeticiones dada la heterogeneidad de los suelos a lo largo del canal (Grassi, 2001). El método se basa en utilizar la conductividad hidráulica en un suelo saturado, como propiedad clave, en la descripción de los procesos de infiltración y redistribución de agua en el suelo.

Una segunda categoría son los métodos analíticos y empíricos. Los métodos empíricos se aplican con fines de planificación y en condiciones similares a las que se han determinado las ecuaciones (Grassi, 2001). Permiten determinar ecuaciones empíricas a partir de valores conocidos y medidos de pérdidas por infiltración, para diferentes condiciones de medio físico. Según Grassi (2001) las fórmulas empíricas y analíticas no son recomendables para estimar la eficiencia de distribución, ya que los resultados son estimaciones aproximadas, y en estos casos se debe contar con mucha precisión para la estimación.

Dentro de los analíticos se encuentran las imágenes infrarrojas: métodos geofísicos eléctricos (resistividad eléctrica, electromagnetismo, y radar de penetración del suelo) en combinación con las imágenes infrarrojas de color sirven para delimitar zonas de infiltración potencial. Engelbert et al. (1997) determinaron que los métodos geofísicos integrados con otras técnicas pueden proporcionar una forma relativamente rápida y barata de localizar la filtración sin alterar el flujo natural del canal. Además determinaron que las zonas con altas filtraciones tienen mayor cobertura vegetal que las de menor infiltración. El principal inconveniente de

este método es que no se cuantifica realmente la infiltración y no se puede utilizar donde existe suficiente agua subterránea para el crecimiento vegetal.

Otro método analítico es el de medición por resistividad eléctrica: esta variable se utiliza para determinar las tasas de infiltración, basado en el principio de que las áreas de alta filtración muestran un aumento de resistividad eléctrica. Estos procedimientos fueron desarrollados y probados por Hotchkiss et al. (2001) para la cuantificación de las pérdidas por filtración en los canales de riego sin revestimiento de longitudes de 30 m. El procedimiento es apropiado para secciones trapezoidales de canal que yacen sobre arcilla con una capa de material más permeable en profundidad. La precisión es aproximadamente $\pm 20\%$ y lo interesante del método, según el autor, es que puede determinar con precisión las zonas de mayor infiltración, que el uso de medidores de flujos.

Analizando los métodos presentados y en función de las características de los suelos, la topografía de la zona, el sistema de riego, la simplicidad y la infraestructura disponible, en ésta Tesis, se consideró adecuado para la determinación de eficiencia de distribución el método de entradas y salidas para aplicar en el Distrito.

2.2. SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

Los sistemas de Información geográfica (SIG), son herramientas muy útiles para el manejo eficiente del distrito de riego ya que su objetivo se centraliza en compilar la información, organizarla, analizarla, para que el operador del Distrito posteriormente realice una utilización eficiente de los recursos. En ésta Tesis la revisión de los métodos de los Sistemas de Información Geográfica se centraron en aquellos desarrollados específicamente para Distritos de Riego.

Para mejorar de la programación del riego en la cuenca del Syr Darya, Uzbekistán, fue seleccionado una nueva versión del modelo ISAREG (Pereyra et al., 2003), que se encuentra integrado con un sistema de información geográfica (SIG), denominado GISAREG (Fortes et al., 2005). Esta aplicación SIG está dirigida a apoyar la gestión agrícola de riego y, posteriormente facilitar la gestión de proyectos. La integración se refiere a la creación de bases de datos SIG espaciales y atmosféricos utilizables por ISAREG, los modelos de operación para diferentes escenarios de manejo del agua y la producción de mapas de láminas de riego para los diferentes cultivos. Además permite identificar prácticas que pueden conducir al ahorro de agua y al control de la salinidad.

Sagardoy et al. (1994) y Mateos et al. (2002) presentaron "SIMIS", sistema de información de manejo de riego de la FAO. Dicho programa comenzó en 1993 como un sistema de

información basado en DOS (Sagardoy et al., 1994) diseñado para ayudar a los gerentes y personal responsable de los sistemas de riego en sus tareas diarias, proporcionando una base de datos completa. Los cursos de formación y las verificaciones de campo se llevaron a cabo en la Argentina, Egipto, Cuba y Tailandia (Hatcho y Sagardoy, 1994). Fue diseñado principalmente para sistemas de canales abiertos de distribución, aunque se puede adaptar a sistemas presurizados. SIMIS también incluye un módulo para el control de las actividades de mantenimiento y un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Lozano et al. (2008), utilizaron el programa SIMIS, para calcular indicadores de rendimiento en un sistema en Lebrija (Sevilla), el sur de España. Los autores identificaron las restricciones del sistema que impiden satisfacer las demandas de los cultivos existentes. Se calcularon 5 indicadores: intensidad de riego (área plantada sobre área total), capacidad de suministro de agua (volumen máximo de agua durante el periodo de demanda pico), equidad de la oferta (promedio de las desviaciones absolutas de la profundidad media aplicada), suministro de irrigación relativa (compara la cantidad de agua requerida para un rendimiento máximo y la cantidad de agua que está programada que se aplique), calidad de funcionamiento (tiempo en que la tubería suministra la demanda de agua del cultivo). Dentro de las conclusiones que arrojó el trabajo se demostró que SIMIS es una herramienta útil para ayudar a la gestión de los sistemas de riego, dado que ayudó el esquema director en la organización de los datos de gestión, cálculo de dotación de riego y planificación de la campaña de riego. Además de ser extremadamente útil para que el administrador pueda decidir el momento de cambiar la programación original cuando la demanda de agua es baja.

Paoli (2004), en el trabajo final de su carrera de especialización, aplicó el SIMIS en el distrito de riego del río Toro Valle de Lerma – Salta. El objetivo fue mejorar la eficiencia de riego a través de cambios en aspectos técnicos y administrativos del uso del recurso hídrico. La gestión del agua de riego, pasó de un enfoque centralizado, definido por un organismo gubernamental, hacia otras formas más directamente vinculadas a los propios regantes, siguiendo una tendencia mundial hacia la autogestión y auto-sostenimiento de los sistemas. En sus conclusiones se pudo determinar que el SIMIS es una importante herramienta que actúa como soporte para volcar las características descriptivas de una red de riego e incorporarle los datos operativos de la misma. Posibilita el ordenamiento de todos los componentes del sistema; tanto en el trazado de red como en la sectorización de las parcelas acorde al acueducto del cual se surge. Permite identificar un conjunto de carencias de información inherente a las condiciones físicas, ocupación y manejo de las unidades parcelarias, sujeto de atención en la administración de los perímetros de riego. En relación a las desventajas, según éste autor, SIMIS no se mantiene ni actualiza desde hace 10 años. Es complejo en el

procesamiento de la información, situación que impide evaluar el comportamiento global de funcionamiento del programa. El lenguaje utilizado en las explicaciones suministradas por el manual de instrucciones original no resultaba lo suficientemente claro, y la carencia de pantallas de ayuda no incorporadas en la mayor parte de desarrollo del programa, fueron causales de demoras y en algunos casos imposibilitó resolver situaciones de operación presentadas durante la aplicación práctica del mismo. El programa no logra combinar el total de variables que le permita definir el turno de riego requerido para los niveles de información suministrados.

Playán (2007) consideró en su trabajo que los programas citados anteriormente representan contribuciones a la gestión de los distritos de riego, pero ninguno de ellos está adaptado a la gestión de la gran variedad de los distritos de riego que se presentan en distintas áreas. Se necesitaba un nuevo desarrollo al que denominó ADOR (Playán et al., 2007). Este es un sistema de información geográfica especialmente diseñado para promover la trazabilidad del agua y facilitar el análisis y el diagnóstico de la gestión de la misma, constituye una herramienta de transparencia y de participación en las comunidades de regantes, independientemente de su tamaño y su grado de modernización. Cabe aclarar que incluso se puede utilizar en los distritos de riego que combinan diferentes tipos de sistemas de riego y diferentes tipos de redes de distribución de riego.

El programa ADOR fue realizado por investigadores y técnicos de la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) y la Unidad de Suelos y Riego del SIA (Diputación General de Aragón), junto a la colaboración de la Comunidad de Regantes V de Bardenas. Tiene tres componentes principales: una estructura de base de datos completa, un diagrama de la red de distribución de agua, y un módulo SIG (Playán et al., 2007). Fue utilizado en los distritos de riego del Valle del Ebro en España, este programa permitió confeccionar una base de datos para el distrito de riego independientemente del tipo de sistema de irrigación (superficie, aspersión o goteo) y el tipo de red de distribución (canales o tuberías). Los objetivos del programa, son gestionar la información detallada sobre la gestión del agua y de distrito para promover un mejor nivel de las prácticas de riego en la finca. Actualmente se utiliza para mejorar la gestión de los 62 distritos de riego representa alrededor 173.000 hectáreas en el Valle del Ebro.

Es importante destacar que los distritos ahora ofrecen a los usuarios de riego información completa sobre el uso del agua, fortaleciendo de esta manera la posición del distrito en la gestión del agua y brindando reconocimiento público a su labor. La futura evolución de ADOR se centrará en la mejora de las capacidades de los SIG, la producción de indicadores adicionales para los ejercicios de evaluación comparativa, el desarrollo de un entorno

multiusuario, y la publicación de información general e individual a través de la Internet (Playán et al., 2007).

En esta Tesis se analizaron las opciones existentes en relación a los sistemas de información geográfica. Los SIG tradicionales no tienen la capacidad de almacenar toda la información que generan las comunidades, perdiéndose datos de gran valor. Dentro de las opciones posibles estaba la utilización del GISAREG, esta opción se desestimó ya que se decidió trabajar con modelos dinámicos.

A partir de esto se decidió trabajar con el programa ADOR, el valor del programa radica en la capacidad que tiene de convertirse en un estándar de gestión de comunidades, debido a la estructura de base de datos en que se soporta. Esta estructura está concebida para comunidades de regantes que tengan cualquier tipo de sistema de riego y cualquier tipo de red de distribución, aceptando mezclas de tipo de redes¹.

Luego de implementarlo sobre el Distrito de Cipolletti, en el Capítulo 3, se discutirán los ventajas y desventajas que se encontraron al utilizar dicho sistema.

2.3.TIPOS DE MODELOS DE SIMULACION APLICADOS A LA ZONA NO SATURADA - MODELOS QUE LO EXPLICAN.

La mejora de la gestión del agua en un sistema de riego requiere la evaluación del desempeño del riego como punto de partida, los modelos de simulación son muy útiles para esta tarea.

La implementación de programas de riego utilizados en la planificación de los recursos hídricos mejora su rendimiento en el uso y ahorro de agua (Pereira, 1999; Bucks et al., 1990).

Los modelos de simulación pueden ser utilizados para apoyar este tipo de programas, sin embargo, requieren la validación adecuada a las condiciones locales, en las que van a aplicarse (Pereira et al., 1995).

A pesar de que la utilización de modelos matemáticos para la simulación del movimiento del agua en sistemas agrícolas ha resultado una herramienta útil en la actualidad para desarrollar soluciones de diferentes problemas de manejo agrícola y medioambiental, la precisión de sus resultados puede estar afectada también en gran medida por la simplificación de las representaciones de los balances de agua (Clemente et al., 1994; Dourado-Neto et al., 1998).

Muchos modelos se han utilizado para simular partes del ciclo hidrológico en la agricultura de regadío, desde empíricos o funcionales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos y Kassam, 1979; Allen et al., 1998) a mecanicistas (Van Aelst et al., 1988). Además herramientas tales como la

¹ En el Capítulo 3 (Apartado 3.2.1.) se presentan las principales características de éste programa.

teledetección (Kite, 2000; Kite y Droogers, 2000) y los sistemas de información geográfica (Hartkamp et al., 1999), han sido combinados con modelos de simulación para evaluar el comportamiento de los sistemas de riego.

Sin embargo, estos modelos se basan en una serie de supuestos simplificadores y requieren datos de campo extensivos para los parámetros de estimación del modelo (Panigrahi et al., 2003).

Hay dos enfoques básicos en el estudio de la zona no saturada: los modelos de balance hídrico y los modelos dinámicos. Los modelos de balance hídrico son más populares que los modelos dinámicos, ya que son relativamente simples, requieren pocos parámetros y se pueden utilizar fácilmente a escala de campo. Modelos de balance hídrico se basan esencialmente en el principio de conservación de la masa aplicada al depósito de suelo que está limitado por la profundidad máxima de la zona radical del cultivo. Se utilizan comúnmente para la programación del riego y adoptan procedimientos de estimación empíricos o semi-empíricos para variables tales como la percolación profunda y el ascenso capilar. Cuando no ocurran flujos ascendentes, no incluyen la estimación del ascenso capilar (Pereira et al., 1995; Smith et al., 1996).

En el artículo de Liu et al. (2006) denominaron “Los flujos a través de la frontera inferior de la zona de las raíces en suelos limosos: Enfoque paramétrico para estimar la contribución de las aguas subterráneas y percolación “ se realizó una revisión que fue de mucha utilidad en este trabajo. El artículo revisa los distintos métodos para la estimación del proceso de capilaridad y de la percolación que se aplican en el WINISAREG. Asimismo examina otros métodos y modelos para estimar estos parámetros.

El modelo WINISAREG es un modelo de simulación de balance hídrico diseñado para simular, seleccionar y evaluar los programas de riego alternativos, y para apoyar su aplicación en la práctica de campo (Teixeira y Pereira, 1992). Se utiliza para varios cultivos, suelos, métodos de riego y condiciones ambientales. El modelo utiliza inicialmente los enfoques empíricos simplificados propuestos por Doorenbos y Pruitt (1977) para calcular los flujos ascendentes y descendentes acumulados a través del límite de la zona de la raíz, los resultados obtenidos en diferentes trabajos fueron adecuados (por ejemplo: Teixeira y Pereira, 1992; Teixeira et al., 1995; Zairi et al., 2003), sin embargo se pudo observar que conducen a estimaciones menos precisas de estos términos cuando el modelo se aplica en suelos limosos (Liu et al., 2006). La estimación de la contribución de las aguas subterráneas (G_c) para el cálculo del balance hídrico del suelo en presencia de altos niveles freáticos, se ve favorecida por los flujos ascendentes en la zona de las raíces. La percolación profunda (D_p) cuando la lluvia o el riego, son superiores al

déficit de agua en el suelo, produce un flujo saliente a través del límite inferior de la zona de la raíz.

Estos términos del balance hídrico son difíciles de estimar con precisión con estos modelos, por eso en muchos casos se aconseja la aplicación de los modelos dinámicos, como los que utilizan la ecuación de Richards. Estos modelos numéricos necesitan de la estimación de numerosos parámetros. Esto es particularmente cierto cuando se analizan las propiedades hidráulicas de los suelos no-saturados, propiedades que dependen de la velocidad a la cual el agua y los químicos disueltos se mueven dentro del suelo.

Entre los programas más conocidos que permiten modelar flujo en medios porosos a través de la resolución de la ecuación de Richards se encuentran HYDRUS, UNSATCHEM, CHAIN, MODFLOW UZF, VS2DI (Linares Forero, 2012).

Por ejemplo, el modelo WAVE (Vancloster et al., 1994) es un modelo explicativo donde el flujo de agua en el suelo se describe por la ecuación de Richards.

Liu et al. (1998) desarrollaron un trabajo cuyo objetivo era analizar las metodologías actuales y revisar alternativas existentes, en el cálculo de la contribución de las aguas subterráneas y la percolación profunda. Dichas metodologías, fueron utilizadas en los modelos de simulación del balance hídrico, y para describir los estudios de campo y de modelización en el modelo de flujo de agua WAVE (Vancloster et al., 1994). El modelo WAVE apoya el desarrollo de los enfoques paramétricos adoptadas con el modelo WINISAREG.

Liu et al. (1998) en sus conclusiones destacaron que la estimación de la contribución de las aguas subterráneas y la percolación profunda, con modelos de simulación del balance de agua, generalmente adopta enfoques aproximados que pueden ser menos precisos en ciertas condiciones ambientales. Por el contrario, los modelos de flujo de agua determinísticos tienen el potencial para llevar a cabo tales cálculos pero requieren propiedades hidráulicas del suelo más estrictas, que son rara vez disponibles.

En particular respecto al aporte de agua subterránea (G_c), existen varios enfoques empíricos y semi-empíricos.

El método de estimación G_c más popular es probablemente el propuesto por Doorenbos y Pruitt (1977). Estos autores adoptaron un procedimiento gráfico para estimar la constante G_{max} de ascenso capilar, como una función de la profundidad de las aguas subterráneas por debajo de la zona de la raíz. Este enfoque también es adoptado por Martin y Gilley (1993), pero su solución gráfica se refiere a sólo siete tipos de suelo. Alternativamente, otros modelos utilizan valores G_c para producir curvas mejor adaptadas a los ambientes locales (por ejemplo: Meyer et al., 1996).

Otros autores prefieren calcular los flujos ascendentes usando la ecuación de Darcy generalizada, por ejemplo, Anat et al. (1965).

Un enfoque similar adoptaron Martin y Gilley (1993), ellos propusieron una solución gráfica que relaciona la velocidad relativa de la contribución del agua subterránea con la profundidad relativa del nivel freático, por debajo de la zona de las raíces, para diferentes familias de suelos caracterizados por Brooks y Corey (1964). Este enfoque, sin embargo, requiere el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo de manera similar a los requisitos de los modelos determinísticos.

Martin y Gilley (1993) también ofrecieron aportes sobre el cálculo de los parámetros hidráulicos del suelo adoptando enfoques simplificados. Sin embargo, el uso de las funciones de pedo-transferencia pueden originar errores cuando hay una gran dispersión de los parámetros del suelo observadas, como es el caso de los suelos pesados en ambientes mediterráneos (Goncalves et al., 1997). Por tal motivo se aconseja en esos casos realizar una calibración de los parámetros hidráulicos del suelo considerando los efectos de la humedad en la zona radical y la tasa de absorción de agua de los cultivos.

Más recientemente, Raes y Deproost (2003), propusieron el modelo de flujo ascendente para calcular el ascenso capilar y luego utilizar sus resultados como entrada a un modelo de balance hídrico. G_c se estima utilizando un enfoque de flujo simplificado basado en las propiedades hidráulicas del suelo descritas por las funciones de van Genuchten (van Genuchten, 1980). Para la estimación es necesario conocer los valores medios de la evapotranspiración, la humedad del suelo en la capa superficial y la profundidad de la capa freática. La base de datos del modelo incluye 12 curvas de retención de humedad de suelo y un conjunto de datos de conductividad hidráulica saturada (K_s) que ayudan a los usuarios a seleccionar los parámetros hidráulicos del suelo más adecuado. Sin embargo, los procedimientos utilizados para seleccionar las propiedades hidráulicas del suelo a partir de la base de datos puede dar lugar a imprecisiones, los procedimientos de calibración- validación puede ser necesarios en estos casos.

En el modelo de CADSM (Walker et al., 1995), G_c se calcula con una sencilla ley de potencia de la profundidad de napa freática por debajo de la zona de la raíz, los parámetros empíricos dependen del contenido de humedad del suelo en la zona de la raíz y las características del suelo. Cuando se conocen las propiedades hidráulicas del suelo, se estiman los parámetros utilizando un modelo determinístico y luego sus resultados se usan como insumo para CADSM. Si no están disponibles las propiedades hidráulicas del suelo, se utiliza el procedimiento propuesto por Doorenbos y Pruitt (1977).

En la ecuación propuesta por Jensen (1972), G_c se calcula a partir del agua disponible en el suelo en la zona de la raíz, la profundidad de la raíz, la altura efectiva del ascenso capilar por encima de la capa freática, la profundidad de la capa freática y la evapotranspiración del cultivo.

Un enfoque más simplificado lo proponen Li y Dong (1998) quienes han utilizado una función exponencial decreciente de la profundidad de las aguas subterráneas y no de la humedad disponible en el suelo, dichos autores determinan su parámetro empírico a partir de la textura del suelo.

Danuso et al. (1995) adoptaron dos enfoques diferentes, uno para un alto contenido de humedad del suelo, y el otro para un valor bajo. Para alto contenido de humedad de suelo, G_c es proporcional a la conductividad hidráulica saturada y varía exponencialmente con la profundidad de la capa freática y la succión matricial de la capa de suelo. Para las condiciones de humedad de suelo bajas, G_c es una función exponencial de la profundidad de la capa freática y la succión matricial del suelo en cada capa de suelo. Los parámetros son obtenidos empíricamente por interpolación de datos de suelos típicos presentados por Rijtema (1969) en relación con 14 clases texturales. Por lo tanto, los cálculos G_c requieren que se conozca la curva de tensión-humedad y el valor de la conductividad hidráulica saturada K_s , lo cual es una desventaja con respecto a otros modelos donde es más sencilla la caracterización de las propiedades del agua del suelo para realizar los cálculos del balance hídrico.

El análisis anterior muestra que cuando no se adopta un enfoque simplificado, los métodos alternativos requieren el conocimiento de las propiedades hidráulicas del suelo o el uso de la estimación empírica de estos datos, lo que puede requerir como ya ha sido mencionado, un procedimiento de calibración o validación para mejorar la precisión de los cálculos. El análisis también evidencia que la estimación G_c , además de la profundidad del nivel freático y las características del suelo, necesita que se consideren en los cálculos la evapotranspiración (ET) y la humedad del suelo en la zona de las raíces.

En relación a la variable percolación profunda (D_p) puede ser necesario estimar la precipitación efectiva cualquiera que sea el método utilizado (Martin y Gilley, 1993). En estas condiciones, la precipitación efectiva es una entrada a los modelos de balance de agua y D_p no se calcula como un término del balance hídrico.

En varios modelos de balance hídricos, incluyendo en los recientes (por ejemplo, Panigrahi y Panda, 2003), D_p a menudo se calcula con el enfoque simplificado de Doorenbos y Pruitt (1977). Cabe aclarar que el flujo de percolación se considera que se produce cuando se aplica el agua en el día, consideración común en muchos modelos (por ejemplo, Oluwasemire et al., 2002).

En el modelo CADSM (Walker et al., 1995), se supone que la percolación máxima se produce el primer día después del riego o de la lluvia, con la tasa de percolación profunda disminuyendo linealmente desde el primero hasta el último día. En el modelo BIDRICO (Danuso et al., 1995), la percolación se calcula cuando el almacenamiento de agua en el suelo (W) es mayor a la humedad del suelo a capacidad de campo, suponiendo una velocidad dependiente de la conductividad hidráulica actual. Dicho valor se estima a través de una curva potencial decreciente dependiente del potencial mátrico del suelo.

Parkes et al. (1995) revisaron varias soluciones aproximadas para el cálculo de las curvas de decaimiento del drenaje en el suelo, adoptando una función de la variación de la conductividad hidráulica en el tiempo y de la profundidad del suelo donde se produce el flujo. Para condiciones del suelo dado, la función de drenaje empírica propuesta por Miller y Aarstad (1972) es similar a la ecuación empírica propuesta por Ogata y Richards (1957) y adoptada por Stegman et al. (1980), Ecuación 2:

$$W = c * W_o * t^{-m} \quad (2)$$

Donde: W es el almacenamiento de agua del suelo en la zona radicular (mm), W_o (mm) el valor inicial de W para el tiempo cero, t el tiempo después que el riego o la precipitación hayan terminado (hs), m un parámetro dependiente del suelo y c es una constante dependiente de t , ambos adimensionales.

En el trabajo de Liu et al. (2006), en la Estación Experimental Xiongxian (China), se analizaron las metodologías actuales y se presentaron alternativas para calcular la contribución de las aguas subterráneas y de la percolación profunda que fueron utilizadas en los modelos de simulación del balance hídrico, y complementado con el modelo de flujo WAVE (Vanclooster et al., 1994). Los experimentos de campo se realizaron en cultivos de trigo y maíz y los datos obtenidos se utilizaron para calibrar y validar los nuevos enfoques con el modelo WINISAREG, además de estudiar las propiedades hidráulicas a través de mediciones in situ y de laboratorio. Se desarrollaron ecuaciones paramétricas basadas en simulaciones con el modelo determinista WAVE que fueron posteriormente aplicadas y probadas en el modelo WINISAREG. El modelo WAVE fue calibrado primero y validado para suelos limosos utilizando los datos del Norte de China. Con los resultados de la simulación del ascenso capilar y su dinámica se produjo la información necesaria para elaborar un conjunto de ecuaciones paramétricas que se aproximan a los procesos observados en el área experimental, estas ecuaciones se aplicaron en el modelo WINISAREG.

Panigrahi et al. (2003) utilizaron un modelo simple, de balance de agua en el suelo en la zona radical activa de cultivos de mostaza (*Brassica juncea*) para 2 condiciones: una de seco y

otra de riego. El modelo incluye diferentes procesos: la lluvia, el riego, la redistribución de la infiltración del agua, la absorción de agua por parte de la planta, la percolación así como la dinámica de crecimiento de las raíces. En muchos casos estos modelos de simulación se aplican para determinar parámetros tales como los coeficientes de cultivo (K_c) y la fracción de agotamiento sin estrés hídrico. Los autores aplicaron el modelo de simulación WINISAREG, lográndose una calibración que minimizaba las diferencias entre los valores de humedad del suelo observados y simulados, concluyendo que el modelo se puede utilizar en forma segura para simular el contenido de agua del suelo en la zona de las raíces de los cultivos.

La percolación profunda en una zona bajo riego a menudo se calcula indirectamente a partir de modelos que aplican la ecuación de Richards. Estos modelos requieren de determinados parámetros hidráulicos de suelos y de los cultivos.

Un modelo conceptual simple lo desarrollaron Bethune et al. (2008) quienes predijeron adecuadamente la percolación profunda, ya que solo representaron los procesos dominantes que contribuyen a la misma, requiriendo menos datos que el modelo que contiene la ecuación de Richards. Estos autores desarrollaron un modelo conceptual que estimaba la percolación profunda en escala del evento de riego basado en los datos de un experimento con un lisímetro. El modelo conceptual de percolación profunda, D_p , está dado por la Ecuación 3:

$$D_p = \left(i_f t_o + a \frac{DW}{ET} i_f \right) * f(GWD) \quad (3)$$

Donde: D_p percolación profunda (mm), SSP (mm) y $NSSP$ (mm) denotan el estado estático y no estático de la (redistribución) respectivamente, $f(GWD)$ es un factor que representa la influencia del nivel freático, dependiente de su profundidad en metros (GWD). i_f es la tasa de infiltración básica del subsuelo (mm/h), t_o es el tiempo de encharcamiento (h), a es una constante empírica que describe la tasa de percolación constante en el tiempo durante la redistribución, DW es el almacenamiento de agua en el suelo drenable en la zona de raíces entre la saturación y capacidad de campo (mm) y ET es la evapotranspiración (mm). $i_f * t_o$ representa la percolación durante riego (cuando el agua de riego se encharca en la superficie del suelo) asumiendo condiciones estáticas (se alcanza instantáneamente cuando se aplica el agua de riego). $i_f t_o$ es SSP y $a \frac{DW}{ET} i_f$ es $NSSP$.

En el trabajo de Titouna et al. (2013), se utilizó la ecuación de Richards en dos dimensiones, aquí se combinó la ecuación de continuidad y la ley de Darcy, para describir el movimiento del agua en el suelo. Componentes como la conductividad hidráulica, la característica de retención de agua, y la capacidad de humedad diferencial han sido descritos por modelos matemáticos conocidos. Un modelo numérico se desarrolló para este objetivo y se validó mediante la comparación de los resultados numéricos del modelo y los resultados experimentales. El

modelo de simulación tiene la ventaja de reducir en gran medida el número de experimentos y ayuda en la búsqueda de distintas alternativas. Se determinan las propiedades hidráulicas y físicas del sustrato utilizado, valores que se introducen para simular el movimiento del agua por el uso de software Dinámica.

En la Tesis de Doctorado de Torrealba Almarza en 2008 se aplicó un modelo numérico que permitió predecir curvas de evaporación en función de la profundidad del nivel freático a partir de las características hidrodinámicas de un suelo. Además se estudió la predicción en los casos en que se obtienen estas características a partir de información de granulometría básica.

Se aplicó un modelo numérico (VS2D) para simular el flujo vertical a través de la zona no saturada. Para describir las características hidrodinámicas del suelo se midió en el laboratorio la curva de tensión-humedad y la conductividad hidráulica saturada para una arena fina. A partir de la granulometría se estimaron las curvas $h(\theta)$ y $K(\theta)$ haciendo uso de una "función de pedotransferencia" (PTF) basada en el método de redes neuronales. Los ajustes realizados a partir de la granulometría mostraron diferencias importantes con las curvas medidas en el laboratorio, sin embargo constituyen una buena referencia cuando no hay información de fácil acceso. Los resultados obtenidos, mediante la modelación numérica, mostraron discrepancias con las mediciones experimentales. El modelo numérico se mostró muy sensible ante cambios en los parámetros de van Genuchten asociados a la altura de la franja capilar y ante cambios en el valor de la conductividad hidráulica saturada. Como conclusión se puede mencionar la necesidad de contar con mayor información experimental para realizar la validación del modelo.

De todos los modelos analizados uno de los más utilizados, en distintos trabajos que simulan la variación del contenido de agua en el suelo en la zona de raíces, es el HYDRUS-1. Dicho modelo simula flujo unidimensional, transporte de un sólo soluto y movimiento de calor, en un medio variablemente saturado. La versión HYDRUS-2 permite resolver el transporte en un espacio bidimensional y la versión HYDRUS-3, se aplica en geometrías tridimensionales hexaédricas o geometrías más complejas. Estas versiones modelan el flujo del agua usando la ecuación de Richards, y los solutos y el movimiento de calor usando ecuaciones de transporte convección y dispersión. Su ventaja es ser muy usado a nivel de investigación y además de contar con varias actualizaciones que incorporan nuevos módulos como el de modelación inversa, la modelación de contaminantes y modelación con histéresis entre otros (Linares Forero, 2012).

Muchos trabajos han utilizado dicho modelo, uno de ellos es el desarrollado por Arbat et al. (2007), que analiza la distribución de agua en el suelo en un riego por tablares de un vivero de producción de árboles ornamentales (*Prunus cerasifera* 'Nigra') situado en la Comunidad de

Regantes “Acequia Vinyals”, localizada en el curso medio-bajo del río Ter (Girona). El ensayo consistió en caracterizar hidráulicamente dos eventos de riego, midiendo los caudales y los tiempos de riego en los tablares; el tiempo de avance y de receso del agua y la altura del agua en los tablares en distintos puntos y tiempos. Paralelamente los contenidos de agua se midieron automáticamente a intervalos de 1 hora a distintas profundidades y localizaciones. Por otro lado se utilizó el código HYDRUS (Simunek et al., 2006) para simular la distribución de agua en el suelo bajo las tablas de riego y se compararon sus resultados con las medidas realizadas con el equipo Reflectometría en el Dominio de Frecuencias (FDR). Los resultados mostraron una alta correlación entre los contenidos de agua medidos experimentalmente y los simulados en el periodo de redistribución que siguió al primer riego pero no en el segundo. La causa de ello fue que los importantes eventos de lluvia durante el segundo período de redistribución causaron una gran escorrentía superficial a lo largo de la melga de riego, debido a su elevada pendiente, que no pudo tenerse en cuenta en las simulaciones realizadas. La utilización del modelo permite complementar la información proporcionada por los sensores, dando una idea mucho más detallada de lo que sucede en el conjunto de la melga de riego. A pesar de la limitación experimental que supone la localización de los sensores a la hora de tratar el problema estudiado como bidimensional, la comparación de los resultados experimentales y simulados muestra muy buen ajuste en los casos en que no hay episodios de precipitación importantes. Por el contrario, cuando las lluvias son intensas el ajuste del modelo es malo, probablemente porque no puede considerar el flujo superficial de agua que realmente se produce debido a la pendiente de la tabla de riego. En este sentido sería muy útil acoplar un modelo para predecir la escorrentía superficial a lo largo de la melga de riego en periodos de lluvia intensa y así poder definir una condición de contorno adecuada en las modelaciones realizadas con el código HYDRUS-1.

Jiménez-Martínez et al. (2009) realizaron un trabajo en zonas semiáridas y áridas bajo riego por superficie donde determinan la importancia que adquiere el conocimiento preciso de la recarga de las aguas subterráneas en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Se aplicó sobre el Campo de Cartagena, al sureste de España, donde se observó que el flujo por retorno de riego representa una parte importante de la percolación. El trabajo estima el flujo de retorno del riego a partir de la aplicación del modelo HYDRUS-1 en la zona de raíces, determinando la evapotranspiración y la dinámica de la humedad del suelo para cultivos de melón y lechuga. El modelo se calibró usando datos de campo recogidos en una parcela experimental, alcanzando buenos resultados.

De manera más general, la aplicación del modelo HYDRUS-1 en la zona de la raíz obtiene buenos resultados para estimar la recarga en regiones semiáridas, en relación a otras técnicas.

El modelo requiere de la utilización de parámetros del cultivo y del suelo, datos fácilmente obtenibles de base de datos existentes o mediante herramientas de estimación. Por ejemplo, los mapas de textura del suelo y propiedades físicas del suelo son datos que pueden encontrarse fácilmente, los parámetros hidráulicos del suelo pueden estimarse utilizando funciones de pedotransferencia o enfoques relacionados. Del mismo modo, los parámetros de estrés de agua para muchos cultivos importantes han sido tabulados (por ejemplo, Kroes y van Dam, 2003), lo más dificultoso de uniformizar son las prácticas de riego que se realizan en el área, las cuales pueden ser diferentes a lo largo de la región.

Karimov et al. (2014) analizaron el efecto de la capa freática poco profunda sobre el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* L.) en las tierras de regadío del valle de Fergana, aguas arriba del río Syrdarya, en Asia Central. Las simulaciones numéricas que se realizaron a través del HYDRUS-1 demuestran que aumenta el aporte del agua freática poco profunda a la evapotranspiración y disminuye con el aumento de aplicaciones de riego. En condiciones de riego, la evapotranspiración se asocia principalmente con un aumento de la pérdida por evaporación, causando una acumulación de salinidad en la zona radical del cultivo. Promover el uso de las aguas subterráneas para el riego cuando el nivel freático es poco profundo, es aconsejable para lograr el ahorro de agua a partir del cambio en el patrón de cultivos. Los resultados del estudio sugieren que las contribuciones de la capa freática poco profunda a la evapotranspiración del cultivo depende en gran medida de los regímenes de riego y las prácticas de manejo de tierras y agua. Bajo condiciones de déficit de riego, en suelos francos, los aportes de flujo provenientes de capas freáticas poco profundas superan el 60% de la evapotranspiración total del cultivo, a diferencia de situaciones con aporte de riego, donde los flujos que aporta la capa freática son pequeños, incluso cuando el nivel freático está a 1.5 m de profundidad de la superficie del suelo. La fracción de evaporación referida a la evapotranspiración del cultivo es mínima y la fracción de transpiración máxima para altos déficit de riego bajo capa freática poco profunda. Las pérdidas por evaporación aumentan cuando el nivel freático se eleva y se aplica riego en el área, convirtiéndose en una fuente de acumulación de salinidad en la zona radical de los cultivos. La evapotranspiración es identificada como un factor clave de la salinidad de las aguas subterráneas, Humphries, M.S. et al. (2011) apoyaron este hallazgo. Los resultados de este Karimov et al. (2014) sugieren dos enfoques alternativos: el primer enfoque sería aumentar la intensidad de drenaje, lo que permitiría mantener los niveles de salinidad adecuados en la zona radical de los cultivos, pero generaría retornos de flujo al río en la temporada de invierno, cuando los embalses están llenos. El segundo enfoque es el cambio de canales de riego por el aporte del agua subterráneas, el aumento de la extracción de agua subterránea abastecerá la demanda de

riego de un sistema de cultivo intensivo en el valle de Fergana, ahorrando los flujos superficiales para que lo usen otros usuarios.

Satchithanatham et al. (2014) realizaron un trabajo al sur de Winkler- Manitoba, donde se intentó conocer el patrón de absorción de agua de los cultivos y el movimiento del agua del suelo dentro de la zona de las raíces de manera de realizar un diseño óptimo de los sistemas de riego y drenaje. Para esto se monitoreó la redistribución de agua del suelo en la zona de las raíces de papa después de la aplicación del riego, además de cuantificar la contribución de las aguas subterránea poco profundas a dicho cultivo. Las mediciones del contenido de agua en el suelo, se llevaron a cabo antes del riego y en intervalos periódicos, y el nivel de la capa freática fue medido cada 3 horas. El contenido de agua del suelo y el aporte de las aguas subterráneas se simuló utilizando el modelo HYDRUS-1 y los resultados se compararon con el cambio en los niveles de agua subterránea. Las capas de suelo ubicadas a profundidades menores mostraron signos de secado mientras que las capas más profundas se mantuvieron húmedas. Las simulaciones obtenidas de los modelos coinciden estrechamente con el contenido de agua del suelo y el aporte de agua subterráneo medido. Se pudo determinar que para un suelo franco arenoso fino, hasta el 92% de la demanda de agua del cultivo fue compensada por el ascenso capilar de la capa freática poco profunda. Conocer la contribución freática superficial puede disminuir la cantidad de agua de riego aplicada y ahorrar agua y energía necesaria para el bombeo.

En síntesis, la revisión realizada permitió conocer algunas de las aplicaciones de los distintos modelos de simulación sobre diferentes zonas de regadío, la metodología utilizada y las conclusiones alcanzadas.

El modelo que se aplicará en este trabajo será el HYDRUS-1 ya que permite describir y cuantificar las variaciones de humedad del perfil a lo largo del tiempo cuando interactúan componentes como la recarga por precipitación o riego, la evapotranspiración, la absorción de raíces, la profundidad de la capa freática, la presencia de sales, el tipo de suelo, entre los más importantes. Asimismo se puede conocer cómo varían en el tiempo los procesos de capilaridad y percolación.

El análisis conjunto de estas variables permitirá realizar una programación de riego óptima y en función de las necesidades reales del cultivo.

2.4. MODELO DE OPTIMIZACION

Antiguamente los proyectos de planificación hidrológica analizaban únicamente su viabilidad de ejecución a partir de la componente económica. Con el correr del tiempo y el aumento de la población, para la misma disponibilidad de recursos, se incluyó en el análisis los intereses de

la sociedad y las implicancias del mismo sobre la calidad del medio que afecta. Este cambio de rumbo exigió que los encargados de la planificación analicen cuidadosamente el espectro de alternativas posibles para arribar a aquella que no solo sea óptima económicamente sino además que incluya otros aspectos (sociales, ambientales, ecológicos, etc.).

Existen dos tipos de modelos que se pueden aplicar en problemas de planificación: de simulación y de optimización. La diferencia entre ambos radica en que los modelos de simulación reproducen la dinámica de un sistema, mientras que el de optimización busca diseñar el mejor sistema (Helweg, 1992).

Los algoritmos de optimización incluyen técnicas de cálculo y álgebra matricial, tales como programación lineal, dinámica, cuadrática, geométrica, multiplicadores lagrangianos, etc., que permiten seleccionar aquella alternativa más conveniente según la maximización o minimización de una función objetivo.

Las desventajas que poseen los modelos de optimización, es que conllevan procesos muy laboriosos, planteos donde se realizan importantes simplificaciones y a menores niveles de detalle que los resultados de un modelo de simulación (Andreu, 1992).

En relación a publicaciones que aplicaron modelos de optimización a los Distritos de Riego se puede mencionar el trabajo de Ortega-Gaucin et al. (2009) quienes utilizaron técnicas de programación lineal en el distrito de localizado en Delicias, Chihuahua, México. El modelo planteado permitió estimar la superficie de riego y el patrón de cultivos óptimo para incrementar los beneficios netos de los productores. Se analizaron cuatro escenarios posibles, tomando en cuenta la disponibilidad de volúmenes clave en las fuentes de abastecimiento de agua, así como dos eficiencias de conducción de la red de canales. Asimismo, se recomendó la implementación de un programa de revestimiento de canales y de mejoramiento de la operación de la red de distribución, de tal manera que se alcance la eficiencia de conducción esperada al finalizar las obras del Programa de Uso Sustentable del Agua en la Cuenca del Conchos (PUSACC).

Villavicencio et al. (2011) desarrollaron una metodología de trabajo que permite identificar y planificar el uso de los recursos hídricos en zonas de secano, haciendo uso de una base de datos con información de un conjunto de cuencas identificadas con el software ARCVIEW 3.2. Se usó un modelo de optimización no lineal que determinó el patrón de cultivo que maximiza el beneficio neto dado un conjunto de recursos y restricciones físicas, medioambientales y económicas. A través de un análisis de sensibilidad se encontró que las variables que más influyen sobre el beneficio neto son el precio de venta de los productos agrícolas, la disponibilidad de agua, la disponibilidad de mano de obra y la eficiencia del método de riego. Una estrategia adecuada de intervención en el secano es introducir especies que se adapten a

esta condición y utilizar el agua acumulada para dar riegos suplementarios en épocas de mayor demanda hídrica. Dentro de las conclusiones más importantes se puede señalar que la metodología desarrollada facilita el análisis, la toma de decisiones y la focalización de instrumentos y estrategias de planificación del uso de los recursos hídricos en zonas de secano. Inzunza López (2008) utilizó la herramienta de optimización lineal, para definir patrones de cultivo para los distritos de riego. Los algoritmos utilizados consideran la eficiencia de riego, la superficie disponible, los requerimientos hídricos de los cultivos, el volumen de agua disponible, y aspectos sociales, como los factores o restricciones que limitan la plena producción en los distritos. La optimización consiste en maximizar el ingreso neto y la productividad del agua de riego. El algoritmo usado, además, propone tecnologías para incrementar rendimientos: el uso de variedades adecuadas, nivelación de terrenos, técnicas de riego, diversificación de cultivos, entre otras. Como conclusiones se pueden mencionar que el método será confiable en la medida que los datos proporcionados se acerquen más a la realidad. Datos incongruentes los podemos encontrar en: láminas de riego; los que afectan el beneficio neto como precio de venta, rendimiento, costos y sobre todo los subsidios; y aquellos que forman restricciones en el programa lineal como son la superficie y el volumen disponible de riego.

Minjares et al. (2010) realizaron un trabajo sobre el Distrito de Riego del Río Yaqui, en el noroeste de México, donde en los últimos años se ha realizado un desarrollo agrícola no sustentable debido al establecimiento de una agricultura intensiva que, aunado a una prolongada sequía, colapsó al sistema en el año 2003. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un modelo interanual de simulación-optimización que permita crear una metodología cuantitativa y transferible que promueva el impulso de mejores prácticas sustentables en las actividades del distrito. También se definieron índices que explicaron los principales atributos sustentables del sistema y, con los resultados del estudio, se determinó en cada nivel de decisión quién y cómo llevarán a cabo dichas prácticas sustentables. El modelo anual de simulación-optimización hidrológico-agronómico-económico, desarrollado por Minjares et al. (2010), lo extendieron a un modelo interanual por medio de la conexión de los modelos anuales, incluyendo en la función objetivo criterios sustentables como productividad, confiabilidad, resiliencia, vulnerabilidad y equidad, para controlar la relación entre las decisiones tomadas en el presente y sus consecuencias a largo plazo. De acuerdo con los resultados obtenidos, el modelo puede ser usado para la elaboración del plan de riegos del distrito bajo diferentes escenarios de manejo a largo plazo, e identificar prácticas o decisiones que pongan en riesgo el desarrollo sustentable del sistema. Asimismo, el modelo puede usarse para evaluar políticas de manejo y decisiones que se han tomado en el pasado y

posibles conflictos por el agua en el futuro. Uno de las recomendaciones es asegurar cada año el agua necesaria para el establecimiento de toda la superficie regable con primeros cultivos y cuándo es factible usar sólo el agua disponible para segundos cultivos, esquema prioritario cuando se presenta un período de sequía. El escenario de manejo “Modelo 2” se caracterizó por no tener ningún año de falla, ya que en todos los años se logró sembrar el 100% de la superficie regable con primeros cultivos y el 9% de la superficie con segundos cultivos. Además se recomienda, dado que la productividad del agua en el sector agrícola es muy baja, experimentar con cultivos más rentables, explorar nuevos mercados y tratar de dar un valor agregado a los productos agrícolas para mantener la sustentabilidad socioeconómica del distrito.

En esta Tesis se utilizó, para resolver el problema de optimización lineal, el modelo LINGO 16.0, desarrollado por LINDO Systems Inc. Dicho modelo es una herramienta amigable y simple para formular problemas lineales y no lineales, resolverlos y analizar su solución. El resultado que LINGO proporciona la alternativa que obtiene el mejor resultado. Los datos de ingreso son la función objetivo, las variables de decisión a determinar y el conjunto de restricciones a cumplir. Uno de los rasgos más poderosos de LINGO es su aplicación en el lenguaje de modelo matemático, el cual permite expresar un problema de una manera muy similar a la anotación matemática tradicional, pudiendo también expresar una serie de restricciones en una declaración compacta. Otro aspecto es la sección de los datos, que permite aislar los datos de la formulación del modelo. De hecho LINGO puede leer datos incluso de una hoja de cálculo, base de datos o archivo de texto. Con datos independientes del modelo, es mucho más fácil de hacer cambios, y hay menos oportunidad de error cuando se realiza el modelo (Canizo et al., 2002).

2.5. REVISIÓN DE TRABAJOS REGIONALES

En este punto se revisaron trabajos realizados en la zona de estudio, Alto Valle de Río Negro y Neuquén-Argentina, sus investigaciones y conclusiones han resultado una importante contribución para el desarrollo de esta Tesis.

Montenegro (2013) realizó un trabajo cuyo objetivo principal consintió en analizar la fluctuación anual de los niveles freáticos y su incidencia en la sustentabilidad del agrosistema frutícola en “Colonia La Picasa”, ubicada en la jurisdicción de la ciudad de Cipolletti—Río Negro. Como objetivo específico propuso la elaboración de una base de datos a partir de un Sistema de Información Geográfico el cual permitió visualizar y analizar la

información relevada. Además se estimaron los requerimientos hídricos de los frutales de pepita (peras y manzanas) presentes en el área de estudio a través del programa WINISAREG, determinando un balance hídrico. Los resultados confirmaron la presencia de capa freática cercana a la superficie en todo el ciclo del cultivo; generando un ascenso capilar que llega a la zona de enraizamiento. Tal recarga del acuífero se debe a la baja eficiencia (37%) global del sistema, es decir, por percolación profunda en la aplicación del agua a la parcela (riego a "manto"), pérdida por filtración en los canales de distribución (Terciarios, Cuaternarios y Comuneros), y a la escasa funcionalidad de los desagües comuneros. También se comprobó que el área posee un drenaje natural restringido, ya que el acuífero no alcanza a descargar totalmente el exceso de agua que ingresa al sistema anualmente (27 % sin ser evacuado); la situación se traduciría en la elevación año a año del nivel del mismo. Dado que el WINISAREG contempla la componente del ascenso capilar, según la simulación realizada, hay un aporte capilar en todo el ciclo del cultivo de 161 mm, valor que en campo es mayor debido a que el software calcula tal contribución solo por debajo del umbral hídrico y con un valor constante en toda la duración del período el tiempo. En este trabajo se evidenció la limitación que posee el modelo WINISAREG (modelos de balance hídrico), por tal motivo en esta Tesis se intentó superar esta limitación aplicando un modelo dinámico (HYDRUS-1) que considera tanto el aporte capilar como la percolación profunda como procesos variables en el tiempo asemejándose al comportamiento real del sistema.

Montenegro et al. (2014) publicaron un trabajo denominado "Manejo del riego en un monte frutal con niveles freáticos críticos. Aplicación del modelo de balance hídrico WINISAREG" cuyo objetivo fue utilizar el modelo WINISAREG para observar su incidencia en el balance hídrico de un cultivo de manzanas *Malus domestica* B. cv. Cripp's Pink, temporada 2011-2012 en el Alto Valle de Río Negro. Se determinaron en el suelo las constantes hidrofísicas y se midieron humedad en la rizósfera y niveles freáticos. El modelo se implementó utilizando las mediciones de humedad a 40 y a 60 centímetros de profundidad, visualizándose la influencia del ascenso capilar en el balance hídrico. Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación del WINISAREG permite la evaluación y programación del riego en nuestra zona, dadas las condiciones de cercanía del nivel freático a la superficie, impactando de manera directa en los requerimientos hídricos de los cultivos. Dentro de las conclusiones a que arribaron los autores se puede señalar que el manejo del agua de riego actual es ineficiente, el exceso de agua utilizado se pierde por percolación profunda y tiene como consecuencia un impacto directo en la recarga del acuífero que eleva los niveles freáticos llegando a la zona de enraizamiento. Asimismo el modelo WINISAREG contempla la componente del ascenso capilar; la influencia de la freática se manifiesta en que la

disminución de riegos efectivamente realizados (30% aproximadamente de la frecuencia de riego óptima) no afecta el desarrollo del cultivo. Dadas las condiciones existentes de cercanía de la napa a la zona de enraizamiento, el aporte capilar es constante en toda la duración del período.

Requena et al. (1998) publicaron un trabajo realizado en la localidad de Vista Alegre Provincia del Neuquén, cuyo objetivo fue estudiar el efecto de distintos programas de riego localizado sobre el crecimiento, floración y producción de manzano. El experimento se efectuó durante 4 temporadas en un cultivo de manzano Red Delicious "Chañar 34" sobre pie franco, el diseño experimental consistió en bloques al azar, con tres tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos fueron aplicados en dos períodos: el primero, durante el crecimiento activo del fruto y el segundo, durante el crecimiento activo de la parte vegetativa. Después de estos periodos, los árboles fueron regados de igual forma. El mayor crecimiento vegetativo ocurrió en los primeros 70 días posteriores a plena floración (DDPF), mientras que el mayor crecimiento del fruto (78 % de su peso) se produjo entre los 70 de DDPF y cosecha. Cuando el déficit hídrico tuvo lugar durante el período de crecimiento activo del fruto no se observan diferencias significativas entre los tratamientos, sobre el crecimiento vegetativo y producción del manzano. Cuando el déficit hídrico alcanzo el 40 % sobre el marco de plantación y tuvo lugar en el período de rápido crecimiento vegetativo se observó una disminución del crecimiento vegetativo, una menor necesidad de poda, una mayor densidad floral y un menor peso medio del fruto.

Requena et al. (1994) realizaron un trabajo ubicado en la Estación Experimental INTA Alto Valle-Provincia de Río Negro, donde se compararon 3 frecuencias de riego superficial para determinar su influencia sobre el rendimiento, crecimiento vegetativo y conservación del fruto de un cultivo de peral cv Williams con una capa freática ubicada a 1.25 m de profundidad. El riego se aplicó durante el período de rápido crecimiento del brote en una cantidad de agua equivalente al 59 % (tratamiento A) , 39% (tratamiento B) y 20 % (tratamiento C) de la evaporación de un tanque clase A, calculada sobre el marco de plantación y durante el período de rápido crecimiento del fruto. Se aplicó el 80 % en los tratamientos A y C y 107 % en el tratamiento B. Dentro de las conclusiones se puede mencionar que no hubo diferencias entre los tratamientos lo que indica que el número de riegos del tratamiento C se puede reducir en las condiciones del ensayo. Es alentador tener la posibilidad de disminuir el número de riegos en los 60 días posteriores a plena floración (25/11) sin afectar significativamente el rendimiento, representando esto un ahorro de agua importante y una disminución en el efecto perjudicial de una capa freática poco profunda.

CAPITULO 3

SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA

3.1. INTRODUCCION

La toma de decisiones sobre la planificación de las actividades de un distrito de riego y sus módulos debe apoyarse en el conocimiento y análisis de la información que se genera en éstos, con la finalidad de aprovechar al máximo los recursos disponibles. Las actividades que se realizan en las diversas áreas técnicas de los distritos y módulos de riego, se programan y ejecutan de acuerdo con dos tipos de información: estadística (estadísticas agrícolas, hidrometría, plan de riegos) y planos temáticos. En el manejo del distrito de riego como un sistema de producción, es necesario considerar tres horizontes de tiempo: 1) Desarrollo histórico (evaluación), 2) Manejo en tiempo real (operación) y 3) Proyección de posibles cursos de acción (planeación). Una de las tecnologías para el manejo de la información son el empleo de los Sistemas de Información Geográfica, que permiten trabajar en forma integrada y organizada los datos geográficos (planos) y numéricos (estadísticas agrícolas, estudios diversos y caracterización genérica) con la finalidad de facilitar su almacenamiento, actualización, manipulación, análisis y su presentación en forma gráfica (Mejía-Saenz et al., 2002).

3.2. MATERIALES Y METODOS

Varios autores han señalado la importancia de mejorar la calidad de los servicios de los distritos de riego. Clemmens y Freeman (1987) analizaron cómo los distritos de riego influyen en el rendimiento de un proyecto de riego, teniendo en cuenta la importancia del flujo de información bidireccional entre el distrito y sus agricultores. Dedrick et al. (1989) propusieron el concepto del Programa de Mejoramiento de la Gestión como un procedimiento para desarrollar las capacidades de gestión y hacer cumplir las políticas de conservación del agua en un distrito de riego.

El Distrito de riego de Cipolletti posee un sistema de información geográfica en el marco del Proyecto INTA-AUDES-CONADEV¹ denominado “Aportes para mejorar la Operación de Distritos de Riego”, bajo la dirección del Ing. Juan Galeazzi y del cual, la que suscribe, fue integrante (Galezzi et al., 2011).

¹ INTA-AUDEAS (Asociación Universitaria de Enseñanza Agropecuaria Superior) - CONADEV (Consejo Nacional de Decanos de Facultades de Veterinaria).

Implementar el programa ADOR permitió incorporar al Distrito de Cicolletti² una estructura de base de datos concebida específicamente para comunidades de regantes con distintos tipos de sistemas de riego y distintos tipos de usos dentro del Distrito. El programa permite incorporar información de la red de riego, las parcelas regadas por cada uno de los canales terciarios y cuaternarios, el uso, cultivo y tipo de suelo que posee cada parcela, entre otros.

Los datos fueron proporcionados por el Distrito, información que fue volcada al Programa de Gestión de Distrito denominado ADOR. Cabe aclarar que el Distrito no posee la totalidad de la información, ya que hay ítems que aún no han sido relevados en su totalidad. A medida que vaya completando la información, ésta será actualizada en el programa ADOR.

3.2.1. ADOR –Características principales

El programa ADOR, financiado por el Plan Nacional de Investigación Científica y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) de la Unión Europea (UE), se ha creado para ayudar a la gestión del agua en las comunidades de regantes y facilitar la toma de decisiones en la modernización de regadíos y en la planificación de las campañas de riego. Fundamenta su trabajo en una extensa base de datos capaz de dinamizar los procesos de gestión facilitando además la facturación a través del control de consumos de agua y de energía, entre otros.

El programa puede ser usado en comunidades de regantes que tengan cualquier tipo de sistema de riego (superficie, aspersión o goteo) y cualquier tipo de red de distribución (canales o tuberías).

En la actualidad el programa se desarrolla y difunde con la colaboración de la Oficina del Regantes del Gobierno de Aragón.

El programa ADOR nació con el objetivo de dotar al sector de la agricultura de regadío de una herramienta de gestión en el sentido más amplio, que no sirviera solamente para realizar los cobros y pagos de los servicios sino que fuera capaz de gestionar el agua de riego, las propiedades y las infraestructuras.

ADOR posee tres componentes principales: (1) una estructura de base de datos completa; (2) un diagrama de la red de distribución de agua; y (3) un módulo GIS. Técnicamente, ADOR es Microsoft Access compuesta de 118 mesas interconectadas.

² Distrito de Cicolletti, de aquí en adelante referido como Distrito.

3.2.2. Datos de Ingreso

Comunidad de Regantes: El trabajo se inició ingresando los datos pertenecientes a la Comunidad de regantes tales como nombre, dirección localidad, teléfono, código postal además del banco con el cual trabaja el mismo.

Otros datos ingresados fueron latitud, longitud y altitud de la Estación Meteorológica instalada en el Distrito.

La inclusión de los datos bancarios corresponde a los números de cuentas corrientes que posee el Distrito para el cobro de por ejemplo el canon de riego a los productores. Cabe aclarar que en este caso no se tuvo en cuenta la opción de transferencia bancaria para el pago del canon, ya que el procedimiento difiere al que se realiza en España, lugar donde fue realizado este programa.

Usuarios: se incluye en este punto los datos personales de cada uno de los usuarios y/o Empresas que pertenecen al Distrito: nombre, apellido, domicilio, número de cuenta bancaria, entre los datos más importantes. Los datos correspondientes a cada una de los usuarios se pueden consultar a través de la apertura de cada uno de los formularios que contienen los datos de cada usuario o a través de una tabla que incluye la información de la totalidad de los usuarios. Se puede además realizar una búsqueda de usuarios con un criterio de búsqueda determinado, modificar o eliminar usuarios. La búsqueda se puede hacer a través por el primer apellido del usuario o del banco en el que tiene cuenta o ambos criterios a la vez. Se contabilizó en el Distrito un total de 993 usuarios y 1445 parcelas, el número no es coincidente dado que existen usuarios que son propietarios de más de una parcela.

Parcelas: para cada una de las parcelas del Distrito se ingresa: número de parcela, superficie catastral, superficie de riego, nombre del paraje y municipio donde está ubicada, sector hidráulico u hidrante al cual está unida la parcela, tipo de suelo, tipo de usos que se dividen en agrícola, industriales, ganaderos o urbanos. Al seleccionar alguno de estos 4 usos se abre una ventana donde se incluye el tipo de riego (aspersión, goteo, pivot, surco o melga) así como el tipo de cultivos presente en esa parcela. Cada tipo de riego incluye información acerca de longitud, ancho y pendiente de la melga, eficiencia estimada y si existe o no escorrentía.

Dentro del punto suelo se abre una ventana donde se deben ingresar datos tales como: profundidad, volumen elementos gruesos, densidad aparente, punto de marchitez permanente, capacidad de campo, salinidad.

Los datos correspondientes a cada una de las parcelas se pueden consultar a través de la visualización de los formularios que contienen los datos de cada parcela o a través de una tabla que incluye sintéticamente toda la información.

En esta ventana, como en el caso de usuarios se pueden realizar búsquedas ingresando nombre del propietario, tipo y uso de cultivo o datos catastrales de la parcela.

El programa permite modificar o eliminar datos de usuarios y/o parcelas del Distrito.

Red Hidráulica: en este módulo se grafican los elementos de la red que maneja el Distrito en forma directa. Estos elementos deben estar relacionados entre sí y con las parcelas (y sus usos) a las que le da servicio.

Se ingresan elementos primarios y secundarios. Dentro de los primarios se pueden encontrar: canales de riego, tuberías, drenajes, bombeos, embalse, aforadores, tomas, y como secundarios: arquetas, válvulas, ventosas, sifones, manómetro e hidrantes.

Al crear la red del Distrito en el sinóptico, solo se representan los elementos primarios, los secundarios se incorporan posteriormente.

El Distrito cuenta con una toma que extrae agua del canal principal y lo deriva al canal secundario que será el canal principal dentro del distrito, luego existen 6 canales terciarios y 18 cuaternarios.

Ingresando en cada unos de los canales estos poseen información referida a: material constitutivo, longitud, unidad de gestión a la que pertenece, sección hidráulica (caudal, base de fondo, talud, pendiente)

Se puede registrar si existió mantenimiento en cada canal, ingresando todas las actuaciones que se han realizado sobre la línea como fecha, tiempo insumido y costo.

De todos los elementos secundarios el más importante es el hidrante que representa una toma de agua de una acequia o una tubería a través de la cual el agua llega a la parcela. Este elemento no solo se relaciona con los elementos primarios de la red así como con las parcelas y los usos a los que se le proporciona el agua.

Una vez definido el número de hidrantes éste debe estar relacionado con las parcelas que riega, cabe aclarar que todas las parcelas deben estar asignadas a un hidrante de manera de poder realizar posteriormente las concesiones de agua para el uso elegido.

Unidad de Gestión: se define esta componente como aquella a la que se le suministra agua desde una toma. Esta se define en el momento que se va dibujando la red, puede ser que la misma realice los turnos por días completos o por horas, en el caso que se entregue el agua por horas se puede definir el horario en el que habrá disponibilidad de agua.

La información incorporada será: nombre de la unidad, tipo de unidad, horas de servicio y caudal máximo. El programa permite modificar los datos de la unidad de gestión.

Consumo de Agua: aquí se incluyen todas las herramientas que permiten realizar una correcta gestión del agua en cada Distrito.

En el caso de Distritos que distribuyan el turno en forma rotativa y progresiva se utiliza el punto “Gestor Peticiones y Concesiones” que permite generar concesiones de agua en forma repetida y periódica.

Cuando el sistema es de riego por turnos se utiliza la petición y concesión en forma conjunta, para que el regador conozca en ese momento de cuánta agua va a disponer.

Se ingresa el nombre de cada propietario e identifica el canal de donde se extraerá el agua, se ingresa el caudal y el día en que se hará la derivación, además se puede ingresar el tiempo en que se concederá el agua.

Definida cada una de las peticiones-concesiones estas podrán ser visualizadas en una tabla que contendrán los datos ingresados.

Contadores: este módulo se utiliza solo cuando el Distrito gestiona riego presurizado dentro del Distrito, situación que no se considera en este trabajo.

En el ADOR se pueden graficar múltiples opciones, estos gráficos permiten visualizar de forma clara y rápida la información ingresada en el programa. Algunos gráficos que se pueden mencionar son: superficie regable, comparativo superficie regable y catastral, gráficos de consumos totales y su evolución, comparativo petición-concesión, entre otros.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Resultados en pantalla

Los resultados de ADOR se presentan a través de las pantallas donde se visualizan la información de los distintos componentes, los gráficos y las planillas.

Distrito o Comunidad de Regantes: nombre, dirección localidad, teléfono, código postal del Distrito, además del banco con el cual trabaja el mismo (Figura 1).

Nombre Banco	Código Entidad	Sucursal	Cuenta Corriente	Principal	cuentacontable	Activa
IBERICA,JA	2085	3333	303333333333	Si		Si

Figura 1: Datos de la Comunidad de Regantes.

Latitud, longitud y altitud de la Estación Meteorológica instalada en el Distrito (Figura 2).

Latitud Estación meteorológica:	39	grados	1	minutos	0	segundos	S
Longitud Estación meteorológica:	67	grados	40	minutos	0	segundos	0
Elevación:	242						

Figura 2: Coordenadas estación meteorológica.

Usuarios: Primer apellido, Segundo apellido, nombre, domicilio, código postal, número de cuenta bancaria (Figura 3).

Usuarios Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Datos Personales

Identificador Usuario:

Identificador contable:

Primer apellido:

Segundo apellido:

Nombre:

NIF:

N.º de votos:

Contacto

Teléfono Principal:

Segundo Teléfono:

Calle y n.º:

Población:

Provincia:

C. P.:

Código Usuario:

Datos Bancarios

Nombre Banco	Código Entidad	Sucursal	Cuenta Corriente	activa	codnorma19

Nueva Cuenta
 Eliminar Cuenta
 Activar Cuenta
 Ver Cuenta

Registro de 993

Figura 3: Pantalla usuarios.

Consulta a través de tabla con todos los usuarios ingresados (Figura 4).

Consulta en Tabla de Usuarios Selección: Todas los Usuarios

usuario	Idcontable	NIF	Nombre Banco	Código Entidad	Sucursal	Cuenta Corriente
ACCASTELLO PABLO VICTORIO ,	4300912	15257771P				
ALONSO FERNANDEZ ANTONIO ,	4300779	15257577P				
AMAOLO Y PISTAGNESI ROBERTO ,	4300852	15257687P				
BELLINO JOSE ,	4300550	15257295P				
DIAZ NESTOR JULIO ,	4300101	15256713P				
ELCAM S.A. ,	4300186	15256817P				
FISCO DE LA PROVINCIA ,	4300926	15257796P				
GONZALEZ FRANCISCO ,	4300910	15257767P				
GUTIERREZ ALFREDO ,	4300961	15257843P				
MANNOZZI Y SALAZAR ,	4300130	15256752P				
MARTINEZ JOSE ANTONIO ,	4300821	15257646P				
RICH VALLEY S.A. ,	4300104	T15256717				
ROSAS LUIS ALBERTO ,	4300925	15257794P				
TOSCHI S.A.A.I.Y C. ,	4300860	T15257698				
TRES ASES S.A. ,	4300177	T15256806				
U.N.T.E.R. ,	4300469	15257173P				
"DOÑA ANTONIA SOCIEDAD ANONIMA".	4300387	T15257073				
(GUEKGUEZIAN CAMPILLAY MARIO CARL	4300949	15257828P				
(I.P.P.V. ,	4300310	15256973P				
ABORES DEL SUD S.R.L. ,	4300960	T15257841				
ACUÑA NOEMI ALEJANDRA ,	4300320	15256984P				
ADONIS JOSE ALFREDO	4300950	15256651P				

Figura 4: Listado de Usuarios de la Comunidad de Regantes.

PARCELAS: número de parcela, superficie catastral, superficie de riego, nombre del paraje y municipio donde está ubicada, sector hidráulico u hidrante al cual está unida la parcela, tipo de suelo, tipo de usos que se dividen en agrícola, industriales, ganaderos o urbanos (Figura 5).

Figura 5: Información de cada parcela de la Comunidad de Regantes.

Resumen de los datos de las parcelas de la Comunidad de Regantes (Figura 6).

Polígono	Parcela	Subparcela	Sup. Catas	Sup. Riego	1er Apellido	2nd Apellido	Nombre	Tipo Uso	Sup. Ag	Cultivo	Tipo Riego
100	30890	1810	7,8042	7,8042	OTERO VIVI			Agrícola	7,8042	Peral	Tablar
107	30891	1820	9,9999	9,9999	FERRAGUT			Agrícola	9,9999	<no asignad	Tablar
108	30892	1830	8,5935	8,5935	FERRAGUT			Agrícola	8,5935	<no asignad	Tablar
109	30893	1470	3,7541	3,7541	MAIONCHI			Agrícola	3,7541	<no asignad	Tablar
110	30894	1460	3,6777	3,6777	BALBOA MAI			Agrícola	3,6777	<no asignad	Tablar
111	30895	1450	3,4295	3,4295	SOLANA LAE			Agrícola	3,4295	Manzano	Tablar
112	30002	1901	19,32	19,32	MUNICIPALI			Agrícola	19,32	<no asignad	<no asignad
112	30896	1440	2,5914	2,5914	SOLANA LAE			Agrícola	2,5914	Manzano	Tablar
113	30003	1902	8,618	8,618	MUNICIPALI			Agrícola	8,618	<no asignad	<no asignad
113	30897	1430	5,6514	5,6514	SOLANA LAE			Agrícola	5,6514	Manzano	Tablar
114	30004	1903	9,091	9,091	DIMASI ILAR			Agrícola	9,091	<no asignad	<no asignad
114	30898	1420	2,933	2,933	SOLANA LAE			Agrícola	2,933	Manzano	Tablar
115	30005	1762	25,666	25,666	PARRILLI OS			Agrícola	25,666	<no asignad	<no asignad
115	30899	1401	0,1065	0,1065	MUNICIPALI			Agrícola	0,1065	<no asignad	Tablar
116	30006	1762	20,01496	20,01496	PARRILLI FR			Agrícola	20,01496	Manzano	Tablar
116	30900	1330	15,9041	15,9041	MONTERO D			Agrícola	15,9041	Manzano	Tablar
117	30007	1762	20,00533	20,00533	DOVIO RICA			Agrícola	20,00533	<no asignad	Tablar
117	30901	1410	7,1058	7,1058	SOLANA LAE			Agrícola	7,1058	Peral	Tablar
118	30008	1980	11,33811	11,33811	MUNICIPALI			Agrícola	11,33811	<no asignad	Tablar
118	30902	1320	10,0975	10,0975	IBAR MONTE			Agrícola	10,0975	<no asignad	Tablar
119	30009	1970	10,61882	10,61882	CARISTO LU			Agrícola	10,61882	Manzano	Tablar
119	30009	1970	10,61882	10,61882	CARISTO LU			Agrícola	10,61882	Manzano	Tablar

Figura 6: Tabla de parcelas de la Comunidad de Regantes.

Información del tipo de cultivo y nombre del usuario o propietario de la parcela (Figura 7).

Modificar Uso Agrícola

Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Identificadores Uso:

Código de Parcela: Parcela:

Polígono	Parcela	Subparcela	Sup. Riego
116	30006	1762	20,01496

Código Uso:

Tipo de Uso:

Datos Uso:

Superficie: Cultivo:

Coef Amortización: Variedad:

Usuarios Uso Parcela:

Usuario Arrendatario: PARRILLI FRANCISCO ALBERTO, Arrendatario

Usuario Pagador Agua: PARRILLI FRANCISCO ALBERTO, Pagador Agua

Usuario Pagador Gastos: PARRILLI FRANCISCO ALBERTO, Pagador Gastos

Datos Riego:

Tipo de Riego: Características del tipo de Riego

Pto Hidrante que Riega el Uso:

Cultivos Asignados:

Cultivo	Sup. Ag	Hidrante	Línea
Manzano	20,01496		

Figura 7: Información usos de las parcelas.

Datos de las características de la unidad de riego: longitud, ancho y pendiente. Eficiencia estimada y presencia de escorrentía superficial (Figura 8).

Consultar Riego Tablar

Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Riego Tablar

Identificador Riego:

Código Uso Asociado:

Datos Riego:

Longitud tablar medio (m): ¿Escorrentía? (Sí/No):

Anchura tablar medio (m): Eficiencia (%):

Pendiente tablar medio (%):

Figura 8: Dimensiones de las melgas.

Características del Suelo: volumen e elementos gruesos, densidad aparente, punto de marchitez permanente, capacidad de campo, salinidad (Figura 9).

Tipo de Suelo	
<input checked="" type="checkbox"/> Campos Obligatorios de Rellenar	<input type="checkbox"/> Campos de Uso de la Aplicación
Identificador Suelo:	
Código de Suelo	20
Datos Generales:	
Unidad	
Descripción	Sauzal
Características:	
Profundidad (cm)	160
Volumen elementos gruesos (%)	-
Densidad aparente (g/cm3)	1.42
Punto de marchitez (%)	3.14
Capacidad campo (%)	30.51
Salinidad (dS/m)	-
CRAD (mm)	

Figura 9: Características del suelo de la parcela.

Red de riego: descripción y distribución toma de riego, canales secundario, terciarios y cuaternarios (Figura 10).

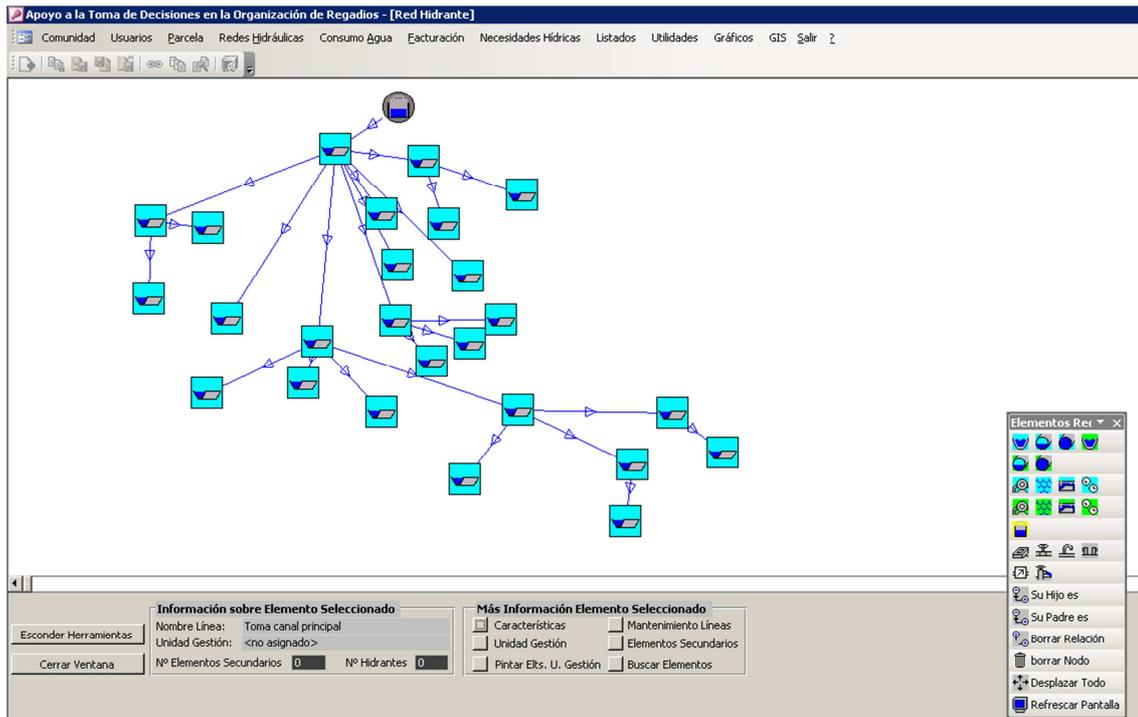


Figura 10: Esquema distribución red de riego.

Información del mantenimiento realizado en cada canal o línea: fecha, tiempo insumido y costo (Figura 11).

Introducir Actuaciones Mantenimiento

Actuaciones Mantenimiento Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Identificadores Actuación

Código de Actuación: 2

Código Elemento de Red: 29

Línea	Descripción Elemento Red	Longitud E	Nombre Material
II 6 0	Canal	2588	Sin Revestir

Datos Actuación

Fecha Realización Actuación: 18/06/2015

Tipo de Elemento: primario

Código Servicio Realizado: Servicio

Tiempo Invertido Actuación (h): 0

Coste de la Actuación: 0.00 €

Fecha Siguiete Actuación: 18/06/2015

Incidencias Actuación:

Actuaciones Realizadas

Fecha Realización	Nombre Servicio
-------------------	-----------------

Figura 11: Pantalla para ingresar los datos del mantenimiento de cada elemento de la red de riego.

Se vinculan todas las parcelas que son regadas por el canal terciario o cuaternario, el tipo de material del canal y el caudal máximo que transporta (Figura 12).

Modificar Elementos Secundarios de Red

Características Secundarios Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Identificador de Elemento Secundario

Código Elemento: 16

Código Línea: 29

Elemento Secundario: Hidranter

Nombre Elemento: HII60

Características de Elemento Secundario

Material: Hormigón con Camisa de Ace

Orden en Línea: 1

Características Punto Hidranter

Código Hidranter: 15

Tipo Hidranter:

Presión (atm) Max: 0.000 Nominal: 0.000

Caudal: 168.67 l/s 14573 m3/24h

¿Limitador de Caudal? ¿Regulador de Presión?

¿Contador? Fecha Alta: 24/01/2003

Descripción:

Nombre Telecontrol: 0

Relacionar Hidranter con Parcelas

Figura 12: Hidranter y parcelas asociadas.

Para vincular cada parcela se realiza una búsqueda, se selecciona y se asigna al hidrante correspondiente (Figura 13).

Relacionar Hidrantes

Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Relación Hidrante con Parcela:

Seleccionar Línea: II 60 Propietario:

Municipio: Polígono:

Seleccionar Hidrante: HII60 Parcelas: Nueva Búsqueda Parcela:

Nombre Municipio	Polígono	Parcela	Subparcela
cipolletti	100	30890	1810
cipolletti	107	30891	1820
cipolletti	108	30892	1830

Selección de Relación Hidrante - Parcela con un Uso:

Seleccionar Hidrante - Parcela:

Polígono	Parcela	Subparcela	Hidrante
398	30288	1766	HII60
404	30294	1765	HII60
412	30302	1764	HII60
415	30305	1763	HII60
419	30309	1761	HII60
425	30315	1761	HII60

Seleccionar Uso que Riega Hidrante - Parcela:

Uso	Sup. Ag	Cultivo	Tipo Riego
Agrícola	3	<no asignado>	Tablar
Agrícola	0.4679	<no asignado>	Tablar
Agrícola	1.4366	<no asignado>	Tablar
Agrícola	1.8986	<no asignado>	Tablar
Agrícola	0.598851	<no asignado>	Tablar
Agrícola	5.1378	<no asignado>	Tablar

Consulta Relaciones Hidrante - Parcelas - Usos:

Hidrante	Polígono	Parcela	Subparcela	Tipo Uso	Sup. Ag	Cultivo	Tipo Riego
HII60	398	30288	1766	Agrícola	3	<no asignado>	Tablar
HII60	404	30294	1765	Agrícola	0.4679	<no asignado>	Tablar
HII60	412	30302	1764	Agrícola	1.4366	<no asignado>	Tablar
HII60	415	30305	1763	Agrícola	1.8986	<no asignado>	Tablar
HII60	419	30309	1761	Agrícola	0.598851	<no asignado>	Tablar
HII60	425	30315	1761	Agrícola	5.1378	<no asignado>	Tablar

Figura 13: Pantalla de asignación de las parcelas al hidrante.

Nombre de la unidad, tipo de unidad, horas de servicio y caudal máximo. El programa permite modificar los datos de la unidad de gestión (Figura 14).

Consultar Unidad de Gestión

Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Unidad de Gestión

Seleccionar Unidad de Gestión: Unidades de Gestión: II Línea Seleccionada Unidad Gestión:

Datos Unidad de Gestión:

Identificador Unidad: 39

Nombre Unidad: II

Tipo Unidad: Días Completos

Datos Complementarios Unidad:

Horas de Servicio: 24

Hora Inicio Servicio: 00:00

Hora Fin Servicio: 00:00

Caudal Maximo: 17280 m3/24h 200 l/s

Tipo de Agua Servida por la Unidad: Riego a Pie

Líneas que Pertenecen a la Unidad de Gestión Seleccionada:

Línea	Descripción Elemento Red	Longitud Elemento Red
II	Canal	8857

Figura 14: Unidades de Gestión.

Consumo de Agua: Se pueden visualizar las peticiones de la totalidad de los usuarios del Distrito, fecha y caudal erogado (Figura 15).

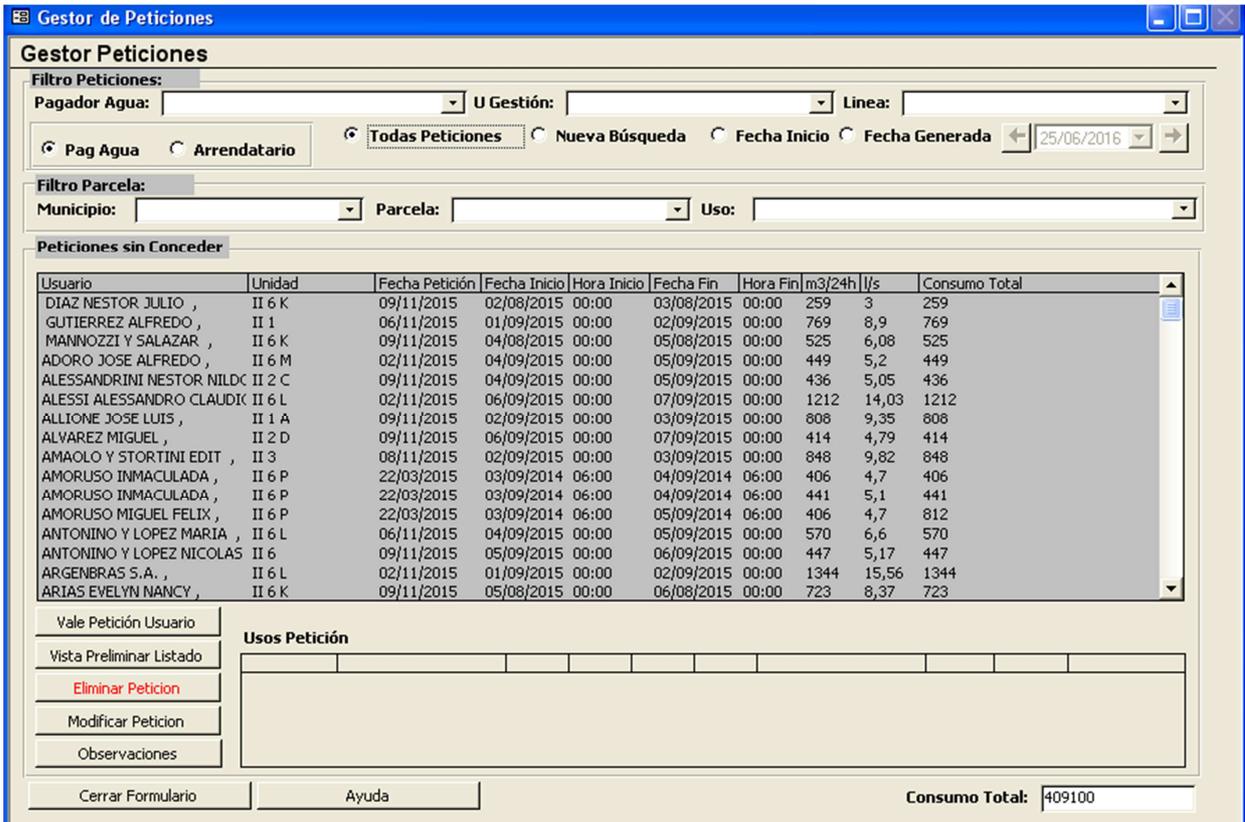


Figura 15 Asignación de riego a los propietarios de la Comunidad de Regantes.

Gráfico de Consumo de cultivos-Manzano (Figura 16).

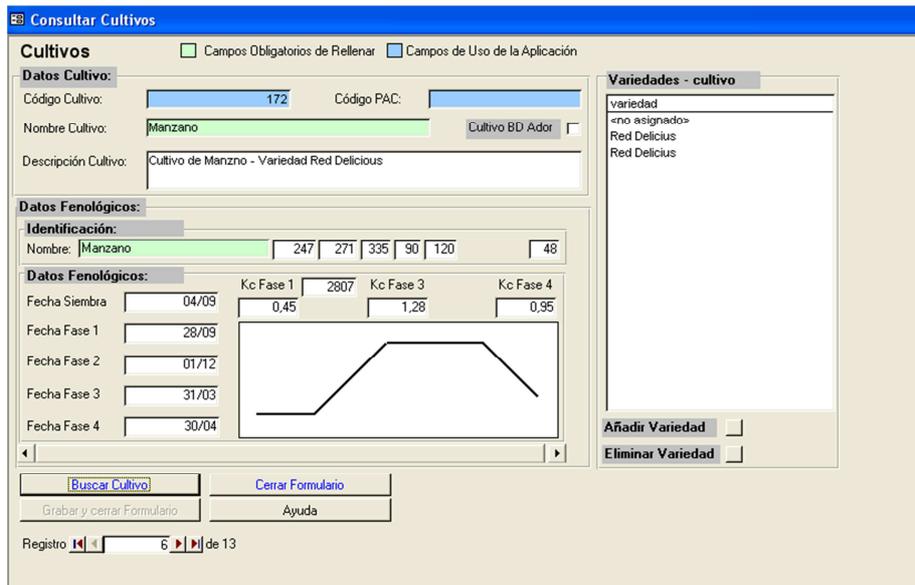


Figura 16: Datos del cultivo de Manzano.

Gráfico de Consumo de cultivos-Peral (Figura 17).

Consultar Cultivos

Cultivos Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Datos Cultivo:
 Código Cultivo: 174 Código PAC:
 Nombre Cultivo: Peral Cultivo BD Ador
 Descripción Cultivo: Cultivo de Peral-Variedad Packams

Datos Fenológicos:

Identificación:
 Nombre: Peral 246 265 364 74 120 48

Datos Fenológicos:
 Fecha Siembra: 03/09 Kc Fase 1: 2809 0,45 Kc Fase 3: 1,28 Kc Fase 4: 0,95
 Fecha Fase 1: 22/09
 Fecha Fase 2: 30/12
 Fecha Fase 3: 15/03
 Fecha Fase 4: 30/04

Variedades - cultivo
 variedad
 <no asignado>
 Packams

Añadir Variedad
 Eliminar Variedad

Buscar Cultivo Cerrar Formulario
 Grabar y cerrar Formulario Ayuda

Registro 12 de 13

Figura 17: Datos del cultivo de Peral.

Gráfico de Consumo de cultivos-Vid (Figura 18).

Modificar Cultivos

Cultivos Campos Obligatorios de Rellenar Campos de Uso de la Aplicación

Datos Cultivo:
 Código Cultivo: 171 Código PAC:
 Nombre Cultivo: Vid Cultivo BD Ador
 Descripción Cultivo: Cultivo Vid

Datos Fenológicos:

Identificación:
 Nombre: Vid 278 319 15 59 120 48

Datos Fenológicos:
 Fecha Siembra: 05/10 Kc Fase 1: 2806 0,30 Kc Fase 3: 0,78 Kc Fase 4: 0,45
 Fecha Fase 1: 15/11
 Fecha Fase 2: 15/01
 Fecha Fase 3: 28/02
 Fecha Fase 4: 30/04

Variedades - cultivo
 variedad
 <no asignado>
 Vinificar

Añadir Variedad
 Eliminar Variedad

Buscar Cultivo Graba y Cierra Formulario
 Restaurar Modificaciones Ayuda

Registro 13 de 13

Figura 18: Datos del cultivo de Vid.

El programa permite obtener múltiples salidas como se describen en el listado del punto 3.3.2. Solo se adjuntan algunos resultados correspondientes a los puntos 1, 10, 14, 15, 16, 17, 18 y 19 en el Anexo 3.

3.3.2. Listado de planillas y gráficos:

- 1) Esquema de la red de riego del Distrito de Cipolletti.
- 2) Listado de todos los propietarios y direcciones.
- 3) Listado de productores, datos de su parcela y superficie bajo riego.
- 4) Listado de propietario, Unidades de Gestión, líneas y parcelas
- 5) Listado de propietario, paraje, línea, superficie bajo riego.
- 6) Propietario, Línea, superficie bajo riego.
- 7) Listado de Propietarios y superficies.
- 8) Listado de consumo por riego, por cultivo y por turno.
- 9) Listado de consumo por fecha de riego en una línea y en una parcela.
- 10) Listado de paraje, parcelas y usos.
- 11) Listado de todas las parcelas.
- 12) Listado de Propietario, paraje, línea, hidrante y superficie.
- 13) Listado por hidrante de propietario, uso, parcela.
- 14) Listado de consumo por unidad de riego.
- 15) Listado por cultivo y superficie asignada a cada uno.
- 16) Listado de peticiones por propietario en el momento del riego.
- 17) Gráfico de barra de superficie regable por cultivo.
- 18) Gráfico de barra de superficie regable por hidrante.
- 19) Grafico de torta de superficie regable por hidrante.

3.4. DISCUSION

Dentro de las opciones de implementación de un GIS estaban el SIMIS, GISAREG y ADOR.

A partir de la revisión realizada en el Capítulo 2 se observó que el SIMIS es un programa complejo en el procesamiento de la información, el lenguaje utilizado en el Manual del usuario no es lo suficientemente claro y la inexistencia de pantallas de ayuda producen demoras e imposibilitan, en algunos casos resolver el problema. Asimismo no logra combinar las variables que les permite definir el turno de riego (Paoli, 2004).

En relación al GISAREG, como se decidió utilizar el HYDRUS-1, dado que los modelos basados en la ecuación de Richards son más precisos que los de balance de agua por no poseer supuestos simplificadores ni ecuaciones empíricas para describir algunos procesos, no tenía sentido usar un GIS que venga acoplado a un modelo de balance que no se iba a implementar.

En relación a la aplicación en este trabajo se observaron como dificultades el no poder utilizar el plano generado en ARGIS del Distrito dado que no se pudo compatibilizar la información cargada al ARGIS con los base de datos del Programa, resultando una restricción importante.

Otra limitación del programa es que permite definir la curva de variación del coeficiente de cultivo, para cada cultivo analizado, pero solo a efectos descriptivos, ya que esta información no es utilizada para el cálculo de los requerimientos hídricos que estos poseen.

Cabe aclarar que mucha de la información no está incluida en el SIG porque el Distrito aún no la ha relevado.

En esta Tesis se utilizó la primera versión de ADOR. Cuando la segunda versión del Programa ADOR esté disponible, se incorporarán los registros del Distrito de manera de mejorar las planillas, gráficos y planos (salidas) que sintetizan la información incorporada como base de datos del sistema. Esta posee algunas mejoras como por ejemplo potenciar el uso del sistema de información geográfica, realizar peticiones de agua, consultas de facturación y consumos y programaciones de riegos. Se refuerzan los informes, los gráficos, las estimaciones de eficiencia de riego y los mapas basados en el sistema de información geográfica.

CAPITULO 4 EVALUACIONES EN EL DISTRITOS DE RIEGO

4.1.INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego se implementan con el fin de cubrir las deficiencias hídricas de zonas áridas o semiáridas, permitiendo de esta manera incorporar nuevas zonas productivas.

No obstante, es fundamental el manejo que haga el agricultor, ya que su mal uso puede generar un efecto contrario al buscado, deteriorando el sistema productivo.

Dado que el agua representa un recurso escaso es importante realizar un manejo racional y eficiente sobre los cultivos, de manera de hacer mínima la diferencia entre el agua aplicada, desde la fuente de abastecimiento y la que necesita el cultivo.

La evaluación de un sistema de riego constituye la metodología que se utiliza par medir el grado de racionalidad en el manejo de riego. Israelsen y Hansen en 1962 dijeron “ningún hombre tiene derecho a desperdiciar el agua que otro hombre necesita”.

La eficiencia de riego no solo incluye la eficacia en cuanto al cumplimiento de los fines, sino que involucra también la cuantía del recurso agua utilizada (Grassi, 1998).

En este capítulo se analizaran las distintas eficiencias: distribución, aplicación a nivel de predio y a nivel de parcela, eficiencias de distribución y almacenaje a nivel de parcela. Estas darán un diagnóstico del funcionamiento real del sistema de riego del Distrito.

La eficiencia de distribución a nivel de Distrito, como se revisó en el Capítulo 2, posee diversos métodos para se determinación: directos e indirectos. Los primeros incluyen los métodos de estanque, de diferencias de caudales o de entradas y salidas y del permeámetro. Entre los segundos se puede mencionar los modelos empíricos, las imágenes infrarrojo y mediciones a partir de la resistividad eléctrica (Satlari, 2011).

La eficiencia de aplicación puede determinarse a nivel de predio o de parcela. Cuando se realiza el análisis de la eficiencia a nivel de predio, donde se considera la totalidad del establecimiento o parte de él, se necesita medir la lámina neta o consumida y, la lámina bruta o derivada.

En esta metodología se intenta medir la lámina consumida por el cultivo, por lo que es importante conocer el espesor de la rizósfera o la profundidad radical máxima a los fines de conocer el contenido de humedad (Grassi, 1998).

Varios autores definieron eficiencia de aplicación a nivel de parcela. Israelsen y Hansen (1962) reformularon el concepto como “una relación entre el volumen de agua almacenada en la capa de exploración radical durante el riego que luego es consumido o evapotranspirado y el agua derivada”. Jensen (Grassi, 1998) incluye en su definición la cantidad de agua utilizada para

lixiviar las sales del perfil, la definición se convierte en “la relación del volumen de agua de riego transpirada por las plantas más la evaporada por el suelo, más la necesaria para regular la concentración salina de la solución del suelo y aquella usada en la formación de los tejidos de la planta, con respecto al volumen total de agua derivada, almacenada o bombeada para riego”

La eficiencia de aplicación de riego se suele definir como “el porcentaje de agua bruta aplicada que es aprovechada para satisfacer las necesidades del cultivo y, las de lavado derivadas del uso del agua de mala calidad” (Santa Olalla et al., 2005).

Morabito et al. (2007) definieron la eficiencia de aplicación (*EAP*) y la eficiencia aplicación potencial (*EAPS*) que incluye además el balance salino del suelo.

Si se analiza la eficiencia de riego interna se puede incluir la eficiencia de distribución parcelaria (*EDI*) que expresa el grado de uniformidad en la distribución del agua en un área regada. Esta había sido definida anteriormente por Criddle et al. (1956) como la lámina media infiltrada en el cuarto más perjudicado respecto de la lámina media infiltrada en todo el perfil. Según Grassi (1998) la eficiencia de almacenaje se define como “la relación del volumen de agua disponible para regar la parcela respecto al volumen de agua derivado hacia el mismo sea superficial o subsuperficial con fines de riego”.

4.2. MATERIALES Y METODOS

4.2.1. DETERMINACION DE EFICIENCIAS

4.2.1.1 Eficiencia de distribución en los canales del sistema de riego:

La eficiencia de distribución en los canales terciarios y algunos cuaternarios que forman parte del distrito, se determinó por el método de diferencia de caudales o de entradas y salidas.

Para la determinación de la eficiencia de distribución se seleccionó en cada caso tramos rectos de longitudes que oscilaban entre 50 y 1000 m.

Para esto se utilizó un molinete hidrométrico SIAP magnético con 3 tipos de hélice, que se elegían según la velocidad de la corriente.

Las mediciones de las velocidades se realizaron sobre cada una de las verticales que se divide a la sección hidráulica, las mismas se determinaron por el método de un punto o dos puntos. En el método de un punto el molinete se ubica a una profundidad igual a 0.6 del tirante (profundidades menores de 1 m), y el de dos puntos a 0.2 y a 0.8 del tirante (profundidades mayores de 1 m) (Figura 1).

Definidas las verticales, la sección quedó dividida en subsecciones. El cálculo del caudal resulto de la sumatoria de los caudales parciales, obtenido como el producto entre la velocidad media

de la subsección por el área de la subsección (Ecuación 1). La velocidad media en la vertical, esta comprendida entre un error máximo de 3% y un error medio de 1% (King et al., 1995).

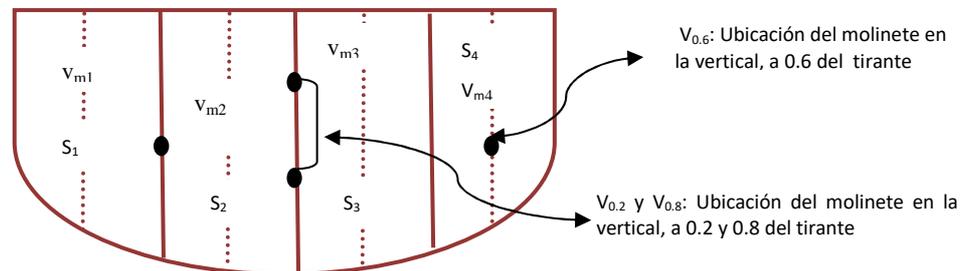


Figura 1: Sección hidráulica definida para el cálculo del caudal circulante.

El caudal total en una sección será:

$$Q = \sum_{i=1}^n S_i * v_{mi} \quad (1)$$

Donde:

Q : caudal total (m^3*s^{-1})

S_i : subsección i (m^2)

v_{mi} : velocidad media de la subsección i , calculada como el promedio de las velocidades entre las dos verticales que forman la subsección i ($m*s^{-1}$).

n : cantidad de subsecciones en que se divide la sección.

4.2.1.2 Eficiencia de Aplicación a nivel predio:

Esta eficiencia considera la totalidad del predio, los parámetros medidos para calcular la eficiencia global fueron: el tiempo de aplicación del riego, la superficie del predio, el caudal de ingreso y el tipo de suelo a partir del cual se determinarán las constantes hídricas.

Posteriormente se calcularon la lámina bruta y los valores de lámina almacenada tomando los límites superiores e inferiores de las constantes hídricas a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez del suelo (PMP) del suelo donde se ubica el predio utilizando la tabla página 99 libro Riego y sus Tecnologías (Santos Pereira et al., 2010).

Con esta información se calcularon las *láminas potenciales de reposición*, según estos límites definidos.

Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo de cierto valor umbral, el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda evapotranspiratoria y el cultivo comenzará a sufrir estrés, el porcentaje que permite mantener esta lámina de reposición es el umbral hídrico (UH) (FAO 56, 2006).

Posteriormente se calculó la lámina bruta como la obtenida en la Ecuación 2:

$$d_b = \frac{Q * t_{apl}}{A} \quad (2)$$

Donde:

d_b : lámina bruta (m)

Q : caudal aplicado ($m^3 * s^{-1}$)

t_{apl} : es el tiempo de aplicación (s)

A : área regada (m^2)

La *lámina de reposición potencial*, se obtuvo de la Ecuación 3:

$$\text{Lámina de reposición potencial} = d_p = \frac{(CC - PMP)}{100} * Prof.raíces * UH * \rho_a \quad (3)$$

Donde:

d_p : lámina de reposición potencial (m)

CC : capacidad de campo (%)

PMP : punto de marchitez permanente (%)

UH : umbral hídrico

ρ_a : densidad aparente (adimensional)

$Prof.raíces$: profundidad de raíces (m)

Con estas variables estimadas se definieron las *eficiencias de aplicación potencial (EAPS)* para ambos límites, que fueron promediadas para calcular la *lámina de reposición potencial promedio* (Ecuación 4).

$$EAPS = \frac{\text{Lámina de reposición potencial}}{\text{Lámina bruta}} \quad (4)$$

4.2.1.3. Eficiencia de Aplicación, Almacenaje y Distribución

a nivel de parcela sin desagüe al pie:

La eficiencia de aplicación (EAP) según Grassi (1998) se define como el cociente entre el volumen de agua almacenado en el perfil de suelo y el volumen de agua, aplicado en la parcela, o también definida como el cociente entre la lámina de reposición y lámina bruta (Ecuación 5).

$$EAP = \frac{\text{volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{volumen de agua aplicada}} * 100 \quad (5)$$

Para determinar la lámina de agua consumida por el cultivo, es importante conocer el espesor de la rizósfera, a partir de allí la lámina se estima de la Ecuación 6:

$$d_r = \frac{(CC - HA)}{100} * Prof.raíces * \rho_a \quad (6)$$

Donde:

d_r : lámina de reposición (m)

CC: capacidad de campo (%)

HA: humedad actual (%)

ρ_a : densidad aparente (adimensional)

Prof.raíces : profundidad de raíces (m)

El agua aplicada o lámina bruta se determina a partir de la Ecuación 7:

$$d_b = \frac{Q * t_{apl}}{A} \quad (7)$$

Donde:

d_b : lámina bruta (m)

Q: caudal aplicado ($m^3 * s^{-1}$)

t_{apl} : es el tiempo de aplicación (s)

A: área regada (m^2)

$$EAP = \frac{\text{volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{volumen de agua aplicada}} * 100 = \frac{d_r}{d_b} \quad (8)$$

Si analizamos la eficiencia de riego interna en la parcela (*EDI*), esta ha sido llamada también Uniformidad de Distribución (*UD*) (Merriam y Keller, 1978) y definida como la Ecuación 9:

$$UD = \frac{\text{lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado}}{\text{lámina infiltrada promedio en todo el perfil}} = \frac{\overline{d_{(1/4)}}}{\overline{d}} * 100 \quad (9)$$

Donde:

\overline{d} : lámina infiltrada promedio en todo el perfil (o promedio de los pluviómetros en aspersión) (m).

$\overline{d_{1/4}}$:lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado (o promedio de pluviómetros del cuarto más perjudicado en aspersión) (m).

La eficiencia de almacenaje en la parcela (*EAL*), según Grassi (1998), se define como “la relación del volumen de agua disponible, para regar la parcela, respecto al volumen de agua derivado ya sea superficial o subsuperficial” (Ecuación 10). Expresa el grado de suficiencia del riego, evaluado en la capa de suelo que exploran las raíces (Grassi, 1998).

$$EAL = \frac{\text{Volumen de agua infiltrada y almacenada}}{\text{volumen de agua requerida (o almacenable)}} * 100 \quad (10)$$

Unos de los ensayos que se deben realizar, antes de la evaluación propiamente dicha, es el de infiltración en la parcela. Este ensayo se realiza mediante el método de doble anillo, el cual permitirá determinar los parámetros de la ecuación de Kostiakov (Kostiakov, 1932).

Posteriormente se realizará un ensayo de riego que permitirá determinar la curva de avance y receso colocando estacas a lo largo de la melga, espaciadas 10 metros, donde se mide el tiempo de avance y receso en cada una de ellas. Se presenta un ejemplo de cálculo en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos de una evaluación de riego en parcela sin desagüe al pie.

Distancia(m)	Tiempo (min)			Lámina (mm)	
	Avance	Recesión	Contacto	Infiltrada	Ajustada
0	0	127	127	153.1	175
10	1.2	127	125.8	152	173.7
20	3.8	128	124.2	150.5	172
30	7.6	127.5	119.9	146.4	167.3
40	12.5	129	116.5	143.15	163.6
50	18.4	128	109.6	136.5	156
60	25.2	128.5	103.3	130.3	148.9
70	32.8	129	96.2	123.3	140.9
80	41.3	129.5	88.2	115.2	131.7
90	50.6	130	79.4	106.15	121.3 *
100	60.6	130	69.4	95.6	109.2 *
110	71.4	130.5	59.1	84.3	96.4 *
Valores medios :			101.55	128.0	146.3

* Cuarto menos infiltrado

Con el tiempo de avance y recesión se calcula el tiempo de contacto o tiempo de oportunidad de la infiltración en cada estaca, y la lámina infiltrada, reemplazando el tiempo de contacto en la ecuación de infiltración. Asimismo se calcula el tiempo de contacto promedio, la lámina infiltrada promedio y la lámina bruta (lámina aplicada a la parcela). Se compara la lámina bruta y la lámina infiltrada promedio, si son distintas se debe corregir el valor de k de la fórmula de Kostiakov a partir de la Ecuación 11:

$$k = \frac{d_b}{\bar{t}_c^n} \quad (11)$$

Donde:

d_b : lámina bruta (m)

\bar{t}_c^n : tiempo de contacto promedio (min)

Con el valor de k corregido se reescribe la ecuación de infiltración. Finalmente se calcula la lámina ajustada reemplazando en la ecuación de Kostiakov corregida (Tabla 1).

Ensayos a campo:

Las dos ensayos de aplicación a nivel parcelario se realizaron en la Facultad de Ciencias Agrarias y en la Estación del INTA Estación Experimental Alto Valle. La selección de estos sitios se debió a que ambos poseen infraestructura adecuada y personal disponible para colaborar en estas actividades.

Además, en esta Tesis, se presentan los resultados de una tercera evaluación, que se realizó en el año 2003 en un Taller de riego realizado por la cátedra de Hidráulica e Hidrológica Agrícola de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Comahue.

Antes de iniciar los ensayos de riego se extrajeron muestras de cada melga a 20, 40 y 60 cm de profundidad con el objetivo de determinar la humedad actual mediante un ensayo realizado en el laboratorio de suelos (método gravimétrico).

Se realizaron ensayos de infiltración en la cabecera y al pie de la melga, los cuales permitieron determinar la curva de Kostiakov, que relaciona la velocidad de infiltración y el tiempo.

Se determinó el tiempo de aplicación como el que transcurre entre que el agua ingresa a la melga hasta que llega al final de ella. El caudal de ingreso a la melga se midió con un aforador ubicado sobre la acequia que riega la parcela.

Posteriormente se colocaron estacas cada 10 m a lo largo de la melga, con el fin de determinar el tiempo de avance (momento el que el agua llega a cada estaca) y el tiempo de receso (momento donde el agua desaparece de cada estaca).

A partir de dichos tiempos se obtuvo el tiempo de contacto o de oportunidad, tiempo que permitirá determinar la lámina infiltrada en cada punto.

La lámina bruta se estimó a partir del caudal ingresado, el tiempo de aplicación y el área de la melga.

Además se midió, en los freáticos ubicados en la cercanía de las parcelas evaluadas, la profundidad a que se encontraba la capa freática.

4.2.2. CALIBRACIÓN DE LAS COMPUERTAS DEL DISTRITO:

Una compuerta es una placa móvil, que al moverse verticalmente permite graduar la altura del orificio que se va descubriendo en su parte inferior, controlando la descarga producida. El orificio que forma la compuerta generalmente se encuentra en el fondo del canal y por lo general coincide con el ancho de éste. El caudal que fluye bajo la compuerta puede analizarse mediante una red de flujo.

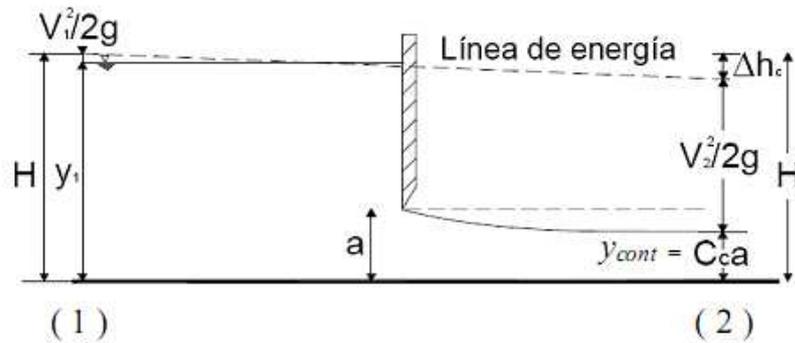


Figura 2: Calibración de compuerta.

Como se muestra en la Figura 2, el agua al pasar bajo la compuerta sufre un efecto de contracción. La profundidad del agua en la sección contraída será igual al producto de la apertura de la compuerta (a) por un coeficiente de descarga (C_d) que incluye un coeficiente de contracción, y un coeficiente de corrección por velocidad, dado que las propiedades geométricas de la abertura tienen un importante efecto sobre el flujo.

Para calcular el caudal que fluye bajo la compuerta será necesario aplicar la ecuación de energía entre las secciones aguas arriba de la compuerta, sección 1, y la sección 2 localizada en la profundidad contracta, despreciando la pérdida de energía por la compuerta (Ecuación 12) (Acevedo Netto y Acosta Álvarez, 1975).

$$y_1 + \frac{v_1^2}{2g} = a C_c + \frac{v_2^2}{2g} + \Delta h_c \quad (12)$$

Donde:

y_1 : tirante aguas arriba (m), v_1 : velocidad aguas arriba ($m*s^{-1}$), g : aceleración de la gravedad ($m*seg^{-2}$), a : apertura de la compuerta (m), C_c : coeficiente de contracción, v_2 : velocidad aguas arriba ($m*s^{-1}$), Δh_c : pérdida de carga (m).

La ecuación de continuidad aplicada entre las secciones transversales 1 y 2 consideradas de ancho unitario, se expresa como la Ecuación 13:

$$v_1 = \frac{a C_c}{y_1} v_2 \quad (13)$$

Donde:

y_1 : tirante aguas arriba (m), v_1 : velocidad aguas arriba ($m*s^{-1}$), a : abertura de la compuerta (m), C_c : coeficiente de contracción, v_2 : velocidad aguas arriba ($m*s^{-1}$)

Considerando que el coeficiente de descarga C_d es igual a $C_c * C_v$ y como el coeficiente de velocidad es $C_v \approx 1$, sustituyendo en la ecuación de energía y expresándola en función al caudal se tiene la Ecuación 14:

$$Q = C_d * b * a * \sqrt{2 * g * (y_1 - a/2)} \quad (14)$$

Donde:

Q : caudal (m^3*s^{-1}), y_1 : tirante aguas arriba (m), a : abertura de la compuerta (m), b : ancho de la compuerta (m), C_d : coeficiente de descarga, g : aceleración de la gravedad ($m*seg^{-2}$).

Para realizar la calibración se abre la compuerta y se mide la apertura del fondo del canal a la parte inferior de la compuerta (a), así como el ancho de la compuerta (b). Se deja que se estabilice con un determinado gasto, y posteriormente se mide el tirante aguas arriba de la compuerta en el caso que sea libre o y_1 e y_2 en el caso que trabaje ahogada, se calcula el valor de caudal teórico. Simultáneamente se realiza la determinación del caudal aforando el canal con molinete hidrométrico u otro método de aforo.

En este trabajo se calibraron las principales compuertas del Distrito de manera de definir para cada una el coeficiente de descarga, valor que permitirá utilizar la compuerta como punto de aforo y obtener valores estimados de mayor exactitud

4.3. RESULTADOS

4.3.1. Eficiencia de distribución

La eficiencia de distribución se determinó sobre los canales terciarios y algunos cuaternarios del Distrito. Los cuaternarios elegidos se ubicaron en la parte sur del Distrito de manera de cubrir toda el área de estudio.

Los canales aforados para la determinación de dicha eficiencia fueron: terciario 1, terciario 2, terciario 3, terciario 4, terciario 5, terciario 6, cuaternario LKD6, cuaternario 2A y cuaternario A6. La Figura 3 muestra un esquema del Distrito de Riego de Cipolletti.

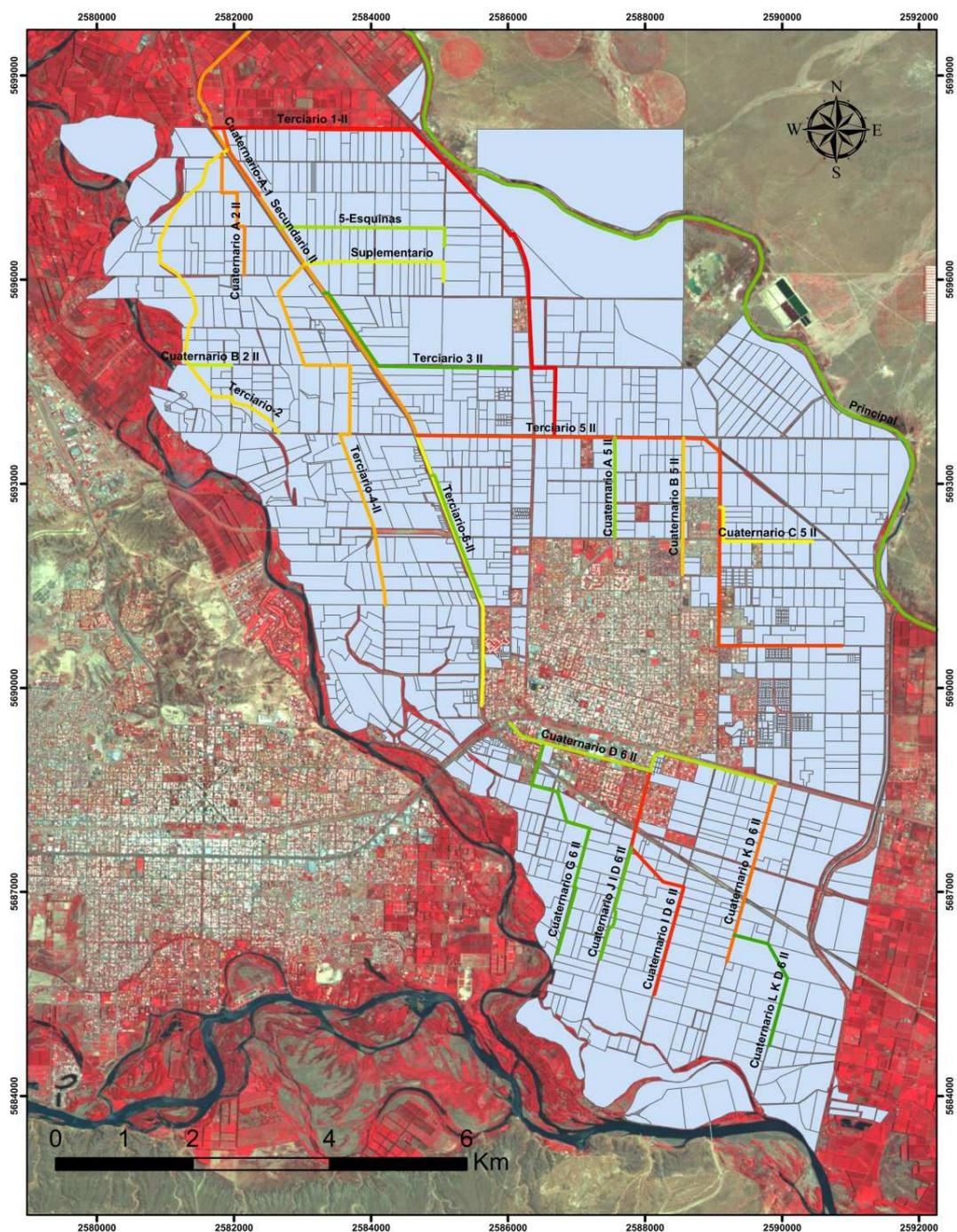


Figura 3: Ubicación de canales donde se determinó la eficiencia de distribución (Fuente: Distrito de Riego de Cipolletti).

En algunos canales resultó engorrosa la determinación del caudal, dado que las secciones del mismo no estaban bien definidas (Fotografía 1 y 2). Se debe recordar además que el error aumenta en canales de menores dimensiones.

Algunos canales terciarios son de poca extensión dado que a distancias menores se dividen en canales de orden menor, esto produjo que la longitud para la determinación de la eficiencia de distribución fuera fija y de valores menores de los establecidos inicialmente.



Fotografías 1 y 2: Aforos para determinación de la eficiencia de distribución.

En la Tabla 2 se presenta las determinaciones en cada uno de los canales seleccionados. La eficiencia de distribución promedio es de $0.033 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$.

Tabla 2: Determinación de la eficiencia de distribución en los canales terciarios y cuaternarios.

CANAL	CAUDALES AFORADOS ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	DISTANCIA ENTRE PUNTOS (m)	PERDIDA ($\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$)
Terciario 1	Caudal aguas arriba: $0.6228 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.622 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	L = 634	0.0012
Terciario 2	Caudal aguas arriba: $0.242 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.241 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	L = 70	0.014
Terciario 3	Caudal aguas arriba: $0.04235 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.042 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	L = 50	0.007

Terciario 4	Caudal aguas arriba: $0.43 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.423 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	L= 200	0.035
Terciario 5	Caudal aguas arriba: $0.396 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.328 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	L= 946	0.07
Terciario 6	Caudal aguas arriba: $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.052 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	L= 100	0.08
Cuaternario 2A	Caudal aguas arriba: $0.048 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.042 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	L= 235	0.025
Cuaternario LKD6	Caudal aguas arriba: $0.2482 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.2324 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	L= 330	0.047
Cuaternario A-6	Caudal aguas arriba: $0.0336 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ Caudal aguas abajo: $0.0315 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	L =130	0.016
Eficiencia de distribución en canales ($l \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$)			0.033

4.3.2. Eficiencia de aplicación a nivel global

Para su determinación los ensayos fueron realizados en las chacras de 2 productores pertenecientes al Distrito.

Ensayo a nivel global 1 – Productor Celeste

Se inició el riego el día sábado 3 de diciembre a las 9 hs y culminó el lunes 5 de diciembre a las 13 hs, alcanzando un tiempo de aplicación de 52 hs.

La superficie total regada fue de 47310 m^2 , con parcelas que poseen suelo franco-arcilloso y profundidad de raíces de 80 cm.

Las constantes hídricas de capacidad de campo (Φ FC) y punto de marchitez permanente (Φ WP) para dicho suelo son:

Límite inferior: Φ FC = 0.28 Φ WP = 0.16 Lámina = $(0.28-0.16) \cdot 1000 = 120 \text{ mm}$

Límite superior: Φ FC = 0.38 Φ WP = 0.22 Lámina = $(0.38-0.22) \cdot 1000 = 160 \text{ mm}$

$$Lam_{LimteInferior} = Lam \cdot Prof.raíces \cdot UH = 120 \cdot 0.8 \cdot 0.5 = 48 \text{ mm}$$

$$Lam_{LimteSuperior} = Lam \cdot Prof.raíces \cdot UH = 160 \cdot 0.8 \cdot 0.5 = 64 \text{ mm}$$

$$Lámina_{bruta} = \frac{Q \cdot t_{apl}}{A} = \frac{0.048 \cdot 52 \cdot 3600}{47310} = 190 \text{ mm}$$

$$\text{Eficiencia de Aplicación potencial (EAPS) - límite inferior} = \frac{48 \text{ mm}}{190 \text{ mm}} = 25\%$$

$$\text{Eficiencia de Aplicación potencial (EAPS) - límite superior} = \frac{64 \text{ mm}}{190 \text{ mm}} = 34\%$$

Eficiencia aplicación potencial promedio chacra Celeste : 30 %

Ensayo a nivel global 2 - Productor Gualtieri

El riego se inició el viernes 6 de diciembre a las 9 hs y se culminó el domingo 8 de diciembre a las 13 hs. De las 9 hs a las 18 hs del 6 de diciembre se regó con la compuerta 1 y de las 18 hs del 6 de diciembre al 8 de diciembre a las 13 hs se regó con la compuerta principal, alcanzando un tiempo de aplicación de 9 hs desde la compuerta 1 y 43 hs de la compuerta principal.

La superficie regada es 45900 m², con parcelas que poseen suelo franco-arcilloso-limoso y profundidad de raíces de 80 cm. Las constantes hídricas para dicho suelo son.

$$\text{Límite inferior: } \Phi \text{ FC} = 0.2 \quad \Phi \text{ WP} = 0.13 \quad \text{Lámina} = (0.2-0.13) * 1000 = 70 \text{ mm}$$

$$\text{Límite superior: } \Phi \text{ FC} = 0.3 \quad \Phi \text{ WP} = 0.19 \quad \text{Lámina} = (0.3-0.19) * 1000 = 110 \text{ mm}$$

$$\text{Lam. LimteInferior} = \text{Lam} * \text{Prof.raíces} * \text{UH} = 70 * 0.8 * 0.5 = 28 \text{ mm}$$

$$\text{Lam. LimteSuperior} = \text{Lam} * \text{Prof.raíces} * \text{UH} = 110 * 0.8 * 0.5 = 44 \text{ mm}$$

Lámina bruta:

$$\text{Volumen}_1 = Q * \text{Tapl} = 0.0388 * 9 * 3600 = 1257 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen}_2 = Q * \text{Tapl} = 0.0368 * 43 * 3600 = 5697 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen} = 1257 \text{ m}^3 + 5697 \text{ m}^3 = 6954 \text{ m}^3$$

$$\text{Lámina}_{bruta} = \frac{Q * \text{Tapl}}{A} = \frac{6954}{45900} = 152 \text{ mm}$$

$$\text{Eficiencia de Aplicación potencial (EAPS) - límite inferior} = \frac{28 \text{ mm}}{152 \text{ mm}} = 18\%$$

$$\text{Eficiencia de Aplicación potencial (EAPS) - límite superior} = \frac{44 \text{ mm}}{152 \text{ mm}} = 29\%$$

Eficiencia aplicación potencial promedio chacra Gualtieri : 24 %

4.3.3. Eficiencia de aplicación, almacenaje y distribución a nivel de parcelas – melgas niveladas sin desagüe al pie:

Ensayo 1- Realizado en el marco de desarrollo de esta Tesis

Lugar: Facultad de Ciencias Agrarias-Universidad Nacional del Comahue.

Fecha: 3 de diciembre de 2013

Caudal: 20 l*s⁻¹

Caudal unitario: 2.5 l*s⁻¹ m⁻¹

Número de melgas regadas simultáneamente: 2

Ancho de melgas: 4 m

Tiempo de Aplicación (t_{apl}): 67 min

Largo de melga: 80 m

Capacidad de campo (Φ FC) : 23 %

Punto de Marchitez Permanente (Φ WP): 13 %

Densidad aparente (D_{ap}): 1.35 gr*cm⁻³

Profundidad de raíces (*Prof.raíces*): 0.7 m

Humedad actual previo al riego (W_a) : 19 %

Pendiente General: 0.00001 m*m⁻¹

Se realizaron 3 ensayos de infiltración, sobre el cuadro donde se realizó la evaluación, los valores A y B de la ecuación de Kostiakov se obtuvieron como promedio de los valores obtenidos en cada ensayo (Tabla 3) (Fotografía 3 y 4).

Tabla 3: Parámetros de Kostiakov ensayo 1.

Nro de Ensayo	A	B
1	1.0928	0.6623
2	1.1954	0.5464
3	1.852	0.5349
Promedio	1.38	0.5812

La ecuación de infiltración acumulada será:

$$I_{cum} = A * t^B = 1.38 * t^{0.5812}$$

El valor de la velocidad de infiltración se presenta en la ecuación.

$$I \text{ (mm/min)} = (A * B) * t^{B-1} = a * t^b = (1.38 * 0.5812) * t^{0.5812-1} = 0.8021 * t^{-0.4188}$$

La infiltración básica se obtiene como la derivada de la función de infiltración:

$$I_b \text{ (mm/h)} = a * 60 * (-600 * b)^b = 0.8021 * 60 * (-600 * -0.419)^{-0.419} = 4.75 \text{ mm/h} \approx 0.2''/\text{h}$$



Fotografías 3 y 4: Ensayo de infiltración método de doble anillo.

A partir del valor de infiltración básica este suelo se puede clasificar como un suelo **franco arcilloso**, según la tabla de familia de curvas de infiltración de riego por superficie (Walker, 2003). La ecuación de Kostiakov-Lewis (K-L) de la familia 0,2''/h obtenida de la tabla de familias de Infiltración es:

$$Z \text{ (m}^3/\text{m)} = I_{cum} = k * t^a + f_0 * t + c = A * t^B + I_b * t + c = 0.00346 * t^{0.388} + 0.000057 * t$$

Para determinar las curvas de avance y receso se colocaron estacas cada 10 m sobre la melga analizada, y a partir de la apertura de la compuerta se midió el tiempo que demoraba el agua en llegar a cada una de las estacas, determinando los tiempos de avance sobre cada una, posteriormente se midió el tiempo en que el agua desaparecía del suelo definiendo el tiempo de receso (Tabla 4) (Fotografías 5, 6, 7, 8, 9 y 10).



Fotografía 5 y 6: Ensayo para determinar eficiencias de riego.



Fotografía 7: Ingreso del caudal de riego en la melga.



Fotografía 8: Determinación del tiempo de avance.



Fotografía 9: Pie de la melga.



Fotografía 10: Determinación del tiempo de receso.

Los valores obtenidos en el ensayo de presentan en la Tabla 4:

Tabla 4: Curva de avance ensayo 1.

Estaca	Distancia (m)	Melga 1 Avance (min)	Melga 2 Avance (min)
L0	0.0	0	0
L1	10.0	5.00	5.00
L2	20.0	12.00	11.00
L3	30.0	20.00	18.00
L4	40.0	29.00	27.00
L5	50.0	39.00	37.00
L6	60.0	47.00	45.00
L7	70.0	57.00	50.00
L8	80.0	67.00	60.00
Total	80.0		

Para estimar la curva de avance se graficaron los puntos de las dos melgas analizadas en un mismo gráfico obteniendo la ecuación de avance (Figura 4).

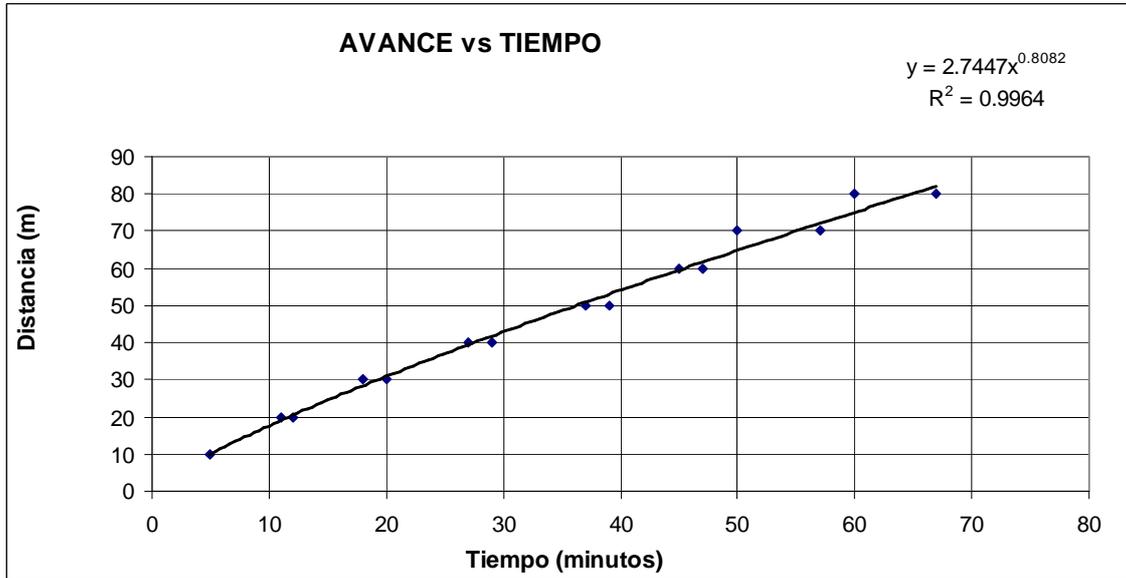


Figura 4: Función de avance ensayo 1.

El tiempo de receso se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5: Curva de receso ensayo 1.

Distancia (m)	Tiempo de receso (min)
0	290
10	375
20	375
30	375
40	520
50	520
60	520
70	640
80	640

Posteriormente se calculó la lámina de reposición o lámina consumida y la lámina almacenada en el perfil del suelo, según Ecuaciones 6 y 7. Cabe aclarar que la lámina infiltrada es igual a la lámina bruta dado que las parcelas son sin desagüe al pie donde el caudal de escurrimiento es igual a cero.

Lámina de reposición:

$$\text{Lámina de reposición} = \frac{(CC - HA)}{100} * \text{Prof.raíces} * \rho_a = \frac{(23 - 19)}{100} * 1.35 * 0.7 = 0.0756 \text{ m} = 37.8 \text{ mm}$$

Para determinar la lámina almacenada se comparó la lámina infiltrada con la requerida.

Para calcular la lámina bruta aplicada se midió el caudal ingresado, el tiempo de aplicación del agua sobre la melga y las dimensiones de la melga.

$$L_{bruta} = \frac{\text{Vol.ingresado}}{\text{Area}} = \frac{0.020 \text{ m}^3/\text{s} * 67 \text{ min} * 60 \text{ seg}}{4 * 80 * 2} = 125.6 \text{ mm}$$

$$L_{esc.} = 0 \text{ mm}$$

$$L_{infiltrada} = \frac{\text{Volumen entrada} - \text{Volumen salida}}{\text{Area}} = \frac{80.4 \text{ m}^3}{4 * 80 * 2} = 125.6 \text{ mm}$$

Los valores de lámina almacenada, infiltrada, y percolada en cada una de las estacas y un resumen de las eficiencias se presentan en las Tablas 6 y 7.

Tabla 6: Láminas almacenada, infiltrada y percolada ensayo 1.

Nº	Dist. (m)	Ta (min)	Tr (min)	Top (min)	Icum (mm)	Icum Aj. (mm)	dal (mm)	dper (mm)	Déficit (mm)	
1	0	0.00	290.00	290	37.0	98.8	38	60.8	0.0	
2	10	4.95	375.00	370	42.6	113.8	38	75.8	0.0	
3	20	11.67	375.00	363	42.2	112.6	38	74.6	0.0	
4	30	19.28	375.00	356	41.6	111.2	38	73.2	0.0	
5	40	27.52	520.00	492	50.3	134.3	38	96.3	0.0	
6	50	36.28	520.00	484	49.8	132.9	38	94.9	0.0	
7	60	45.45	520.00	475	49.2	131.5	38	93.5	0.0	
8	70	55.01	640.00	585	55.6	148.4	38	110.4	0.0	
9	80	64.89	640.00	575	55.0	147.0	38	109	0.0	
					Promedio:	47.4	125.6	38.0	87.6	0.0

Donde:

Dist. : distancia (m).

Ta: tiempo de aplicación (min).

Tr: tiempo de receso (min).

Top: tiempo de oportunidad o de contacto (min).

Icum: lámina de infiltración acumulada (mm).

Icum Aj.: lámina de infiltración ajustada (mm).

dal: lámina almacenada (mm).

dper: lámina percolada (mm).

Déficit: déficit de agua (mm).

Eficiencia de Aplicación:

$$EAP = \frac{\text{Lámina infiltrada y almacenada}}{\text{Lámina aplicada o bruta}} * 100 = \frac{38}{125.6} * 100 = 30\%$$

Eficiencia de Almacenaje:

$$EAL = \frac{\text{Lámina infiltrada y almacenada}}{\text{Lámina requerida / consumida (o almacenable)}} * 100 = \frac{38}{38} * 100 = 100\%$$

Eficiencia de Distribución:

$$UD = \frac{\text{Lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado}}{\text{Lámina infiltrada promedio}} * 100 = \frac{d(1/4)}{\bar{d}} * 100 = \frac{107.5}{125.6} * 100 = 86 \%$$

Tabla 7: Determinación de las evaluaciones de riego ensayo 1.

Cálculos de Eficiencias	(%)
Eficiencia de Aplicación Real (EAP)	30
Eficiencia de Almacenaje (EAL)	100
Eficiencia de Distribución (UD)	86
Pérdida por Percolación	70
Pérdida por Escurrimiento	0

Ensayo 2- Realizado en el marco de desarrollo de esta Tesis

Lugar: Estación Experimental INTA Guerrico

Fecha: 17 de noviembre de 2015

Caudal: 32 l*s⁻¹

Caudal unitario: 4 l*s⁻¹ m⁻¹

Número de melgas regadas simultáneamente: 2

Ancho de melgas: 4 m; Largo de melga: 110 m

Tiempo de Aplicación (t_{apl}): 60 min

Capacidad de campo (ΦFC) : 14 %

Punto de Marchitez Permanente (ΦWP): 6 %

Densidad aparente (D_{ap}): 1.55 gr*cm⁻³

Profundidad de raíces (Prof.raíces): 1.2 m

Humedad actual previo al riego (Wa) : 13 %

Pendiente General: 0.00001 m*m⁻¹

Se realizaron 2 ensayos de infiltración, uno en la cabecera de la melga y otro en el pie, sobre el cuadro donde se realizó la evaluación, los valores A y B de la Ecuación de Kostiakov se obtuvieron como promedio de los valores obtenidos en cada ensayo (Tabla 8) (Fotografía 11 y 12).

Tabla 8 : Parámetros de Kostiakov ensayo 2

Nro de Ensayo	A	B
1	4.39	0.8011
2	6.4	0.7344
Promedio	5.4	0.7678



Fotografía 11: Ensayo de Infiltración.



Fotografía 12 : Ensayo de Riego (avance).

La ecuación de infiltración acumulada será:

$$I_{cum} = A * t^B = 5.4 * t^{0.77}$$

El valor de la velocidad de infiltración se presenta a en la Ecuación.

$$I \text{ (mm/min)} = (A * B) * t^{B-1} = a * t^b = (5.4 * 0.77) * t^{0.77-1} = 4.16 * t^{-0.23}$$

Si obtenemos la infiltración básica como la derivada de la función de infiltración obtenemos:

$$I_b(\text{mm/h}) = a * 60 * (-600 * b)^b = 4.16 * 60 * (-600 * -0.23)^{-0.23} = 80 \text{mm/h} \approx 3''/\text{h}$$

A partir del valor de infiltración básica este suelo se puede clasificar como un suelo **arenoso**, según la tabla de familia de curvas de infiltración de riego por superficie (Walker, 2003).

La ecuación de Kostiakov-Lewis (K-L) de la familia 2, 3''/h obtenida de la tabla de familias de Infiltración es:

$$Z(\text{m}^3/\text{m}) = I_{cum} = k * t^a + f_0 * t + c = A * t^B + I_b * t + c = 0.00355 * t^{0.672} + 0.000325 * t$$

Para la determinación de avance y de receso se colocaron estacas en cada una de las melgas distanciadas a 10 m, luego se midió el tiempo de llegada sobre cada estaca (tiempo de avance), posteriormente se midió el tiempo en que el agua desaparecía del suelo definiendo el tiempo de receso. Además se determinó el tiempo total entre la apertura y cierre de la compuerta (tiempo de aplicación).

En la Tabla 9 se presentan los tiempos de avance y receso Los valores obtenidos en el ensayo:

Tabla 9: Curva de avance y receso ensayo 2.

Estaca	Distancia (m)	Melga 1 Avance (min)	Melga 2 Avance (min)	Melga 1 Receso (min)	Melga 2 Receso (min)
L0	0.0	1' 09"	0.8'		
L1	10.0	6' 24"	2' 40"	260	260
L2	20.0	11' 41"	5'	290	270
L3	30.0	18' 19"	8' 17"	295	270
L4	40.0	22' 46"	14' 07"	301	285
L5	50.0	31' 32"	21' 34"	309	310
L6	60.0	42' 29"	28' 55"	315	320
L7	70.0	50'	34' 56"	320	330
L8	80.0	60.01'	44' 02"	320	360
L9	90.0	68.76'	62'	330	380
Total	90				

Para estimar la curva de avance se graficaron los puntos de las dos melgas analizadas en un mismo gráfico obteniendo la ecuación de avance (Figura 5).

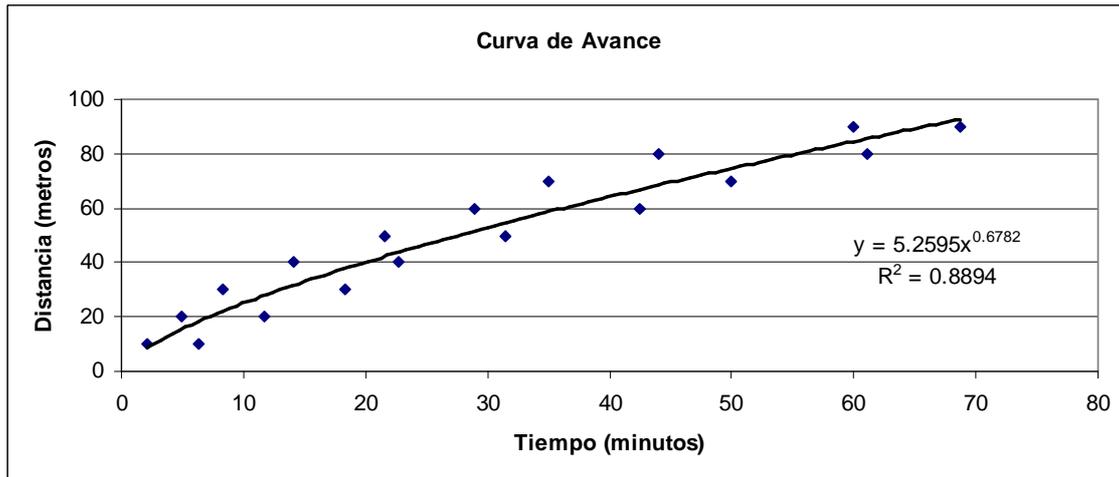


Figura 5: Función de Avance ensayo 2.

Posteriormente se calculó la lámina de reposición o lámina consumida y lámina almacenada en el perfil del suelo según Ecuaciones 6 y 7.

Lámina de reposición :

$$\text{Lámina de reposición} = \frac{(CC - HA)}{100} * \text{Prof.raíces} * \rho_a = \frac{(14 - 13)}{100} * 1.55 * 1.2 = 0.019m = 19 \text{ mm}$$

Para determinar la lámina almacenada comparo la lámina infiltrada con la requerida

Para calcular la lámina bruta aplicada se debe medir el caudal ingresado, el tiempo de aplicación del agua sobre la melga y las dimensiones de la melga.

$$L_{bruta} = \frac{\text{Vol.ingresado}}{\text{Area}} = \frac{0.032 \text{ m}^3/\text{s} * 60 \text{ min} * 60 \text{ seg}}{880} = 131 \text{ mm}$$

$$L_{infiltrada} = \frac{\text{Volumen entrada} - \text{Volumen salida}}{\text{Area}} = \frac{115.2 \text{ m}^3}{880} = 131 \text{ mm}$$

Los valores de lámina almacenada, infiltrada, almacenada y percolada en cada una de las estacas así también como el resumen de las eficiencias se presentan en la Tablas 10 y 11.

Tabla 10: Láminas almacenada, infiltrada, y percolada ensayo 2.

Nº	Dist. (m)	Ta (min)	Tr (min)	Top (min)	Icum (mm)	Icum Aj. (mm)	dal (mm)	dper (mm)	Déficit (mm)
1	0	0.00	260.00	260	390.8	126.3	19	107.3	0.0
2	10	4.53	260.00	255	385	124.4	19	105.4	0.0
3	20	8.34	280.00	272	404.6	130.7	19	111.7	0.0
4	30	13.30	283.00	270	402.3	130	19	111	0.0
5	40	36.90	293.00	256	386.1	124.7	19	105.7	0.0
6	50	26.60	309.00	282	416	134.4	19	115.4	0.0
7	60	35.70	315.00	279	412.6	133.3	19	114.3	0.0
8	70	42.46	320.00	278	411.4	133	19	114	0.0
9	80	52.00	340.00	288	422.8	136.6	19	117.6	0.0
10	90	65.60	355.00	289	423.9	137	19	118	0.0
Promedio:					405.5	131	19.0	112	0.0

Donde:

Dist.: distancia (m).

Ta: tiempo de aplicación (min).

Tr: tiempo de receso (min).

Top: tiempo de oportunidad o de contacto (min).

Icum: lámina de infiltración acumulada (mm).

Icum Aj.: lámina de infiltración ajustada (mm).

dal: lámina almacenada (mm).

dper: lámina percolada (mm).

Déficit: déficit de agua (mm).

Eficiencia de Aplicación:

$$EAP = \frac{\text{Lámina infiltrada y almacenada}}{\text{Lámina aplicada o bruta}} * 100 = \frac{19}{131} * 100 = 15\%$$

Eficiencia de Almacenaje:

$$EAL = \frac{\text{Lámina infiltrada y almacenada}}{\text{Lámina requerida / consumida (o almacenable)}} * 100 = \frac{19}{19} * 100 = 100\%$$

Eficiencia de Distribución:

$$UD = \frac{\text{Lámina infiltrada promedio del cuarto más perjudicado}}{\text{Lámina infiltrada promedio}} * 100 = \frac{\overline{d(1/4)}}{\bar{d}} * 100 = \frac{125}{131} * 100 = 95\%$$

Tabla 11: Determinación de las eficiencias de riego ensayo 2.

Cálculos de Eficiencias	(%)
Eficiencia de Aplicación Real (EAP)	15
Eficiencia de Almacenaje (EAL)	100
Eficiencia de Distribución (UD)	95
Pérdida por Percolación	85
Pérdida por Escurrimiento	0

4.3.4. CALIBRACION DE COMPUERTAS

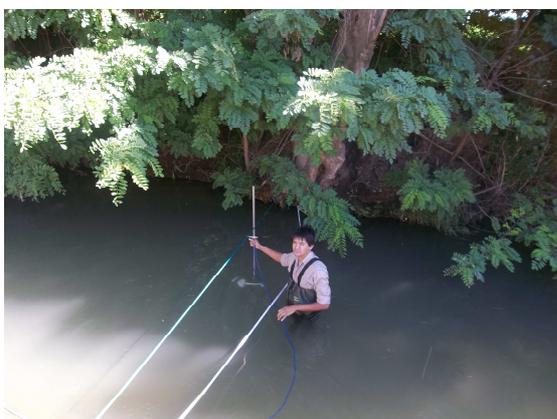
Con el fin de determinar el coeficiente de descarga de las compuertas principales del distrito se realizó la calibración de cada una de ellas. En la Tabla 12 se presentan los coeficientes promedio para cada caso.

El valor del coeficiente de descarga (C_d) varía de acuerdo a la posición y dimensiones de la compuerta respecto a la acequia en la que se encuentra, y de la forma que funciona (libre o sumergida), con valores que varían entre 0.65-0.73 (Requena et al., 2006).

Los valores de coeficientes de descarga obtenidos en este trabajo, en la mayoría de los casos, resultaron menores al rango encontrado en la bibliografía. En el terciario II, por ejemplo, producto de los resultados obtenidos, se repitieron los aforos pero el valor resultante confirmó el resultado inicial.

Tabla 12: Determinación coeficientes de descarga compuertas calibradas.

Fecha	Canal	Caudal (m^3*s^{-1})	Carga (m)	Tipo de compuertas	Sección Compuerta (m)	Valores medios C_d	Observaciones
14/12/2012	Terciario I	0.36	H1= 0.55 H2 = 0.25	Ahogada	abertura= 0.27 ancho = 0.8	0.68	Tierra
30/01/2013	Terciario II	0.2	H1= 1.04 H2 = 1	Ahogada	abertura= 0.74 ancho = 0.8	0.38	Revestido
9/03/2013	Terciario II (repetición)	0.16	H1= 0.9 H2 = 0.87	Ahogada	abertura= 0.74 ancho = 0.8	0.35	Revestido
2/02/2013	Terciario III	0.20	H1= 1.28 H2 = 1.03	Ahogada	abertura= 0.23 ancho = 0.8	0.50	Tierra
2/02/2013	Terciario IV	0.27	H1= 1.5 H2 = 1.39	Ahogada	abertura= 0.6 ancho = 0.8	0.38	Revestido (en aforo)
9/03/2013	Terciario V	0.7	H = 0.63	Libre	abertura= 0.48 ancho = 0.8	0.52	Tierra
7/03/2013	Terciario G6II	0.16	H1= 0.68 H2 = 0.54	Ahogada	abertura= 0.4 ancho = 0.76	0.32	Revestido (en aforo)
7/03/2013	Terciario ID6 II	0.30	H = 0.14	Libre	abertura= 0.71 ancho = 0.85	0.30	Tierra
7/03/2013	Terciario LKD6 II	0.46	H = 0.53	Libre	abertura= 0.42 ancho = 0.92	0.37	Revestido (en aforo)
2/02/2013	Segovia	0.13	H1= 1.4 H2 = 1.27	Ahogada	abertura= 0.35 ancho = 0.47	0.50	Revestido
2/02/2013	Suplementario	0.05	H=0.2	Libre	abertura= 0.2 ancho = 0.3	0.42	



Fotografías 13, 14, 15, 16, 17 y 18: Calibración compuertas.

4.4. DISCUSION

Los canales que forman parte del Distrito de Cipoletti son el canal secundario II, 6 canales terciarios y 21 cuaternarios y comuneros, totalmente construidos de tierra, salvo algunos pequeños tramos de estos últimos que se encuentran impermeabilizados.

El sistema tiene una antigüedad de 70-80 años de funcionamiento con un importante deterioro en sus obras infraestructura (compartos, alcantarillas, sifones, acueductos, etc.), que propicia fugas de agua en sus compuertas, problemas de cierre inadecuado, caudales de entrega inexactos, entre otros (Fotografías 19, 20, 21 y 22).



Fotografías 19, 20, 21 y 22: Estado de la infraestructura del Distrito de riego.

Esta situación se podría mejorar mediante la realización de obras de rehabilitación y modernización de la infraestructura general e interparcelaria.

Los canales terciarios y cuaternarios no tienen instalados aforadores en su ingreso (ejemplo: aforadores de resalto, sin cuello, Cipoletti, etc.) situación detectada por los técnicos del consorcio como prioritaria para lograr caudales de entrega medibles y equitativos.

Actualmente el operario realiza una entrega estimativa a partir de la apertura de las compuertas. La dotación entregada es la misma para las distintas situaciones (variedad de suelos, de cultivos, etc) alcanzando un valor de aproximadamente $1 \text{ l} \cdot \text{seg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$. Sin embargo, estas diferencias son tenidas en cuenta indirectamente en chacras que se encuentran ubicadas aledañas al río, donde los suelos presentan texturas más gruesas o cuando los cultivos implantados poseen mayor demanda hídrica, asignando mayores horas de riego en estos casos particulares.

El sistema de entrega es “por turnos”, donde el ciclo de turnado varía entre cinco y diez días, con tiempos unitarios de riego de $1.15 \text{ hs} \cdot \text{ha}^{-1}$ y $1.8 \text{ hs} \cdot \text{ha}^{-1}$ respectivamente (Storti, 2008).

De la totalidad de la superficie del Distrito solo 4000 hectáreas se riegan efectivamente, el resto se divide en loteos urbanos y chacras abandonadas.

Anualmente el Consorcio realiza una limpieza mecánica de los canales a su cargo, la cantidad de limpiezas al año puede variar de 2 a 4, en función de las condiciones climáticas, se realiza la extracción mecánica y la aplicación de herbicidas desde el costado de los canales. La presencia de vegetación genera una disminución de la sección hidráulica y por consiguiente pérdidas en la eficiencia de conducción.

Un inconveniente importante en la distribución, que afecta las entregas de dotación, son las originadas por obstrucciones de los pequeños canales con residuos sólidos urbanos, este problema existe sobre algunos de los canales terciarios que atraviesan zonas urbanas, la Municipalidad, en coordinación con el Distrito de Riego deben planificar limpiezas frecuentes de los mismos.

El interior de cada chacra se encuentra surcado por un sistema de acequias que distribuyen el agua en toda la explotación. El sobrante de agua (es decir, el agua que no es consumida por las plantas), se infiltra al subsuelo, se evapora o se vuelca en los canales de drenaje. El crecimiento de las plantas en los canales de desagüe, es una prueba de que el agua de drenaje contiene componentes químicos que se utilizan en los cultivos.

Uno de los principales problemas que surgieron producto de la construcción de las represas hidroeléctricas, sobre las áreas de riego ubicadas aguas abajo, fue el efecto de las aguas claras. Este efecto produjo una disminución en la cantidad de sedimentos que circulaban por los canales generando un efecto de sellado y una disminución de las pérdidas por infiltración. En la actualidad “el efecto de aguas claras”, aumenta las pérdidas por infiltración e incrementa la recarga a los acuíferos de ciertas zonas produciendo el ascenso de la capa freática.

Barragán Fernández et al. (2009), cuantificaron la eficiencia de distribución y aplicación en una localidad de España. El valor medio de las pérdidas registradas en las acequias fue de $6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ de acequia, o expresado en otras unidades: $0.545 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ de acequia y día.

En este Distrito los valores encontrados oscilan entre entre 0.0012 y 0.08 $l*s^{-1}*m^{-1}$, con un valor promedio de 0.033 $l*s^{-1}*m^{-1}$ o 33 $l*s^{-1}*km^{-1}$, valores similares a los encontrados en otros trabajos realizados en la región.

El trabajo denominado "Pérdidas del canal secundario norte distrito El Chañar" (Horne et al., 1996), tuvo como objetivo evaluar las pérdidas del canal secundario norte en el Distrito de San Patricio del Chañar-Neuquén. Dentro de las conclusiones, se puede señalar, que las pérdidas promedio oscilan entre 20-30 $l*s^{-1}*km^{-1}$ producto de las condiciones de infiltración básica del terreno. Se observaron además tramos con pérdidas mayores posiblemente a cambios en las condiciones medias de permeabilidad del terreno, conclusiones similares a las obtenidas en este trabajo.

La eficiencia de aplicación determinada en los ensayos realizados es muy baja, entre el 20 y 30 %. Esto se puede deber a la excesiva lámina aplicada, a que las chacras en general no están niveladas o los canales no poseen dominio sobre las chacras (poca carga sobre el cuadro donde se riega), los caudales de aplicación son muy bajos, etc.

Los valores de eficiencia de aplicación encontradas en esta Tesis, coinciden con los obtenidos en el Distrito de San Patricio del Chañar, allí se realizaron 7 ensayos para determinar eficiencia de aplicación y las mismas variaron entre 10 y 84%, con un valor promedio de 34 %. El trabajo estuvo a cargo de profesionales que pertenecen a la componente de Asistencia Técnica Agrícola del Proyecto financiado por el Prosap (Prosap, 2015).

Otro inconveniente en el Distrito, fue que las secciones de las acequias internas están alteradas por presencia de alamedas; generando una reducción en la sección hidráulica del canal. Por otra parte, esta falta de control en la aplicación tiene un efecto negativo en la producción, ya que, en algunos casos, el manejo deficiente del agua de riego puede generar encharcamientos y, en otros, dejar zonas con agua deficiente, lo cual se refleja en la producción.

Como se puede observar en los resultados obtenidos, al evaluar la eficiencias de aplicación, el manejo del riego es sumamente ineficiente.

Si se compara este resultado, con el área de riego de la provincia de Mendoza, Morabito et al. (2003) encontraron eficiencias de aplicación real (EAP) del 67 % en la cuenca del río Tunuyán inferior, 59 % para el río Mendoza y 43 % para el Tunuyán superior. La eficiencia de aplicación potencial referida al manejo del método de riego fue de 75 % los ríos Tunuyán inferior y Mendoza y 68 % en el río Tunuyán superior. Se puede observar que en el Oasis Centro, si existiera una transformación de los sistemas de riego esto permitiría aumentar la eficiencia de aplicación parcelaria hasta un 30 %. Las eficiencias de riego globales fueron del 64 % en la

cuenca del río Tunuyán inferior, 54 % en el río Mendoza y 44 % en el Oasis Centro (río Tunuyán superior).

En la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Comahue (FCA-UNCo), en el marco del Taller de Riego realizado por la cátedra de Hidráulica e Hidrología Agrícola, se realizó la determinación de la eficiencia de aplicación real y de almacenaje (Sáez, 2003). Los valores obtenidos fueron del 31 % para la eficiencia de aplicación real y del 100% para la de almacenaje (ensayo 3), valores muy similares a los obtenidos en esta Tesis.

En la Tabla 13 se presenta una síntesis de los resultados de eficiencias obtenidas en esta Tesis y los resultados obtenidos en el Taller de riego:

Tabla 13: Resumen eficiencias globales, de aplicación real, almacenaje y distribución.

MANEJO GLOBAL						
PRODUCTOR	Tiempo de aplicación (hs)	Tipo de suelo	Límite Inferior (mm)	Límite Superior (mm)	Lámima Bruta (mm)	EAP Promedio %
CELESTE	52	Franco arcilloso	48	64	190	30
GUALTIERI	18	Franco arcillo limoso	28	44	152	24
EVALUACION EFICIENCIAS						
	Tipo de suelo.	EAP	EAL	UD		
Ensayo 1	Franco-arcilloso	30%	100 %	86 %		
Ensayo 2	Arenoso-Franco	15%	100%	95 %		
Ensayo 3	Arcilloso	31	100 %	Sin determinar		

En esta región, en el tramo inferior del Río Negro se encontraron valores similares a los de este trabajo, Lui et al. (2011) realizaron 11 evaluaciones de riego. En ellas determinaron valores de eficiencia de conducción interna, eficiencia de aplicación (*EAP*), eficiencia de distribución (*UD*), eficiencia de almacenaje (*EAL*) y eficiencia de uso Interno. El promedio de la *EAP* fue del 24,5%, con valores extremos de 1 a 100, en el primer caso, el productor regó con el suelo en situación muy próxima a capacidad de campo (lámina de reposición de 3 mm) y, en el segundo caso, el riego fue deficitario.

Según el estudio realizado por la FCA-UNCo, 2004, sobre un sector del Distrito, el método de riego predominante es el denominado “a manto” (por inundación) y sin desagüe al pie. Asimismo, en general las parcelas estudiadas presentan una deficiente nivelación y escasa o nula delimitación de las unidades de riego (melgas con bordos precarios o inexistentes), en consecuencia surge la dificultad de poder encauzar los ya de por sí menguados caudales de escurrimiento, con el siguiente incremento de los tiempos de riego.

El mantenimiento de los desagües sólo se realiza sobre los que están a cargo del Distrito, los desagües internos a las parcelas se encuentran con gran cantidad de vegetación, efecto que produce una ineficiencia en el drenaje de los excedentes del riego, impidiendo controlar el nivel freático.

Para la mejora de los sistemas de riego, sería necesaria la caracterización de parámetros físicos ya que influyen en los procesos hidráulicos del riego, determinando la uniformidad y la aplicación del agua sobre la superficie (Pereira, 1999).

Las evaluaciones 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.

Otros de los problemas que se detecta es la falta de cursos de capacitación dirigida a los empleados del Distrito y encargados de la operación del riego, así como también para los propietarios de las chacras en relación al uso y aplicación del agua.

Para mejorar el funcionamiento del Distrito se podrían aplicar además medidas no estructurales donde se engloban las acciones de gestión y desarrollo productivo, que comprenden la implementación de cursos y programas de entrenamiento y capacitación del personal del Distrito, así como acciones encaminadas a la promoción de los apoyos para la preservación de la infraestructura hidroagrícola, y el mejoramiento en la organización y concientización de los productores al mejoramiento del manejo del sistema.

Finalmente se realizó una síntesis de los problemas principales que se visualizan en el Distrito y posibles soluciones, las mismas se presentan en la tabla adjunta (Fotografías 23, 24 y 25)(Tabla 14).

Tabla 14: Problemas que presenta el Distrito y posibles soluciones.

AREA DISTRITO 7077 ha
CAUDAL INGRESO 6000- 6600 l*s⁻¹

Nivel	Localización	Problemas identificados	Soluciones Propuestas	
		Canales de 70-80 años de funcionamiento		
Distribución	Red Primaria (Secundario II)	Pérdidas por infiltración-canales de tierra	Revestimiento de canales	
		Crecimiento de lama (aguas claras)	Limpieza periódica (2 veces al año)	
		Deterioro de obras de arte	Plan de mantenimiento periódico (pintura). Definir un programa para reemplazo o arreglo de estructuras	
		Embanques en algunos sectores del canal	Nivelación para mantener pendiente proyecto	
		Problemas de basura urbana	Concientización de la población-multas	
		Falta de capacitación de personal	Cursos-Talleres para el personal del Distrito	
		Red secundaria (Terciario y Cuaternarios)	Pérdidas por infiltración, solo algunos sectores de III y IV importante (zona urbana).	Revestimiento tramo de canales
			Falta de aforadores	Instalación de aforadores permanentes
			Deterioro de obras de arte	Plan de mantenimiento periódico
			Crecimiento de lama (aguas claras)	Limpieza periódica
		Falta de capacitación de personal	Cursos-Talleres para el personal del Distrito	
En interior de parcela		Bajas eficiencias de aplicación	Capacitación al productor-determinación exacta de láminas	
		Inadecuado dimensionamiento de acequias	Mantenimiento de sección	
		Falta de nivelación de chacras	Nivelación de cada una de las chacras	
		Falta de mantenimiento en acequias internas	Limpieza de acequias internas, desmalezamiento.	
		Falta de mantenimiento en desagües internos	Limpieza de desagües comuneros, desmalezamiento.	
		Rotura y disminución de sección hidráulica (alamedas)	Mantenimiento de secciones hidráulicas	
		Desconocimiento de láminas de riego aplicadas	Cálculo de láminas de riego en función de suelo, cultivo, etc	
		Se aplica dotación s/considerar suelos, solo se da más	Ajuste de dotaciones para cada situación (suelo, cultivo, etc)	

		tiempo de riego	
		Desactualización de propietarios.	Actualización propietarios (riegan o no).
Otra información		Pago de canon de riego (bimestral) en un 40- 55 % del padrón general	
		Problemas de salinidad y capa freática alta en algunos sectores ($\approx 20\%$)	
		Cuenta c/ maquinarias que permiten el mantenimiento del Distrito	
		Avance de la urbanización sobre tierras productivas	
		De las 7077 ha del Distrito, 4000 ha están destinado a la producción. El resto esta urbanizado o abandonado.	
		Turnado entre 5-10 días	
		Cultivos: Frutales, pasturas y hortalizas	
		Valor fijo de dotación para distintas situaciones $1 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$	



Fotografía 23: Comparto.



Fotografía 24: Canal terciario.



Fotografía 25: Canal terciario.

CAPITULO 5 MODELO DE SIMULACION

5.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se han desarrollado algunos trabajos que señalan los efectos que producirá el cambio climático y su impacto sobre las condiciones hidrológicas de los ríos. Dicho efecto producirá una reducción de la disponibilidad del recurso para actividades agrícolas, redundando en un impacto sobre las economías regionales.

Dedrick et al. (1989) propusieron el concepto del Programa de Mejoramiento de la Gestión como un procedimiento para desarrollar las capacidades de gestión y hacer cumplir las políticas de conservación del agua en un distrito de riego.

Uno de los trabajos más recientes e importantes para la región, es el denominado “Proyecto Climagua”, realizado por la Fundación Bariloche en conjunto con instituciones como la Universidad Nacional del Comahue, el Departamento Provincial de Aguas de Río Negro, la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas y la Secretaría de Recursos Hídricos de Neuquén. En dicho trabajo se analiza la adaptación de la población al estrés hídrico producido por el cambio climático en la zona del Comahue, a partir del análisis de seis escenarios climáticos que generan la reducción de caudales en los principales ríos de la región, el Limay, el Neuquén y el Negro, utilizando como herramienta un modelo matemático con proyección al año 2050. Dentro de las principales conclusiones se puede citar la necesidad en reducir la lámina de riego aplicada (aumento en la eficiencia del riego) y el aumento de los almacenamientos superficiales y/o subterráneos mediante la construcción de embalses a lo largo de la cuenca (Fundación Bariloche et al., 2016).

A partir de los resultados anteriores y de la revisión de trabajos realizados en la región, se evidenció la necesidad de optimizar el manejo del agua para distintos usos. Uno de los aspectos sobre los cuales se avanzó en esta Tesis fue la identificación de las principales problemáticas del distrito y el análisis de alternativas de manejo del agua de riego de manera de hacerlo sustentable.

La mejora de la gestión del agua en un sistema de riego requiere la evaluación de su desempeño, como punto de partida. Los modelos de simulación son muy útiles para esta tarea por lo que fueron elegidos como herramienta metodológica para aplicar en este trabajo. Existen modelos de simulación específicos que pueden ser utilizados para apoyar este tipo de programas, sin embargo, requieren la validación adecuada a las condiciones locales, en las que van a aplicarse (Pereira et al., 1995).

A pesar de que la utilización de modelos matemáticos, para la simulación del movimiento del agua en sistemas agrícolas, ha resultado una herramienta útil para desarrollar soluciones a diferentes problemas de manejo agrícola y medioambiental, la precisión de sus resultados puede estar afectada también en gran medida por la simplificación de las representaciones de sus balances de agua (Clemente et al., 1994; Dourado-Neto, 1998).

Muchos modelos se han utilizado para simular partes del ciclo hidrológico en la agricultura de regadío, desde empíricos o funcionales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Doorenbos y Kassam, 1979; Allen et al., 1998) a mecanicistas (Van Aelst et al., 1988). Además herramientas tales como la teledetección (Kite, 2000; Kite y Droogers, 2000) y los sistemas de información geográfica (Hartkamp et al., 1999), han sido combinados con modelos de simulación para evaluar el comportamiento de los sistemas de riego.

Dentro de los modelos dinámicos uno de los más utilizados es el HYDRUS-1, este modelo simula la variación del contenido de agua en el suelo en la zona de raíces considerando un flujo unidimensional, en un medio no saturado y aplicando ecuaciones de advección-dispersión para el transporte de calor y soluto a través de la ecuación de Richards.

El análisis de las ventajas y desventajas de modelos de balance hídrico y dinámicos, y su efecto sobre los resultados obtenidos, será otro de los tópicos desarrollados en el capítulo.

5.2. CONCEPTOS TEÓRICOS- MODELOS DE SIMULACION: WINISAREG E HYDRUS-1

Modelo WINISAREG

El modelo WINISAREG es la versión bajo Windows del modelo de simulación de balance hídrico ISAREG, diseñado para simular y evaluar distintas alternativas de riego, además de utilizarse como soporte de aplicación a prácticas de campo (Teixeira y Pereira, 1992; Liu et al., 1998a). Se utiliza para diversos cultivos, suelos, métodos de riego y condiciones del medio ambiente. El modelo utiliza originalmente enfoques empíricos simplificados propuestos por Doorenbos y Pruitt (1977) para el cálculo de los flujos ascendentes y descendentes acumulados a través del límite de la zona de las raíces (por ejemplo, Teixeira y Pereira, 1992; Teixeira et al., 1995; Zairi et al., 2003).

La metodología propuesta por Doorenbos y Pruitt (1977) para estimar la contribución del agua subterránea (G_c , $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$) se presenta en la Ecuación 1 y la percolación profunda (D_p , $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$), en la Ecuación 2:

$$G_c \begin{cases} G_{MAX} & \text{si} & w < w_{wp} \\ G_{max} \left(\frac{w_p - w}{w_p - w_{WP}} \right) & \text{si} & w_{wp} \leq w \leq w_p \\ 0 & \text{si} & w > w_p \end{cases} \quad \text{y} \quad (1)$$

$$D_p = \begin{cases} 0 & \text{si } w < w_{FC} \\ w - w_{FC} & \text{si } w > w_{FC} \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

w_{FC} y w_{WP} : es el almacenamiento del agua del suelo para capacidad de campo y punto de marchitez permanente respectivamente (mm).

w : almacenamiento real de agua en el suelo en la zona de las raíces

w_p : almacenamiento del agua del suelo correspondiente a la fracción de decrecimiento para que no haya estrés (mm)

G_{max} : es la contribución de agua potencial ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), depende de las características del suelo (Doorenbos y Pruitt, 1977) y la fracción de agotamiento (ρ) para un cultivo específico (Allen et al., 1998).

D_p : percolación profunda (mm).

El modelo realiza el balance de agua para un suelo multicapa. A partir de los datos meteorológicos, se pueden usar varios pasos de tiempos de cálculo (diario, decadiario y mensual). Los datos de entrada incluyen precipitación, evapotranspiración de referencia (ET_o), agua del suelo total y fácilmente disponible, contenido de agua del suelo en el momento de la siembra, contribución potencial del agua subterránea (valor constante en el tiempo), coeficientes de cultivo y fracciones de agotamiento del agua para situaciones de estrés, profundidad de raíces, etc.

El modelo calcula de los requerimientos de agua de riego a partir de un balance hídrico del suelo que se calcula para la profundidad de raíz efectiva según Ecuación 3:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - RO_i) + I_i - ET_{ci} - D_{pi} + G_{ci}}{1000 z_{ri}} \quad (3)$$

Donde θ_i y θ_{i-1} son el contenido de agua del suelo en la zona de las raíces ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$), en los días i e $i-1$ respectivamente, P_i es la precipitación en el día i (mm), RO_i es el escurrimiento superficial en el día i (mm), I_i es la lámina de riego en el día i (mm), ET_{ci} (mm) es la evapotranspiración del cultivo en el día i (mm), D_{pi} representa la percolación profunda en el día i (mm), G_{ci} es el flujo acumulado de ascensión capilaridad en el día i (mm), y z_{ri} es la profundidad de raíces (m) en el día i . G_c y D_p se calculan a partir de las propiedades hidráulicas del suelo y de la profundidad de la capa freática.

Las láminas de riego requeridas se obtienen al alcanzar los umbrales apropiados de agua en el suelo como se describe a continuación. Los cálculos de evapotranspiración del cultivo o real (ET_c) se basan en el producto entre la evapotranspiración de referencia y un coeficiente de cultivo (Allen et al., 1998). La lámina de escurrimiento (RO_i) se puede predecir utilizando el método de número de curva SCS (USDA-SCS, 1972), pero para la mayoría de las aplicaciones, la escorrentía puede ser despreciada.

El umbral de riego para evitar el estrés hídrico es cuando el contenido real de agua del suelo θ_i es igual al umbral relativo a la fracción de agotamiento para la tensión (p) sin estrés, $\theta_i = \theta_p$ dada por la Ecuación 4:

$$\theta_p = (1 - p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (4)$$

Donde:

θ_p : contenido de agua en el suelo para evitar estrés hídrico ($m^3 \cdot m^{-3}$)

p : fracción de agua en el suelo extraíble sin afectar a la producción (%)

θ_{FC} : contenido de agua en el suelo a capacidad de campo ($m^3 \cdot m^{-3}$)

θ_{WP} : contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente ($m^3 \cdot m^{-3}$)

La lámina de riego (I_{ni}), está dada por la Ecuación 5:

$$I_{ni} = 1000z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_p) \quad (5)$$

Donde:

I_{ni} : lámina de riego para que la humedad este a capacidad de campo (mm)

z_{ri} : profundidad efectiva de la zona radical (m)

El riego se aplica cuando se alcanza el agotamiento permitido (MAD). Cuando no se admite el estrés hídrico, entonces $MAD = p$. Un $MAD < p$ se adopta cuando no se admite riesgo y $MAD > p$ cuando si se permite el estrés hídrico del cultivo, es decir, cuando se aplica el riego en forma deficitaria (Ecuación 6).

$$\theta_p = \theta_{MAD} = (1 - MAD)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (6)$$

El modelo WINISAREG calcula el ascenso capilar aplicando las ecuaciones presentadas por Liu et al. (1998, 2006). Las ecuaciones paramétricas utilizadas para calcular la contribución del agua subterránea G_c ($mm \cdot d^{-1}$) se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1: Síntesis de ecuaciones usadas para calcular los flujos de agua subterránea y sus respectivos parámetros (Liu et al., 2006).

Ecuaciones	Condiciones	Parámetros
$w_c = a_1 D_w^{b_1}$		w_c : almacenamiento de agua crítica entre capacidad de campo y fracción de agotamiento p . D_w : profundidad de la capa freática $a_1 = W_{FC}$, almacenamiento del suelo a capacidad de campo a un metro de profundidad; $b_1 = -0.17$
$w_s = a_2 D_w^{b_2}$		w_s : constante de almacenamiento en el suelo función de la profundidad de la capa freática $a_2 = 1.1 (W_{FC} + W_{WP})/2$, almacenamiento como promedio entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente; $b_2 = -0.27$ D_w : profundidad de la capa freática
$D_{wc} = a_3 ET_p + b_3$ $D_{wc} = 1.4$	Cuando $ET_p \leq 4mm/d$ Cuando $ET_p > 4mm/d$	D_{wc} : profundidad de agua subterránea crítica. Por encima del $G_{m\acute{a}x}$ no se incrementa más, es aproximadamente

		constante. ET_p : evapotranspiración potencial (mm). $a_3 = -1.3$. $b_3 = 6.7$ para suelos arcillosos y franco-arcillo-limoso, disminuyendo a 6.2 para arenas francas
$G_{cmax} = k ET_p$	Cuando $D_w \leq D_{wc}$	G_{cmax} : potencial del flujo capilar, k: en un factor que relacional ET_p y G_{cmax} . ET_p : evapotranspiración potencial (mm). D_w : profundidad de la capa freática. D_{wc} : profundidad de agua subterránea crítica. $a_4 = 4.6$ para suelo franco limosos y franco-arcillo-limosos, disminuyendo a 3 para arenas francas. $b_4 = -0.65$ para suelos franco limosos y disminuye a -2.5 para arenas francas
$G_{cmax} = a_4 D_w^{b_4}$	Cuando $D_w > D_{wc}$	
$k = 1 - e^{-0.6LAI}$ $k = 38/ET_p$	Cuando $ET_p \leq 4\text{mm/d}$ Cuando $ET_p > 4\text{mm/d}$	LAI: índice de área foliar k: en un factor que relacional ET_p y G_{cmax} ET_p : evapotranspiración potencial (mm).

Modelo HYDRUS-1

La fórmula general para expresar los cambios de humedad en el perfil del suelo cuando el movimiento de agua es en una sola dirección (vertical-eje z), en el tiempo t, lo expresa la ecuación de continuidad de masa (Ecuación 7).

La ecuación de Darcy- Buckingham (Ecuación 8), es adecuada para describir el flujo no saturado sólo si el contenido de humedad en el suelo no es variable en el tiempo, desafortunadamente esto raramente ocurre. Cuando q y θ son variables en el tiempo se combinan la Ecuación 7 y 8 obteniendo la ecuación de Richards (Ecuación 12) (Kutilek et al., 1994).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (7)$$

$$q_z = -K(h) * \frac{\partial \vartheta}{\partial z} \quad (8)$$

Donde:

θ : contenido de agua volumérico ($L^3 * L^{-3}$)

t: variable tiempo (T)

z: coordenada espacial en dirección de z (L)

q_z : flujo de agua que atraviesa una unidad de área por unidad de tiempo ($L * T^{-1}$)

$K(h)$: conductividad hidráulica no saturada ($L * T^{-1}$)

Si se reemplaza la Ecuación 9 en la Ecuación 10

$$\vartheta = z + h \quad (9)$$

Donde:

z: altura de posición (L)

h: altura de presión (L)

ϑ : potencial hidráulico total (L)

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \left(\frac{\partial (z+h)}{\partial z} \right) \right) \quad (10)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \left(1 + \frac{\partial h}{\partial z} \right) \right) \quad (11)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (12)$$

En condiciones naturales la evapotranspiración, reduce el contenido de humedad, y por ende el potencial en los estratos superiores generando un gradiente entre el nivel freático y dichos estratos de suelo. Esta diferencia de potencial constituye la fuerza impulsora para que se produzca el ascenso capilar.

A partir de esto se puede identificar, como los principales factores que producen el ascenso capilar: el tipo de suelo, la profundidad de la capa freática, la succión que corresponde a un determinado contenido de humedad y la conductividad hidráulica saturada del suelo (Grassi, 1998).

Basado en esta ecuación de flujo, el modelo HYDRUS-1 permite analizar la absorción del agua y nutrientes por parte de las plantas y cómo la absorción del agua de la raíz controla la evapotranspiración real de la planta, la recarga de agua y la lixiviación de nutrientes a las aguas subterráneas.

El programa puede ser utilizado para analizar el movimiento del agua y solutos en suelo no saturado, parcialmente saturado, y totalmente saturado. La región de flujo puede estar compuesta de suelos no uniformes.

El interés de estudiar la zona no saturada se ha incrementado en los últimos años debido a la creciente preocupación del deterioro que ha sufrido el medio ambiente por las actividades agrícolas, industriales y municipales

En ésta Tesis se utilizó la ecuación que describe el movimiento de agua unidimensional en un medio poroso parcialmente saturado a través de la ecuación de Richards donde se incluye además el término sumidero que describe la absorción de raíces (Ecuación 13), con el supuesto que la fase de aire no influye en el proceso y que el flujo de agua debido a los gradientes térmicos se puede despreciar (Simunek et al., 2013).

$$\frac{\partial \theta(h)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} - S(h) \quad (13)$$

donde h es la altura de presión de agua (L), θ es el contenido volumétrico de agua ($L^3 \cdot L^{-3}$), t es el tiempo, $S(h)$ es la absorción de raíces ($L^3 \cdot L^{-3} \cdot T^{-1}$) y K es la función de la conductividad hidráulica no saturada ($L \cdot T^{-1}$) dada por la Ecuación 14:

$$K(h, z) = K_s(z)K_r(h, z) \quad (14)$$

donde K_r es la conductividad hidráulica relativa (-) y K_s la conductividad hidráulica saturada ($L \cdot T^{-1}$)

La aplicación del modelo HYDRUS-1 requiere de la definición de las condiciones de contorno. Dichas condiciones se las puede dividir en independientes y dependientes del sistema. En las primeras, las condiciones de contorno especificadas, como pueden ser los potenciales hidráulicos, contenido de agua y no dependen del estado del sistema suelo. Por el contrario, en las condiciones dependientes del sistema, los flujos, los gradientes o los potenciales surgen de la interacción del suelo con su entorno (Dietrich, 2013).

Los flujos potenciales están controlados exclusivamente por las condiciones atmosféricas como, por ejemplo, la evapotranspiración del cultivo de referencia. Pero los flujos reales sí dependen del estado de humedad del suelo (Radcliffe y Simunek, 2010).

Pueden existir condiciones de contorno de potencial constante o flujo constante, en el primer caso se denomina Dirichlet y en el segundo caso Neumann.

Si son dependientes del sistema, se ingresan las condiciones atmosféricas, los flujos o potenciales verticales se simulan como una condición independiente pero limitando el valor absoluto de la solución (Ecuación 15):

$$\left| -K \frac{\partial h}{\partial z} - K \right| \leq E \quad (15)$$

Donde: E es la tasa de evapotranspiración o infiltración potencial ($L \cdot T^{-1}$). Si se obtienen cálculos mayores a este valor, la solución adopta el valor de E y se continúa el proceso (Simunek et al., 2009).

Curva de retención

La mayoría de los procesos que involucran interacciones entre el agua y el suelo, incluyendo el flujo de agua en la zona radical, ocurren en un estado de no saturación (Hillel, 1998).

Uno de los principales insumos que requiere el modelo de simulación HYDRUS-1, es la curva de retención hídrica, dicha curva es la relación entre el contenido de agua en el suelo y la tensión matricial. Esta curva varía para distintos tipos de suelo (Figura 1).

Una de las complejidades que posee la curva característica del suelo, para poder convertir la cantidad de agua en potencial, es que la relación no es única ya que su forma es diferente si se extrae agua o se añade agua, fenómeno conocido como histéresis. Uno de los factores que más influyen en el desarrollo de este fenómeno es el llamado efecto “cuello de botella”, por el cual el ángulo del menisco formando entre la partícula de suelo y el líquido que fluye por él, depende de la dirección en la que este líquido se desplaza (Nielsen et al., 1986).

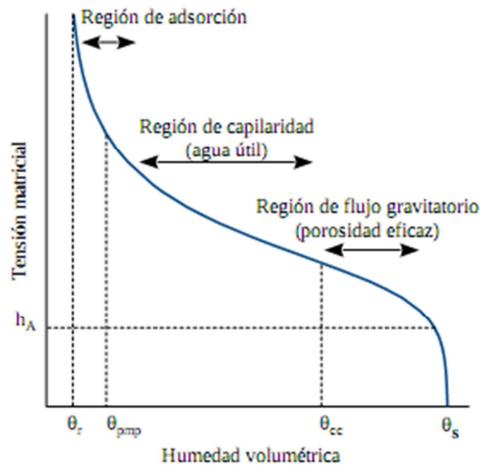


Figura 1: Curva de retención (Dietrich, 2013) .

La curva posee diferentes regiones que se determinan en función del proceso que predomina, dichas regiones se encuentran delimitadas por valores que poseen un nombre específico.

En la curva de retención (Dietrich, 2013) se pueden identificar algunos puntos característicos: θ_s se denomina humedad de saturación y corresponde a la máxima humedad que puede tener el suelo, punto coincidente con la porosidad total.

Si se produjera un aumento de la tensión, la disminución de la humedad del suelo no se produce hasta que llega al valor de h_A , esta región de la curva donde la tensión varía de cero a h_A , se denomina región de entrada de aire (Jury y Horton, 2004).

El valor de h_A o presión de burbujeo, es un parámetro que queda bien definido y es físicamente realista en suelos de textura gruesa, con distribuciones relativamente estrechas en el tamaño de poro. Sin embargo su existencia es cuestionada en la mayoría de los suelos constituidos por materiales más finos. La inversa del valor de entrada de aire, denominado α , es un parámetro empírico y es utilizado como parámetro en el modelo (van Genuchten y Nielsen, 1985).

A partir de la tensión de entrada de aire h_A , el suelo drena por el flujo gravitatorio hasta alcanzar el valor de capacidad de campo ($\theta_{cc} = \theta_{FC}$).

θ_{cc} se obtiene del laboratorio y corresponde aproximadamente a una tensión de 0.3 atm, a partir de θ_{cc} es proceso que controla el flujo es la capilaridad, si se aumenta la tensión se

alcanza el valor de punto de marchitez permanente ($\theta_{pmp} = \theta_{WP}$), que corresponde al punto donde las plantas no pueden extraer más agua. El punto de marchitez permanente se aproxima a un valor de tensión de 15 atm.

A partir de este valor el suelo ingresa a la región de adsorción, espacio donde el agua queda fuertemente retenida sobre las partículas del suelo (Dietrich, 2013).

El último parámetro de la curva es θ_r que determina la máxima cantidad de agua que puede llegar a contribuir al flujo. θ_r y θ_s son parámetros empíricos que se ajustan y dependerán del modelo seleccionado para representar la curva de retención.

En el suelo no saturado los parámetros hidráulicos, $\theta(h)$ y $K(h)$, en (Ecuación 13 y 14) son funciones no lineales de la altura de tensión. HYDRUS-1 permite el uso de cinco modelos analíticos diferentes para las propiedades hidráulicas (Brooks y Corey, 1964; van Genuchten, 1980; Vogel y Císlarová, 1988; Kosugi, 1996; y Durner, 1994).

La curva de retención de agua, $\theta(h)$, y la conductividad hidráulica, $K(h)$, según Brooks y Corey (1964) se pueden describir como la Ecuación 16:

$$S_e = \begin{cases} |\alpha h|^{-n} & h \leq \frac{-1}{\alpha} \\ 1 & \geq \frac{-1}{\alpha} \end{cases} \quad (16)$$

Donde S_e es la saturación efectiva.

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (17)$$

en el que θ_r y θ_s denotan los contenidos de agua residual y saturada, respectivamente; K_s es la conductividad hidráulica saturada, α es el inverso del valor de entrada de aire (o presión de burbujeo), n es un índice de distribución de tamaño de poros, h altura de tensión (L) y l es un parámetro de conectividad de poros se supone igual a 2 en el estudio original de Brooks y Corey (1964). Los parámetros α , n y l en HYDRUS se considera que son coeficientes empíricos que afectan la forma de las funciones hidráulicas.

Van Genuchten (1980) propone la Ecuación 18, 19 y 20:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (19)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n}, \quad n > 1 \quad (20)$$

Las ecuaciones anteriores contienen cinco parámetros independientes: θ_r , θ_s , α , n , y K_s . El parámetro de conectividad l fue estimado por la ecuación de conductividad hidráulica con un valor promedio de 0.5 para varios tipos de suelos (Mualem, 1976).

Vogel y Císlarová (1988), modificaron las ecuaciones de van Genuchten (1980) para añadir flexibilidad en la descripción de las propiedades hidráulicas cercanas de la saturación. La retención de agua del suelo, $\theta(h)$, y la conductividad hidráulica, $K(h)$, están dadas por las Ecuaciones 21 y 22 :

$$\theta_h = \begin{cases} \left\{ \theta_a + \frac{\theta_m - \theta_a}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \right. & h < h_s \\ \theta_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (21)$$

$$K(h) = \begin{cases} K_s K_r(h) & h < h_k \\ K_k + \frac{(h - h_k)(K_s - K_k)}{h_s - h_k} & h_k < h < h_s \\ K_s & h \geq h_s \end{cases} \quad (22)$$

Y donde:

$$K_r = \frac{K_k}{K_s} \left(\frac{S_e}{S_{ek}} \right) \left[\frac{F(\theta_r) - F(\theta)}{F(\theta_r) - F(\theta_{kr})} \right]^2 \quad (23)$$

$$F(\theta) = \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_a}{\theta_m - \theta_a} \right)^{1/m} \right]^m \quad (24)$$

$$S_{ek} = \frac{\theta_k - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (25)$$

Donde: θ_a parámetro en función de la retención de agua del suelo ($L^3 \cdot L^{-3}$), θ_m : parámetro en función de la retención de agua en el suelo ($L^3 \cdot L^{-3}$); θ_k : contenido de agua volumétrico correspondiente a K_k ; K_k : valor medido de la conductividad de suelo no saturado θ_k ($L \cdot T^{-1}$), h : altura de tensión (L); h_s : valor de entrada de aire en Brooks and Corey (1964) en la función de retención de agua del suelo (L); S_{ek} : saturación efectiva a θ_k .

Las ecuaciones anteriores permiten para una altura capilar mínima h_s , distinta de cero, reemplazar el parámetro θ_s en la función de retención de van Genuchten por un parámetro ficticio (extrapolado) θ_m ligeramente mayor que θ_s .

El cambio de θ_s a θ_m tiene poco o ningún efecto sobre la curva de retención, pero sí sobre la forma y los valores en la función de conductividad hidráulica no saturada, especialmente para los suelos de textura fina, cuando n es relativamente pequeño (por ejemplo, $1.0 < n < 1.3$).

Para aumentar la flexibilidad de las expresiones analíticas, el parámetro θ_r en la curva retención fue sustituido por un parámetro ficticio (extrapolado) $\theta_a \leq \theta_r$. El enfoque mantiene el significado físico de θ_r y θ_s como cantidades medibles.

Kosugi (1996), sugirió un modelo de distribución lognormal de $S_e(h)$, ecuación 26:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \begin{cases} \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{\ln\left(\frac{h}{\alpha}\right)}{\sqrt{2n}} \right\} & (h < 0) \\ 1 & (h \geq 0) \end{cases} \quad (26)$$

El modelo de distribución de tamaño de poro de Mualem (Mualem, 1976) posee la siguiente función de la conductividad hidráulica no saturada (Ecuación 27) :

$$K = \begin{cases} K_s S_e^l \left\{ \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln\left(\frac{h}{\alpha}\right)}{\sqrt{2n}} + \frac{n}{\sqrt{2}} \right] \right\}^2 & (h < 0) \\ K_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (27)$$

Donde:

erfc: función error complementaria

Durner (1994) divide el medio poroso en dos (o más) regiones superpuestas, sugiriendo que para cada una de estas regiones se usa una función tipo van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) de las propiedades hidráulicas del suelo. La superposición lineal de las funciones para cada región en particular esta dada por las funciones para el sistema de poros multimodal compuesto (Durner et al., 1999) (Ecuación 28):

$$S_e = w_1 [1 + (\alpha_1 h)^{n_1}]^{m_1} + w_2 [1 + (\alpha_2 h)^{n_2}]^{m_2} \quad (28)$$

Combinando el modelo de retención con el modelo de distribución de tamaño de poro de Mualem (1976) se llega a Ecuación 29:

$$K(S_e) = K_s \frac{(w_1 S_{e1} + w_2 S_{e2})^l (w_1 \alpha_1 \left[1 - \left(1 - S_{e1}^{\frac{1}{m_1}} \right)^{m_1} \right] + w_2 \alpha_2 \left[1 - \left(1 - S_{e2}^{\frac{1}{m_2}} \right)^{m_2} \right])^2}{(w_1 \alpha_1 + w_2 \alpha_2)^2} \quad (29)$$

Donde w_i son factores de peso para cada una de las regiones superpuestas y α_i ; n_i ; m_i y l son parámetros empíricos de las funciones hidráulicas ($i = 1, 2$).

Absorción de agua de la raíz

Captación de agua de la raíz sin compensación

El término sumidero, S , se define como el volumen de agua extraída de una unidad de volumen de suelo por unidad de tiempo, debido a la absorción de agua de la planta. Feddes et al. (1978) se define como S , Ecuación 30:

$$S(h) = \alpha(h)S_p \quad (30)$$

Donde: la absorción de la raíz en respuesta de estrés es una función $\alpha(h)$ adimensional (Figura 2) de la altura de presión de agua del suelo ($0 \leq \alpha \leq 1$), y S_p es la tasa de absorción potencial de agua ($l \cdot T^{-1}$). La Figura 2 da un esquema de la función de respuesta de estrés tal como es utilizada por Feddes et al. (1978). La absorción de agua se supone igual a cero cerca de la saturación (h_1). Para $h < h_4$ (la altura de presión en el punto de marchitamiento), la absorción de agua también se supone que es cero. La absorción de agua se considera óptima entre h_2 y h_3 , mientras que para altura de presión entre h_3 y h_4 (o h_1 y h_2), disminuye la absorción de agua (o aumenta) linealmente con h . La variable S_p en (ecuación 25) es igual a la tasa de absorción de agua durante los períodos de no estrés hídrico cuando $\alpha(h) = 1$.

Van Genuchten (1987) propone una ecuación ampliada a la de Feddes et al. (1978) mediante la inclusión estrés osmótico Ecuación 31:

$$S(h, h_\phi) = \alpha(h, h_\phi)S_p \quad (31)$$

donde h_ϕ es la presión osmótica (L), que se supone como la combinación lineal de las concentraciones, c_i , de todos los solutos presentes, Ecuación 32:

$$h_\phi = a_i c_i \quad (32)$$

En el que a_i son los coeficientes experimentales ($L^4 \cdot M$) que convierten concentraciones dentro de las presiones osmóticas. Van Genuchten (1987) propuso una función alternativa curva en S para describir la función de absorción de respuesta al estrés de agua (Figura 2), y sugirió que la influencia de la reducción de la presión osmótica puede ser aditiva o multiplicativa de la siguiente manera:

$$\alpha(h, h_\phi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h+h_\phi}{h_{50}}\right)^p} \quad (33)$$

o

$$\alpha(h, h_\phi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p_1}} + \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}}\right)^{p_2}} \quad (34)$$

Donde: p , p_1 , p_2 y son constantes experimentales. El exponente p se encontró que era aproximadamente 3 cuando se aplica a los datos al estrés por salinidad solamente (van Genuchten, 1987). El parámetro h_{50} representa la presión a la que la tasa de extracción de agua se reduce en un 50% durante las condiciones de estrés osmótico nulo. Del mismo modo, $h_{\phi 50}$ representa la presión osmótica en el que la tasa de extracción de agua se reduce en un 50% en condiciones de estrés hídrico nulo. Debe tenerse en cuenta la diferentes sensibilidades de la absorción de agua de la raíz a las tensiones y salinidad del agua, Ecuación 35.

$$\alpha(h, h_{\phi}) = \frac{1}{1 + \left(\frac{h}{h_{50}} + \frac{h_{\phi}}{h_{\phi 50}}\right)^p} = \frac{1}{1 + \left(\frac{h + a_1 h_{\phi}}{h_{50}}\right)^p} = \frac{1}{1 + \left(\frac{h + a_1(a_i c_i)}{h_{50}}\right)^p} \quad (35)$$

donde a_i es un coeficiente que representa las distintas respuestas a tensiones diferentes ($= h_{50} / h_{\phi 50}$).

Se puede observar que en contraste con la expresión de Feddes et al. (1978) esta formulación (la función de curva en S) de la función de respuesta al estrés, $\alpha(h, h_{\phi})$, no tiene en cuenta la reducción de la transpiración cerca de la saturación. Esta simplificación parece justificada cuando condiciones saturadas o parcialmente saturadas se producen sólo por períodos de tiempo relativamente cortos.

Cuando la tasa de absorción de agua potencial se distribuye por igual en la zona de las raíces, S_p convierte, en la Ecuación 36 (Figura 2):

$$S_p = \frac{1}{L_R} T_p \quad (36)$$

donde T_p es la tasa de transpiración potencial ($L \cdot T^{-1}$) y L_R la profundidad (L) de la zona de las raíces. La Ecuación 36 puede ser generalizada mediante la introducción de una distribución no uniforme de la tasa de absorción potencial de agua sobre una zona de la raíz de forma arbitraria, Ecuación 37:

$$S_p = b(x)T_p \quad (37)$$

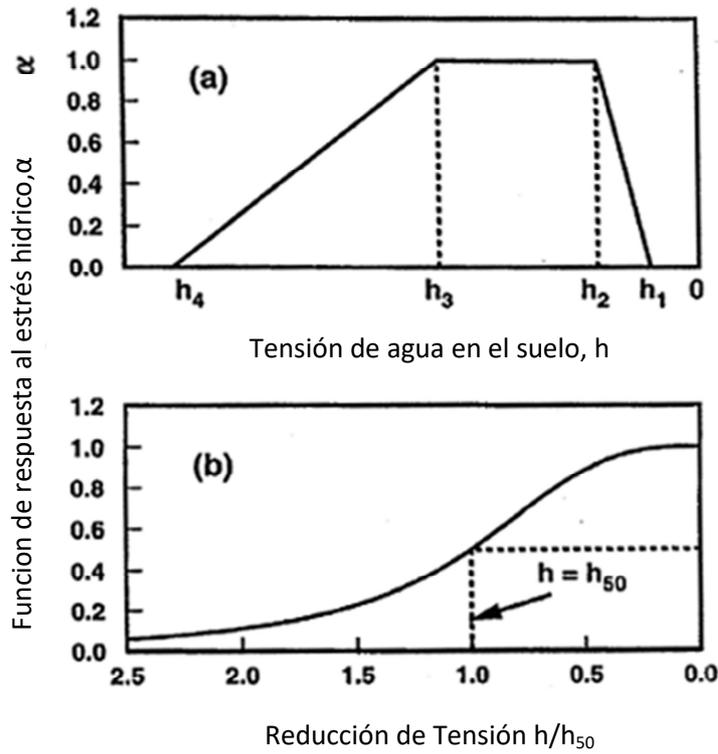


Figura 2: Esquemas de la función de respuesta al estrés hídrico, $\alpha(h)$, a) Feddes et al. (1978) y b) van Genuchten (1987) (Fuente: Manual HYDRUS-1).

donde $b(x)$ es la distribución de la absorción de agua normalizada ($1 \cdot L^{-1}$). Esta función describe la variación espacial de la expresión de extracción potencial, S_p , sobre la zona de la raíz, se obtiene mediante la normalización de cualquier función de distribución de la raíz arbitrariamente medido o prescrito, $b_N(x)$, Ecuación 38.

$$b(x) = \frac{b'_N(x)}{\int_{L_R} b'_N(x) dx} \quad (38)$$

donde L_R es la región ocupada por la zona de las raíces (L). La normalización de la distribución asegura que $b(x)$ se integra a la unidad sobre el dominio de flujo, Ecuación 39.

$$\begin{cases} \frac{1.667}{L_r} & x > L - 0.2L_r \\ \frac{2.0833}{L_r} \left(1 - \frac{L-x}{L_r}\right) & x \in (L - L_r; L - 0.2L_r) \\ 0 & x < L - L_r \end{cases} \quad (39)$$

Donde L es la coordenada x de la superficie del suelo (L) y L_r es la profundidad de las raíces (L).

HYDRUS-1 permite a un usuario definir prácticamente cualquier forma de la función de distribución de la absorción de agua, a condición de que esta función sea constante durante la simulación. Cuando la profundidad de enraizamiento varía en el tiempo (como se describe más adelante), sólo se utiliza la función de Hoffman y van Genuchten (1983). La parte inferior del perfil del suelo está situado en $x = 0$ y la superficie del suelo en $x = L$. A partir de la Ecuación 37 y la Ecuación 38, se deduce que S_p que se relaciona con T_p , Ecuación 40.

$$\int_{L_R} S_p dx = T_p \quad (40)$$

La distribución absorción de agua actual se obtiene sustituyendo la Ecuación 37 en la Ecuación 30 obteniendo la Ecuación 41:

$$S(h, h_\phi, x) = \alpha(h, h_\phi, x)b(x)T_p \quad (41)$$

Mientras que la tasa de transpiración real, T_a , se obtiene mediante la integración de la Ecuación 41, obteniéndose la Ecuación 42.

$$T_a = \int_{L_R} S(h, h_\phi, x) dx = T_p \int_{L_R} \alpha(h, h_\phi, x)b(x) dx \quad (42)$$

La profundidad de la raíz, L_R , puede ser constante o variable durante la simulación. Para cultivos anuales se requiere un modelo de crecimiento para simular el cambio en profundidad de las raíces con el tiempo.

HYDRUS-1 supone que la profundidad real de la raíz es el producto de la profundidad máxima de enraizamiento, L_m (L), y un coeficiente de crecimiento de la raíz, f_r (t) (Šimůnek y Suarez, 1993a) Ecuación 43.

$$L_R(t) = L_m f_r(t) \quad (43)$$

Para el coeficiente de crecimiento de las raíces, f_r (t), se utiliza la función de crecimiento logístico de Verhulst-Pear :

$$f_r(t) = \frac{L_o}{L_o + (L_m - L_o)e^{-rt}} \quad (44)$$

Donde: L_o es el valor inicial de la profundidad de las raíces en el comienzo de la temporada de crecimiento (L), y r la tasa de crecimiento ($1 \cdot T^{-1}$). La tasa de crecimiento se calcula ya sea desde la suposición de que 50% de la profundidad de enraizamiento se alcanza después de que haya transcurrido el 50% de la temporada de crecimiento, o de los datos dados.

Modelación de la absorción por parte de las raíces

El modelo HYDRUS-1 considera el proceso de compensación, el parámetro que lo caracteriza es el factor de adaptabilidad de la raíz o valor crítico de estrés hídrico. Este representa el valor

por encima del cual se reduce la absorción de agua o de nutrientes por parte de la raíz, producto de una situación de estrés en dicha zona. Esta situación se ve compensada por el aumento de la absorción en otras regiones del suelo que se encuentre menos estresado.

Además el modelo considera que la absorción de la raíz puede ser pasiva o activa, mientras que la componente pasiva representa el flujo de masa de nutrientes en las raíces con gradiente de potencial de agua favorable, la componente activa representa procesos metabólicos con gasto de energía que afectan el movimiento de nutrientes (Šimůnek et al., 2009).

Es decir que el componente activo representa el movimiento de nutrientes en las raíces inducidas por otros mecanismos que no son el flujo de masa, estos otros mecanismos incluyen la captación de iones específicos por gradientes electroquímicos, el bombeo de iones y la absorción a través de canales iónicos.

Condiciones iniciales

Se satisfacen prescribiendo una concentración inicial a la columna de suelo a simular. Se lo puede expresar como:

$$c(z,t) = c(z,0) \quad \text{para } t = 0 \text{ y } 0 < z < L \quad (45)$$

siendo L la longitud de la columna de suelo con origen en la superficie (L).

Sin embargo se puede prescribir una condición inicial distinta para $c(z,t)$.

Condiciones de borde

Estas pueden ser de dos tipos; Dirichlet o concentraciones constantes también llamada de primer tipo y de Cauchy o de tercer tipo, donde el flujo de solutos es de concentración prescrita. Ambas se fijan para un segmento superior o inferior de la columna de suelo a estudiar.

1. Dirichlet: expresa que la concentración en superficie $z=0$, o en la base $z=L$ es constante (c_0) y dada.

$$\begin{aligned} c(0,t) &= c_0 && \text{para todo } t \\ c(L,t) &= c_0 && \text{para todo } t \end{aligned} \quad (46)$$

Tiene la desventaja de mantener las concentraciones aún cuando el flujo ingresante sea nulo. Se ajusta adecuadamente para simular condiciones de freática, con presencia permanente de fase líquida.

2. Cauchy: expresa concentración constante en la solución que ingresa o sale del suelo

$$-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + q(0, t)c = q(0, t)c_s \quad (47)$$

Donde: D: coeficiente de dispersión ($L^2 T^{-1}$), C_s : concentración salina constante ($M^* L^{-3}$),

$$-\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + q(0, t)c = \theta_s \quad (48)$$

Donde: θ_s concentración del flujo que ingresa o egresa contante ($M^* L^{-3} T^{-1}$)

Esta condición de borde es usada para simular el movimiento de solutos cuando la solución que ingresa o sale del suelo tiene una determinada concentración. Así la cantidad de solutos entrantes y salientes dependerán del flujo intercambiado a través de los bordes.

Ecuación Adicional

El flujo de solutos o densidad del flujo en la masa de solutos por unidad de superficie transversal atravesada por el flujo por unidad de tiempo. El flujo de solutos $j(z, t)$ en la posición z y tiempo t , se expresa como:

$$J(z, t) = -\theta D \frac{\partial c}{\partial z} + qc \quad (49)$$

Coefficiente de dispersión

$$D = D_0 \tau + \lambda \left| \frac{q(z, t)}{\theta(z, t)} \right| \quad (50)$$

Donde: J flujo de solutos D_0 es el coeficiente de difusión moléculas, τ es el factor de tortuosidad del suelo, λ es la dispersividad, q es el flujo de agua y θ el contenido de humedad. El factor de tortuosidad se estima a través de varias posibles expresiones entre ella la de Millington y Quirk (1961) en función de la porosidad.

Para la solución del sistema acoplado basado en la discretización de las Ecuaciones 49 y 50 se han propuesto diversos algoritmos de reconocida eficacia aplicable a condiciones muy diversas. Cabe mencionar que existen una serie de restricciones e inconvenientes numéricos en la resolución de este sistema complejo de ecuaciones. Los mismos han sido solucionados en base a esfuerzo en el desarrollo de nuevos métodos numéricos y al notable crecimiento en los recursos computacionales.

No es el propósito en este trabajo entrar en la discusión de los métodos numéricos y códigos computacionales que se emplean para dar solución a las ecuaciones de flujo y transporte, sino utilizarlos como herramienta para la investigación de estos procesos.

5.3. MATERIALES Y METODOS

En este punto se desarrollaron dos experimentos. En el primero se comparan los resultados obtenidos por dos modelos distintos, uno que utiliza el balance de masas, como forma de resolución (WINISAREG) y el otro el que utiliza la ecuación de Richards (HYDRUS-1), sobre el sitio de campo denominado 1.

El segundo experimento consistió en aplicar el modelo HYDRUS-1 en dos sitios (2 y 3) con distintas características de suelo, manejo de riego, profundidad de la capa freática, entre las más importantes. Los resultados obtenidos, en cada sitio, permitirán generar los fundamentos necesarios para proponer el manejo de riego en cada caso. Cabe aclarar que ambos sitios son ejemplos típicos de la problemática del Distrito.

5.3.1. Relevamiento de datos

5.3.1.1. Sitio 1

Para contrastar los resultados de la aplicación de los dos modelos de simulación (WINISAREG e HYDRUS-1) se utilizaron los datos obtenidos del trabajo “Manejo del riego en un monte frutal con niveles freáticos críticos. Aplicación del modelo de balance hídrico WINISAREG” correspondiente a Montenegro et al. (2014), y quien suscribe que es uno de los co-autores del mismo.

La aplicación de ambos modelos se realizó sobre una propiedad del Alto Valle de Río Negro, cultivada con manzana variedad Cripp’s Pink (Pink lady), en espaldera con un marco de plantación de 4m x 2m y con riego por superficie por melgas, sin desagüe al pie.

El perfil de suelo donde se realizó el ensayo posee una textura franco limosa con presencia de capa freática a 90 cm de profundidad. Se obtuvieron muestras de cada horizonte y se las llevó a laboratorio donde se obtuvieron los valores de contenido hídrico a capacidad de campo (CC a 33 kPa) y a punto de marchitez permanente (PMP a 1500 kPa), además del porcentaje de arena, arcilla y limo constitutivos de cada estrato (Anexo 1).

Los datos de cultivo como profundidad de raíz, umbral de riego, ciclo y coeficiente de cultivo, fueron obtenidos de Allen et al. (2006), y ajustados según información proporcionada por las cátedras de Fruticultura y Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Comahue.

Para implementar el modelo WINISAREG se relevaron datos de campo durante la temporada 2011-2012. Se extrajeron muestras de suelo semanalmente para determinar la humedad a 40 cm y 60 cm de profundidad, además de medir simultáneamente la profundidad de la capa freática (Anexo 1).

El cálculo de la contribución de las aguas subterráneas (G_c) y la percolación profunda (D_p), que realizan estos modelos, es a través de los algoritmos propuestos por Doorenbos y Pruitt (1977) en Liu et al. (2006).

Por otro lado la curva de retención no fue incluida al programar el plan de monitoreo, dado que la simulación en el modelo WINISAREG no lo requiere como dato de ingreso, debido a esto para realizar la simulación, en el modelo HYDRUS-1, se tomaron los parámetros que ofrece el modelo para distintos tipos texturales de suelo.

De la curva de retención sólo se tenían dos puntos, capacidad de campo y punto de marchitez permanente, cantidad insuficiente para el ajuste de una curva, además de valores de densidad aparente y porcentaje de arena, arcilla y limo de cada estrato (Anexo 1).

En el modelo WINISAREG se necesitan los valores del coeficiente del cultivo, a diferencia del modelo HYDRUS-1 que utiliza la curva de Feddes et al. (1978) para estimar la absorción de raíces (Anexo 1).

Al momento de simular, las ecuación elegida para la determinación de la curva de retención, por el modelo HYDRUS-1, fue la de Van Genutchen (1980) sin histéresis y las condiciones de borde dependientes para la parte superior las “Atmospheric Boundary Condition with Surface Layer” (Simunek et al., 2013).

Al seleccionar estas condiciones de borde el potencial de flujo de agua a través de la parte superior se controla por las condiciones externas, es decir involucra la dependencia entre el suelo y el exterior.

La condición de borde inferior está dado por el nivel freático variable a lo largo del período analizado, como se tenía un sólo valor semanal se realizó una interpolación entre datos de manera de representar la variación diaria de la misma (Anexo 1).

Las simulaciones se realizaron sólo considerando el transporte de agua en el perfil, no se incluyeron sales debido a que el trabajo con el cual se compararían los resultados no había considerado este componente.

5.3.1.2. Sitio 2 y 3

Para la determinación de los datos de campo, que se utilizaron en el modelo de simulación, se instaló una mini central meteorológica de 4 canales “METEO-CAVADEVICES”, durante el período de desarrollo del cultivo (septiembre-marzo) a los largo de dos años consecutivos. La estación posee 5 sensores: temperatura del aire, pluviómetro, humedad relativa ambiente, radiación solar, freatógrafo y dos sensores de humedad de suelo (Fotografía 1,2,3, y 4).

En el primero año, 2013- 2014, la estación se ubicó en la propiedad del Sr. Buschiazzo (Sitio 2) y en el año siguiente, 2014-2015, se trasladó a la propiedad del Sra. Valeria Esguekian (Sitio 3) (Figura 3).

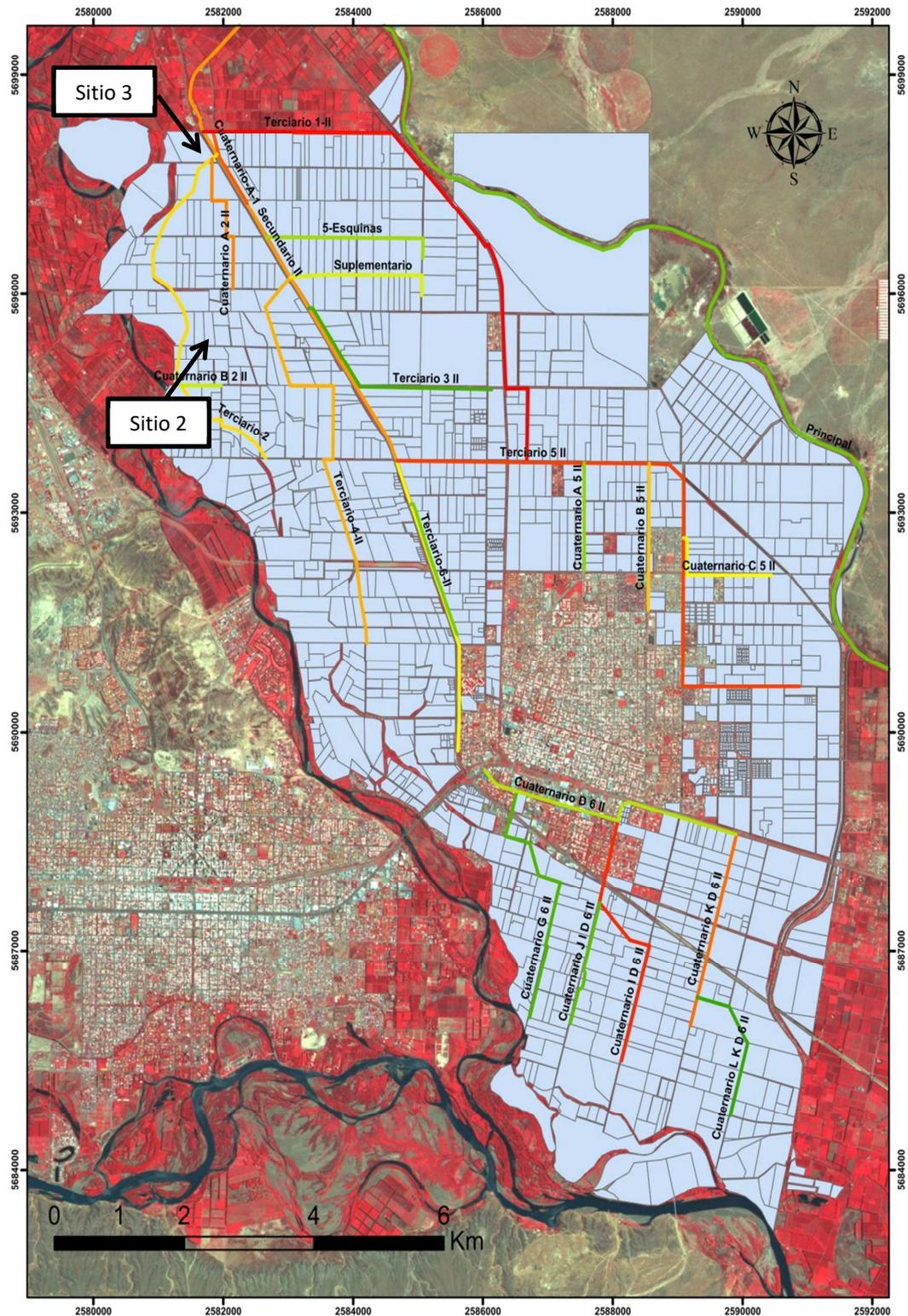


Figura 3: Ubicación de canales donde se determinó la eficiencia de distribución (Fuente: Distrito de Riego de Cipoletti).



Fotografía 1 y 2: Instalación estación.



Fotografía 3: Instalación freatígrafo.



Fotografía 4: Estación instalada.



Fotografía 5: Determinación datos Watermark.



Fotografía 6: Medición profundidad capa freática.

La recolección de los datos se hizo semanalmente, en el sitio 2 y 3 se instalaron 2 sensores de la estación-ECH20 (Fotografía 4) y 2 sensores Watermark (Fotografía 5 y 6), la ubicación de los sensores fue a 30 y 60 cm de profundidad respectivamente, además se midió el nivel freático (Anexo 1).

En el sitio 3, se extrajeron además con igual frecuencia, muestras de humedad de suelo a 30 y 60 cm de profundidad, que se enviaron al laboratorio LASAF (Laboratorio de Suelos de la Provincia del Neuquén), para su posterior análisis (Anexo 1).

Paralelamente al momento de la instalación de la estación (sitio 2 y 3), se obtuvieron muestras del perfil de suelo que fueron enviadas al laboratorio del INTA-Mendoza para la determinación de la curva de retención hídrica, dato fundamental para calibrar el modelo HYDRUS-1 (Anexo 1).

Los valores de contenido de humedad relevados en el sitio 2 y que se usaron para calibrar el modelo fueron los obtenidos de los sensores Watermark (Anexo 1).

En el sitio 3, al analizar los datos, se observó que los sensores Watermark y los datos obtenidos en el laboratorio eran correlacionables, destacándose que en el caso de los sensores Watermark los máximos valores de humedad, eran más acentuados que en los datos de laboratorio en la franja de 0-30 cm, posiblemente atenuados por estar medidos sobre volúmenes distintos, cabe aclarar que los máximos son coincidentes con los riegos o precipitaciones producidos en el área. Los valores de los sensores ECH20, se descartaron ya que no resultaron confiables (Anexo 1).

El modelamiento del flujo y transporte fue cuantificado mediante las ecuaciones descriptas en este capítulo y permitió simular el funcionamiento hidrológico de la zona no saturada para distintas situaciones y en diferentes sitios a lo largo del período de cultivo.

Posteriormente los resultados obtenidos permitieron evaluar y proponer alternativas que influían sobre variables que permiten optimizar el manejo del riego.

El esquema de modelización aplicado en términos generales se repite para los distintos casos, se consideró una columna de suelo abierto superior e inferiormente, y que fue representada a partir de la determinación de los estratos existentes en cada situación.

En el sitio 2 se tomó un perfil de suelo de 3 metros de profundidad con dos estratos bien diferenciados y en el sitio 3 la columna poseía una profundidad de 2 m también con dos estratos diferentes.



Fotografía 7: Medición nivel freático.



Fotografía 8: Extracción muestra suelo.

Las ecuaciones elegidas para la determinación de la curva de retención fue la de Van Genuchten-Mualem (1980) sin histéresis. Dicha ecuación contienen cinco parámetros independientes: contenido de agua residual (θ_r), contenido de agua de saturación (θ_s), α (es el valor inverso de entrada de aire), n (índice de distribución de tamaño de poros), y K_s (conductividad hidráulica saturada) y la conectividad de poro (l). Normalmente θ_s es menor en un 5 a 10 % menor que la porosidad porque hay aire atrapado o disuelto y el parámetro de conectividad de poro (l), se estimó en función de la conductividad hidráulica (Mualem, 1976) con un valor de 0.5 como promedio para muchos suelos

En este trabajo se usan condiciones de borde dependientes para la parte superior "Atmospheric Boundary Condition with Surface Layer", el potencial de flujo de agua a través de la parte superior se controla por las condiciones externas, es decir involucra la dependencia entre el suelo y el exterior.

La condición de borde inferior en ambos sitios fue "presión variable", donde se considera que la capa freática fluctúa a lo largo del período.

Los nodos de observación, que se contrastarían con los valores simulados por el modelos, se ubicaron en dos puntos 30 cm y 60 cm de profundidad, coincidentes ambos puntos con los datos que se relevaron a campo.

La distribución de raíces en el perfil se especifica en base a las observaciones realizadas en las calicatas de relevamiento. La distribución elegida en todos los casos fue 40, 30, 20 y 10 % de densidad de raíces, a lo largo de la profundidad de raíces del cultivo, para cada sitio. La profundidad de raíces del cultivo tiene relación directa con la profundidad a que se encuentre la capa freática en cada sitio.

La evapotranspiración potencial o de referencia (ET_p) se calculó mediante el método de Penman-Montheit a partir de datos diarios de radiación (o nubosidad), temperatura, humedad y viento (Cropwat 8.0-FAO, 2000).

El valor de evapotranspiración fue asimilado a la transpiración por parte del sistema vegetal considerando que la extracción de agua por las plantas se produce en un área que posee cobertura total. Esa condición se asemeja a la situación real dado que la humedad se extrae principalmente del horizonte radical.

La precipitación utilizada fue la observada, distribuida uniformemente en el día, además se sumaron a esta componente los aportes correspondientes al riego para cada situación.

Es importante aclarar que en el sitio 2 las profundidades a que se encontraba la capa freática eran superiores al 1.70 m a diferencia del sitio 3 donde se encontraron valores mínimos de 0.70 m, situación que genera problemas en el desarrollo de las raíces a profundidades mayores.

En el sitio 2 el capataz de la propiedad informó que los días en que se había regado la parcela fueron: 29/9, 13/10, 30/10, 8/11, 24/11, 10/12, 18/12, 26/12, 11/1, 26/1 y 19/2.

En el sitio 3 dado que la capa freática se encontraba a escasa profundidad los riegos eran menos frecuentes, según la información del capataz los días de riego fueron: 5/11, 18/11, 17/12, 18/1, 4/2 y 18/3.

En el caso del sitio 2 se trataba de perales de variedad Williams y en sitio 3 de frutales de peral de variedad Abate Fetel y Packham's Triumph.

5.3.2. Calibración del modelo HYDRUS-1

Ante de aplicar un modelo de simulación es imprescindible calibrar el mismo, es decir ajustar los parámetros de manera de que los valores calculados se ajusten a los observados con un error prefijado, de manera de luego utilizarlo para analizar distintos escenarios.

En este trabajo se efectuó la calibración a partir de los datos relevados en el período 2011-2012 para el sitio 1, en el período 2013-2014 para el sitio 2 y 2014-2015 para el sitio 3.

Se determinaron los parámetros humedad de saturación (θ_s) y residual (θ_r), así como α y n , valores que se ajustaron al modelo analítico de Van Genuchten con $m = 1 - 1/n$, con la ayuda del programa software RETC (Van Genuchten et al., 1991).

Para obtener dichos parámetros se utilizaron los porcentajes de materiales de cada estrato para el sitio 1 y las curvas de retención de cada uno de los estratos de los perfiles del sitio 2 y 3, obtenidas en el laboratorio.

Dichos parámetros se los introdujo en el modelo HYDRUS-1 y se completó la calibración ajustando la conductividad hidráulica saturada, las condiciones de humedad iniciales y haciendo un ajuste fino de los parámetros del suelo sobre todo de la humedad de saturación.

La calibración se realizó en forma manual de manera de identificar el efecto que ejerce cada parámetro sobre la forma de la curva. Fox (1981) recomienda cuatro expresiones para evaluar

la representatividad de un modelo, siendo la más empleada, el error medio absoluto (MAE) (Ecuación 51) y la raíz del el error cuadrático medio (RMSE) (Ecuación 52).

$$MAE = \frac{\sum_1^n |P_i - O_i|}{n} \quad (51)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_1^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (52)$$

Dónde: P_i son los valores simulados por el modelo, O_i son los valores observados y n el número de pares de datos.

El error medio absoluto (MAE) da una indicación con sesgo de los errores de simulación, mientras que la raíz del el error cuadrático medio (RMSE) representa la desviación estándar de las diferencias entre los valores simulados y observados, que siempre es un valor positivo.

Los parámetros calibrados fueron θ_r (humedad residual), θ_s (humedad de saturación), α (inversa de la presión de entrada de aire), n (parámetro empírico), y K_s (conductividad hidráulica saturada) para cada uno de los estratos que constituían el perfil de cada sitio.

Al calibrar los parámetros se observó que n , parámetro empírico, variaba para distintas condiciones de drenaje, valores de n mayores coinciden con suelos de buen drenaje, suelos con valores bajos de n , coinciden con suelos de textura fina.

El aumento en el valor de α genera un efecto de “aserruchamiento” en la función de contenido de humedad de suelo, que se pretende calibrar.

Los valores iniciales, que se tomaron como datos de partida, se obtuvieron de la curva de tensión humedad obtenida en laboratorio.

Los valores de los parámetros obtenidos en la calibración, tanto en el sitio 2 como en el sitio 3, fueron menores que los correspondientes a la curva de retención obtenida en el laboratorio (Tabla 2).

Tabla 2: Valores ajustados de los parámetros del suelo en sitio 1, 2 y 3.

Sitio 1	θ_r	θ_s	α	n	l
0-40	0.07	0.4	0.021	1.41	0.5
40-60	0.09	0.38	0.04	1.56	0.5
Sitio 2	θ_r	θ_s	α	n	l
0-30	0.12	0.43	0.008	1.7	0.5
30-60	0.16	0.41	0.006	1.55	0.5
Sitio 3	θ_r	θ_s	α	n	l
0-30	0.15	0.35	0.05	1.3	0.5
30-60	0.13	0.40	0.03	1.4	0.5

Los valores definitivos de los parámetros de la curva de retención, se establecieron luego de analizar el error absoluto medio (MAE) y el error de raíz media cuadrática (RMSE), dichos resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Errores del obtenidos en la calibración sitio 1, 2 y 3.

	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3
MAE (cm ³ cm ³)	0.027	0.009	0.021
RMSE (cm ³ cm ³)	0.034	0.011	0.027

Cabe aclarar que los valores de MAE y RMSE dan una medida global de la diferencia entre los datos relevados (humedad observada) y de las predicciones del modelo (humedad simulada), es decir cuantifica la bondad de la simulación, valores cercanos a cero indican una buena predicción. Los valores de RMSE encontrados en la distintas calibraciones indican que el contenido de agua estaba ligeramente sobreestimado por el modelo en todos los casos.

En relación a la validación de los datos, última etapa metodológica para implementarlo, dado que se contaba con sólo un período, se pensó inicialmente en dividirlo en dos partes: de setiembre a diciembre para calibrar y, de enero a marzo para validar, situación que se consideró aproximada a calibrar todo el período y analizar si se logró un ajuste adecuado a lo largo del mismo. En realidad lo que correspondería es validar el modelo con un conjunto de datos del mismo período pero de años distintos, esto se desestimó porque exigía exceder los tiempos estipulados para el desarrollo de esta Tesis.

5.4.RESULTADOS

5.4.1. Comparación de los modelos de balance hídrico y modelo dinámico- Sitio 1

En el modelo WINISAREG se simuló el contenido de humedad a 40 cm (Figura 4) y a 60 cm (Figura 5) de profundidad. La franja entre la línea marrón ($CC=FC$) y la roja representa el Agua Fácilmente Aprovechable (AFA), por debajo de la cual la planta está sometida a estrés hídrico. La línea negra representa, el punto de marchitez permanente (WP).

En las Figuras 3 y 4 se pueden observar los puntos rojos (valores observados) y la simulación realizada por el modelo (línea verde), encontrando un buen ajuste del modelo en las dos situaciones analizadas, 40 y 60 cm.

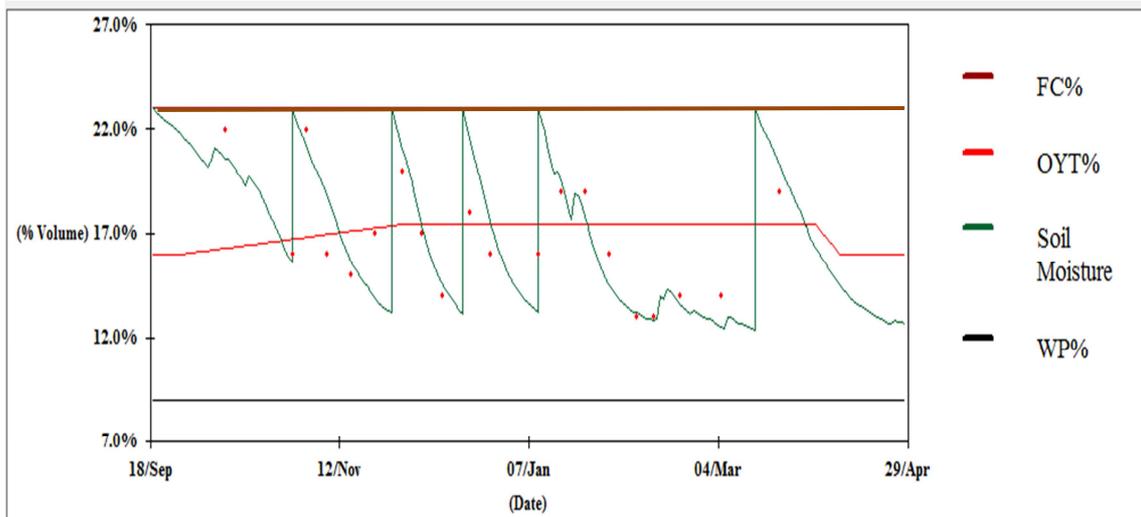


Figura 4: Evolución de la humedad del suelo en la zona de la rizósfera – 40 cm .

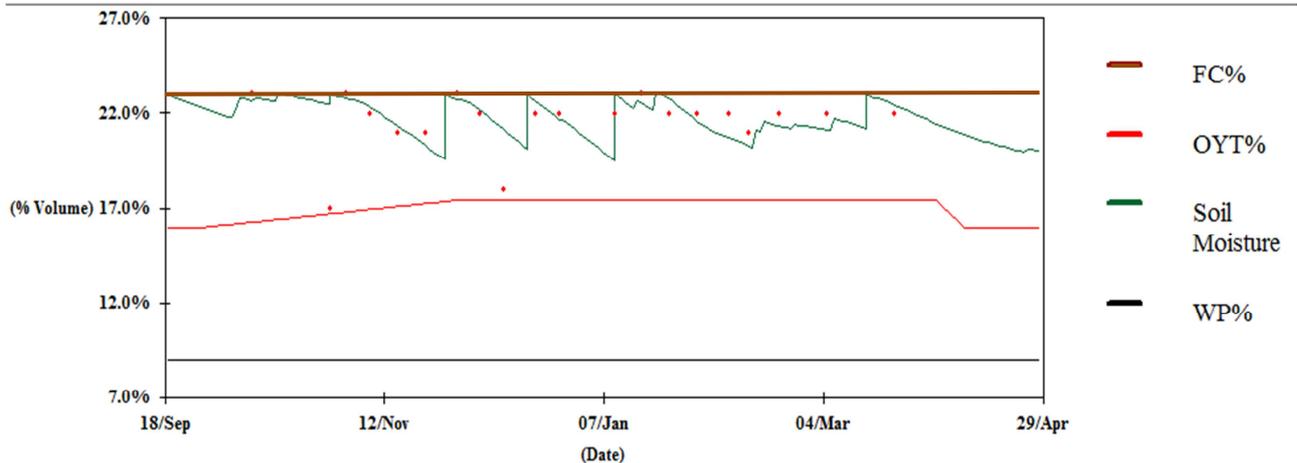


Figura 5: Evolución de la humedad del suelo en la zona de la rizósfera – 60 cm .

Los resultados del modelo indican que a 40 cm se produce un aporte capilar de 161 mm y nulo a 60 cm. En realidad existe también, un aporte capilar a 60 cm, proveniente de la freática pero éste está enmascarado en la simulación dado que el WINISAREG no lo explicita cuando la humedad del suelo se encuentra fuera de la zona de agua fácilmente aprovechable.

Esto quedó demostrado al intentar calibrar los valores de humedad, dado que lo único que permitía el ajuste a 60 cm era disminuir los valores de los coeficientes de cultivo (entre 0.1 y 0.3), situación que es errónea porque esto significaría que estaría evapotranspirando menos, y en realidad la demanda de la atmósfera es la misma.

La necesidad del cultivo, en realidad, es suministrada mayoritariamente por la capa freática a través del ascenso capilar, valor que correspondería a la diferencia entre el coeficiente de cultivo real y el que se debería tomar para lograr un buen ajuste.

Es importante recordar que el modelo WINISAREG utiliza una ecuación empírica para determinar el aporte máximo del agua subterránea, no siendo recomendable para situaciones de este tipo (capa freática alta), donde se necesita exactitud en su estimación.

En la aplicación del modelo WINISAREG, a diferencia del modelo HYDRUS-1, los valores del perfil edafológico se mantuvieron constantes y no se tomaron como parámetros de ajuste. El ajuste fue realizado tomando como variable de ajuste o de calibración a los coeficientes de cultivo hasta lograr aproximar los valores reales a los simulados.

Posteriormente se aplicó en este trabajo el modelo HYDRUS-1 sobre la misma propiedad y utilizando los mismos datos relevados a campo que se utilizaron en el modelo WINISAREG.

Los términos del balance hídrico son difíciles de estimar con precisión en el modelo WINISAREG, por eso en muchos casos se aconseja la aplicación de los modelos que se basan en la ecuación de Richards, en estos modelos se puede estimar la evolución temporal de los procesos que ocurren en la zona no saturada tales como: absorción de raíces, percolación profunda, ascenso capilar, etc. Es decir mientras el WINISAREG trabaja en régimen permanente el HYDRUS-1 lo hace en régimen transitorio.

En las Figuras 6 y 7 se muestra la evapotranspiración acumulada potencial y real durante todo el período, en el primer caso el valor asciende a 943 mm y en el segundo a 610 mm.

La evapotranspiración potencial o de referencia representa la demanda atmosférica, mientras que la real representa lo que el suelo y la concentración salina del agua le permite tomar a las plantas, la diferencia entre ellas nos muestra los períodos de déficits hídricos y coincide con la disminución de humedad y el aumento de tensiones en la zona radical.

Las diferencias que se presentan entre la evapotranspiración potencial y real se debe a la cercanía de la capa freática a la superficie del suelo dado que puede producir períodos donde no exista la aireación suficiente. Producto de este problema el productor sólo aplica 5 riegos en la temporada, manejo que parece suficiente dado que las tensiones están dentro de los rangos adecuados. Algunos de los resultados obtenidos en el modelo se muestran en las Figuras: 6, 7, 8 y 9.

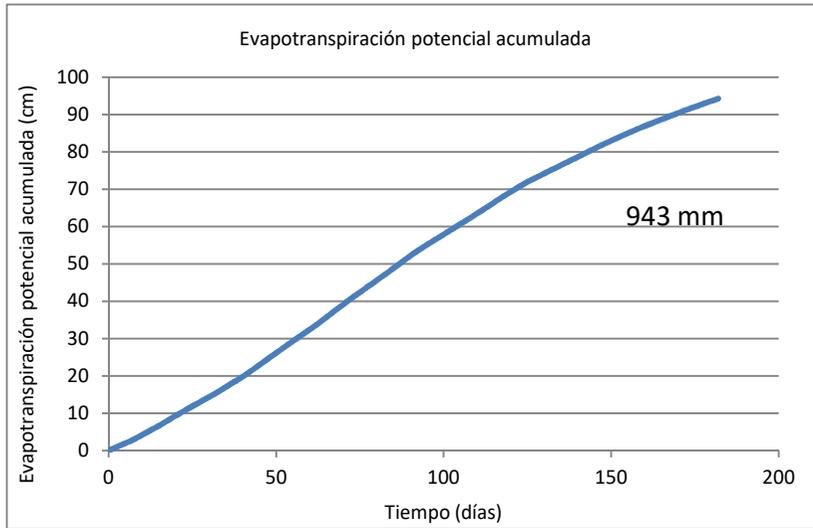


Figura 6: Evapotranspiración potencial-sitio 1.

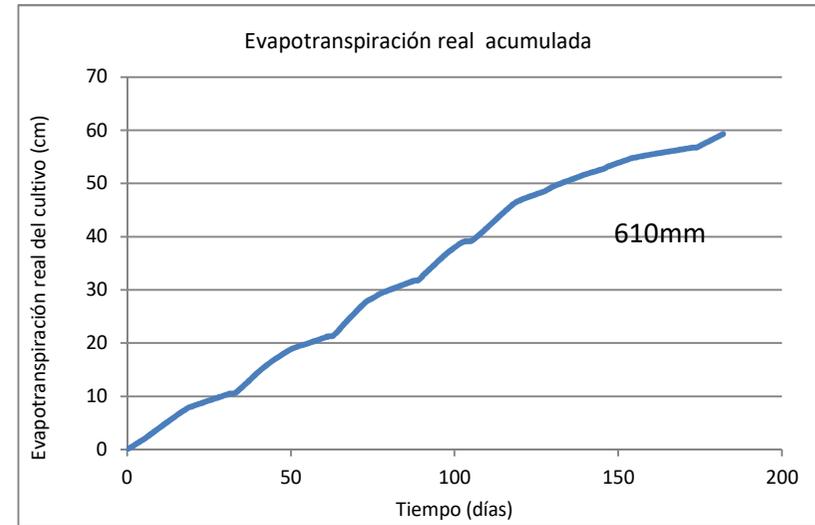


Figura 7: Evapotranspiración real-sitio 1

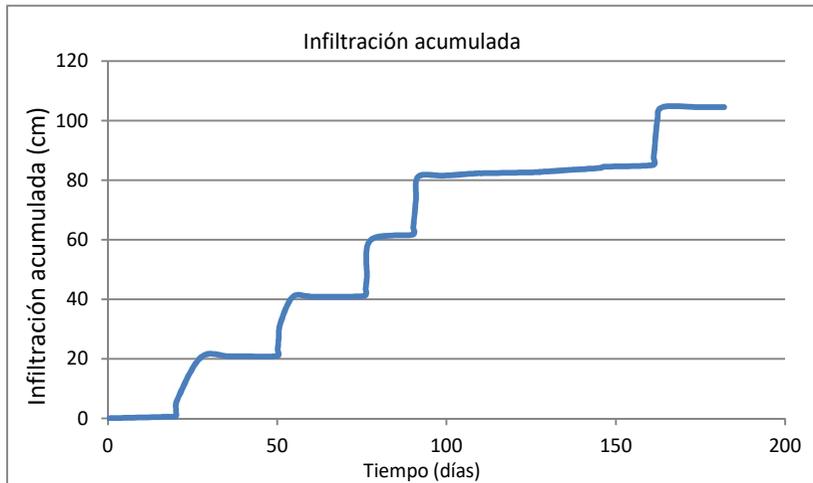


Figura 8: Infiltración acumulada-sitio 1

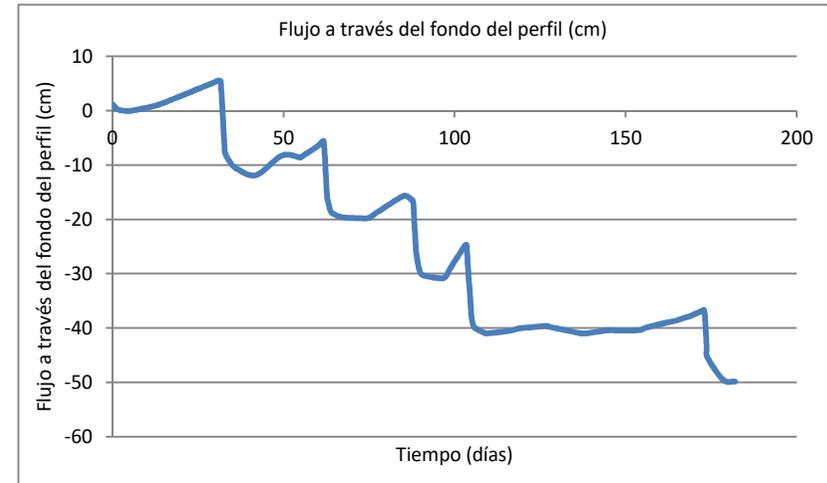


Figura 9: Flujo acumulado fondo del perfil-sitio 1.

En la Figura 8 se observa la infiltración acumulada durante todo el período analizado. En la Figura 9 se observa el flujo acumulado a través del límite inferior del perfil de valor negativo (sale del perfil), y que corresponde a los flujos acumulados por percolación profunda durante la totalidad del período de análisis.

En la Tabla 4, se analiza los valores obtenidos con ambos modelos para las variables más relevantes al final del período.

Tabla 4: Comparación de resultados entre modelo WINISAREG e HYDRUS-1.

Variable (mm)	WINISAREG	HYDRUS-1
Evapotranspiración real (ET_c)	925.7	610
Evapotranspiración potencial (ET_p)	1186.4	943
Relación ET_c/ET_p	0.76	0.65
Percolación profunda	858	496

En todos los casos el modelo WINISAREG sobrestima los valores de las variables en relación al HYDRUS-1. Al revisar trabajos, donde se aplicó el modelo WINISAREG, estos sugieren no utilizar este modelo en suelos limosos dado que el mismo estima la variable percolación profunda (D_p) mediante una fórmula empírica que supone que los flujos se producen en el día en que se aplica el exceso de agua, lo que no es cierto para los suelos donde el agua se mueve lentamente, como es el caso de los suelos limosos (Liu et al., 2006).

Esta podría ser una de las causas por la cual el WINISAREG sobreestime esta variable en el sitio 1, donde los suelos tienen características similares a los de textura limosa.

El enfoque que propone el modelo WINISAREG, a través de la resolución de soluciones empíricas, es relativamente fácil de implementar pero puede verse afectada por inexactitudes en la estimación de aporte de agua subterránea, ya que esto depende no sólo de las características del suelo sino también en la profundidad del agua subterránea y la evapotranspiración del cultivo.

El enfoque del WINISAREG tiene debilidades evidentes porque el aumento capilar se produce no sólo cuando el almacenamiento de agua en el suelo en la zona de raíces es menor que el umbral de estrés (W_t), sino también cuando el almacenamiento de agua en el suelo en la zona de raíces es mayor que W_t coincidente con una capa freática alta (Fernando et al., 2001).

Considerando la necesidad de superar las debilidades asociadas al modelo WINISAREG es que se sugiere utilizar nuevos enfoques paramétricos para la estimación de los flujos a través del límite inferior de la zona de la raíz, como son los modelos dinámicos.

En estos modelos el esquema desarrollado para resolver las ecuaciones del flujo en la zona no saturada ha mostrado una gran versatilidad para adaptarse a diferentes condiciones de contorno y sencillez operativa para la resolución de las ecuaciones, presentando una

convergencia satisfactoria a las soluciones analíticas y numéricas producidas por esquemas basados en diversas técnicas de integración en los problemas analizados (Zimmerman, 1998).

5.4.2. Situaciones críticas identificadas en el sitio 2 y 3

Históricamente, el Alto Valle de Río Negro y Neuquén ha tenido como limitante a la productividad de sus cultivos, el factor de anegamiento y salinización de sus suelos, consecuencia de un manejo deficiente del recurso hídrico en relación a las características del suelo y del acuífero. Las plantaciones de peral cv. William's son uno de los cultivos más afectados (Horne, 2010).

Diversos estudios realizados, entre ellos el Estudio Integral del Río Negro, diagnostican que el 40% del Alto Valle está afectado por freática alta y alrededor del 30% del área también por salinidad (CAyEE-PRN,1987).

En el Alto Valle de Río Negro predominan los métodos de riego por gravedad, siendo las melgas de inundación (o riego a 'manto') el método de riego más común, y el riego por surcos el segundo en importancia. Esto ocasiona la presencia de niveles freáticos poco profundos asociados a procesos progresivos de salinización de los suelos que alcanzan zonas con distinto grado de afectación, cerca del 40 % de la superficie regada del Alto Valle (Álvarez et al., 1995).

La profundidad de enraizamiento del peral cv. William's varía, según los diferentes suelos, entre 0.8 m y 1.00 m, por lo que la profundidad recomendada de la napa freática deberá ser de 1.20 m a 1.60 m respectivamente.

Cuando los niveles freáticos permanecen elevados entre riegos, se produce una absorción de agua freática por el cultivo que asciende por capilaridad, sobre todo en suelos limosos. Dado que la salinidad del agua freática es mayor que la del agua de riego (a veces mucho mayor, por ej. 4 o 5 mmhos) generando consecuencias sobre los cultivos como: aumento en el número de frutos, disminución de su tamaño, susceptibilidad a enfermedades, etc.(Manual Pera Williams, 2009).

En el trabajo del denominado "Análisis y Elaboración de datos freáticos e hidroquímicos del Alto Valle de Río Negro" ITAC (1995) se encontró que la zona que requieren drenaje por anegamiento y salinidad (Clase A) se encuentran ubicadas a lo largo de todo el Valle y contra la barda norte, abarcando un 24 % del área total. También se determinaron zonas dispersas, donde el horizonte de exploración radical posee problemas de anegamiento (Clase B) y alcanzan el 9 % del total. El 52% de la superficie requiere drenaje moderado (Clase C) y se ubica en la zona central del Valle y aladaña a la costa del río. Las clases se determinan

siguiendo el criterio del manual FAO 29 (1976). Dichas clases (A,B,C,D,E) están en función de los valores de profundidad y los valores de salinidad de la capa freática.

Asimismo, en el trabajo del ITAC (1995), se presenta una tabla que describe los porcentajes de las áreas de los Distritos del Alto Valle según profundidades críticas de la capa freática. En el caso del Distrito de Cipolletti, área de estudio de este trabajo, se encontraron los mayores porcentajes de profundidades menores de 1 m y 1.5 m (Tabla 5).

Se determinó que para profundidades menores de 1 m en un 58 % del área (mes de noviembre) y 8% del área (mes de julio). Esta situación se mantiene para profundidades menores a 1.5 m con 98 % (mes de noviembre) y 49% (mes de julio).

Tabla 5: Profundidades freáticas en los Distritos de riego en los meses de julio y noviembre. Fuente: “Análisis y Elaboración de datos freáticos e hidroquímicos del Alto Valle de Río Negro” ITAC (1995).

Distritos De Riego	< 1 metro		< 1.5 metro	
	Julio	Noviembre	Julio	Noviembre
C.Saltos	0.3	16	25	82
Cipolletti	8	58	49	98
Allen	2	32	26	67
Gral.Roca	1	14	9	54
Ing. Huergo	3	45	43	69
Villa Regina	2	19	13	69

Otra problemática identificada en el Distrito son los valores de eficiencia de riego que se manejan. En el Estudio Integral del Río Negro (CAyEE-PRN,1987) se registraron láminas de riego aplicadas de 158 mm en promedio para una lámina de reposición de 56 mm, es decir casi 3 veces la cantidad de agua necesaria (Nolting, 2004).

Si se calcula el volumen anual aportado se obtiene una lámina de 2.5 m de agua agregada en promedio por temporada, siendo que el requerimiento del cultivo es de alrededor de 1 m por ciclo (Horne, 2010).

En este mismo trabajo se realizaron evaluaciones a campo que arrojan valores comprendidos entre el 20 y 30 % de eficiencia de aplicación, coincidentes con resultado de trabajos realizados en la región.

Identificada la problemática del Distrito es importante proponer diferentes manejos del riego para cada una de las situaciones.

Cuando la capa freática es profunda (sitio 2) una de las variables a mejorar es la lámina de riego aplicada y su frecuencia.

La propuesta es definir una lámina de riego que logre eficiencias del 60 % (mayores a las actuales), y a partir de esta mejora en la eficiencia, poder simular otros escenarios que

consideren “riego controlado sin estrés”, en algunos períodos del cultivos. Se ha adoptado este concepto considerando a aquella programación de riegos que aseguren que las tensiones en la zona de raíces se encuentran dentro de los valores aconsejables para el cultivo.

En zonas donde la profundidad de la capa freática es elevada (sitio 3), la propuesta es construir un dren de manera de que la capa freática esté a una distancia adecuada y realizar una nueva programación de riego. En el caso que el productor no pueda construir un dren, dado los altos costos del mismo, determinar la frecuencia de riego para una lámina como la que aplica el productor, considerando la presencia de la capa freática como un aporte adicional a la zona de raíces.

Ambas situaciones se analizaran a través del modelo HYDRUS-1, calibrado para cada uno de los sitios.

La utilización del modelo es una de las herramientas que se utilizarán y la cual permite entender el funcionamiento de procesos de transporte de agua en la zona radical, conclusiones que permitirán mejorar el manejo actual del riego.

De esta manera se identificarán situaciones que cumplan condiciones de sustentabilidad del sistema, a partir de la simulación de diferentes escenarios. Las condiciones que debían cumplir para considerar el sistema sustentable fueron:

- ✓ Tensiones dentro de rangos adecuados para el cultivo, según los parámetros de Feddes.
- ✓ Percolación profunda mínima necesaria para el lavado de sales.

5.4.2.1. Análisis sitio 2

5.4.2.1.1. Diagnóstico de la situación – sitio 2

De las salidas obtenidas se analizaron algunos gráficos que permiten determinar la situación de cada sitio en las condiciones actuales de funcionamiento.

En el sitio 2, la Figura 10 indica la relación entre la evapotranspiración real y la potencial, relación que definieron Jackson et al. (1981) denominado, Crop Water Stress Index (CWSI).

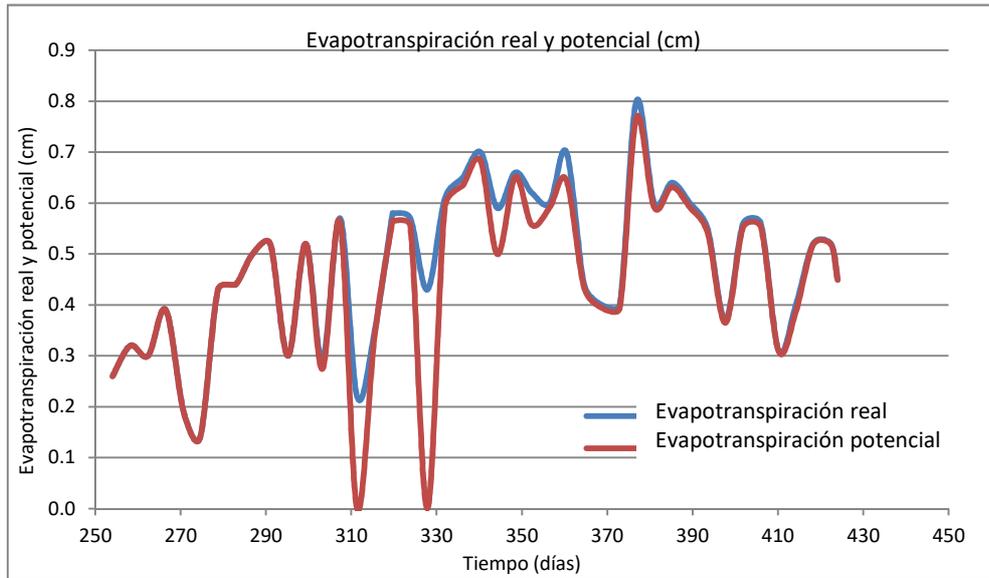


Figura 10: Evapotranspiración potencial y real-sitio 2.

Esta relación (ET_r/ET_p) es igual a 1 cuando el cultivo se encuentra transpirando a su tasa potencial, mientras que cuando se encuentra en condiciones de estrés dicha relación es cero. En este sitio dicha relación alcanza la unidad el 61 % de las veces. En la Figura 10 se han graficado ambas variables, obteniéndose algunos puntos que no coinciden, producto de la aplicación del riego.

En la Figura 11 se presentan las tensiones a que se encuentra sometido el cultivo encontrándose éstas en rangos aceptables (-25 y -800), salvo valores puntuales que se escapan del rango en la fechas donde se aplica la lámina de riego.

La eficiencia de aplicación en este sitio alcanza el 38 %, valor semejante a los valores determinados en el Capítulo 2.

La eficiencia se obtiene como el cociente entra la absorción real de las raíces (789 mm) y la lámina aplicada (2082 mm).

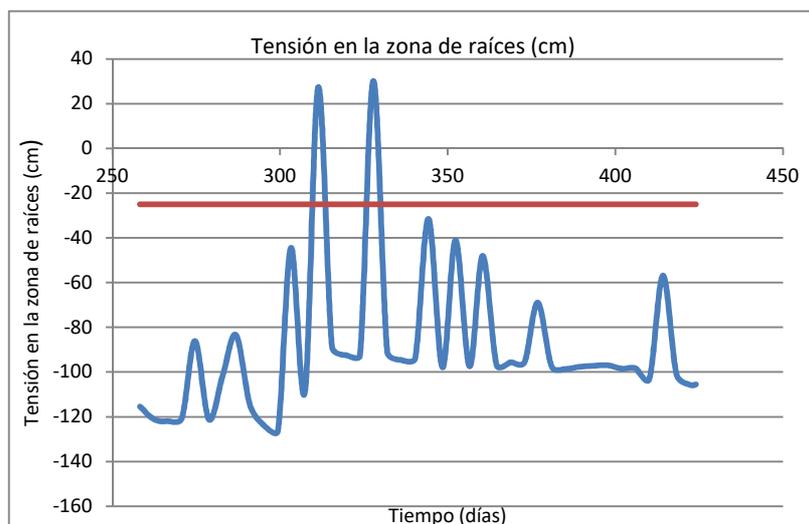


Figura 11: Tensiones en la zona de raíces-sitio 2

5.4.2.1.2. Manejo y programación del riego- sitio 2

Con el fin de lograr las condiciones para que el sistema sea sustentable minimizando la percolación profunda y manteniendo los rangos de tensiones sobre el cultivo dentro de los valores recomendados por Feddes et al.(1978), se realizó un manejo del riego sobre la parcela, diferente al actual.

Para lograr este objetivo se definió una nueva programación de riego con ayuda del programa CROPWAT (Cropwat 8.0-FAO, 2000) a partir de los datos relevados a campo (clima, suelo y cultivo), dicha programación se adoptó como la más adecuada para esas condiciones. Los resultados obtenidos en el CROPWAT constituyen los datos que se incluirían en la primera simulación del HYDRUS-1, en la cual no existe ningún tipo de restricción en la aplicación de agua.

Para esta situación se adoptó una eficiencia de aplicación del 60 %, más elevada que la actual, pero posible de lograr por el productor.

En el cálculo se consideró nula la precipitación en todo el período y se supuso que la reposición se haría hasta un valor de humedad a capacidad de campo, es decir se regará cuando el perfil del suelo esté en agotamiento crítico que es cuando el Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) se ha usado completamente.

El AFA es la fracción de agua útil almacenada en el suelo, que el cultivo obtiene sin gasto energético extra (no produce estrés hídrico) (Montenegro et al., 2014).

En relación al cultivo se determinaron los coeficientes de cultivo inicial, medio y final para cada situación. Además se definió la profundidad del cultivo y la tasa máxima de infiltración.

Las necesidades de agua de los cultivos se determinaron a través de evapotranspiración de cultivo (ET_c), para el cálculo de esta variable se toma como base la información de clima (ET_p y precipitación efectiva), de los cultivos: duración de las etapas, coeficiente de cultivo (K_c), profundidad de raíces, nivel de agotamiento de agua del suelo y factor de respuesta de rendimiento (K_y) (Arteaga Ramírez et al., 2011).

En el sitio 2 el cultivo implantado es frutales de peral variedad Williams cuyo periodo se extiende desde el 2 de septiembre al 30 de abril (Tabla 6).

Tabla 6: Estados fenológicos del cultivo-Pera Williams.

Sitio 2	Despertar vegetativo	Plena Floración	Canopia completa	Reducción del índice foliar	80 % de amarilleo de hojas
Pera Williams	2/9	27/9	15/12	1/3	30/4

Posteriormente se simularon otras programaciones, controlando el aporte de agua en distintas etapas del cultivo, a partir del concepto de “riego controlado sin estrés”.

Se definió de esta forma de aplicación como una herramienta que se fundamenta en la estrategia de reducir el agua aplicada sin alterar las tensiones del cultivo y como consecuencia obtener una mejora en la eficiencia de aplicación.

La forma en que se simularon estas programaciones fue el propuesto por la FAO 66 (2012), en su trabajo “Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua” para cultivo de perales, definiendo las etapas en función de la tasa de crecimiento del fruto: Etapa I, Etapa II y Postcosecha.

Cabe aclarar que la Etapa I corresponde a la etapa inicial de crecimiento lento (desde 1 de noviembre a 31 de noviembre, aproximadamente), la Etapa II corresponde a la etapa de crecimiento rápido (desde el 1 de diciembre al 5 de febrero aproximadamente) (Mitchel et al., 1989) y la tercera la de Postcosecha donde los brotes seguirán desarrollándose a un ritmo más lento .

Dentro de las 3 etapas propuestas lo que no se simuló fue la reducción de la lámina de riego en la etapa II, dado que FAO 66 (2012) recomienda no producir estrés hídrico en climas de baja precipitación durante la estación cálida de manera de garantizar el máximo tamaño de fruto en la cosecha.

A pesar que el peral no es de los cultivos resistentes a la sequía, sus órganos y tejidos pueden soportar cierto grado de deshidratación.

La consistencia del resultado citado en FAO 66 (2012), referido a los diferentes experimentos sugiere que esta técnica puede utilizarse de manera segura para la producción de peras. Sin

embargo, el gran número de posibles combinaciones en las condiciones del peral (variedad, portainjerto, por densidad de plantación, por carga de fruto, por tipo de suelo y por tipo de clima) ofrece un conjunto de posibilidades aún no abordadas (Steduto et al., 2012).

Las simulaciones realizadas se presentan en la Tabla 7 :

Tabla 7: Escenarios simulados con el modelo HYDRUS-1.

Nro de Simulación	Características de la simulación
1	Riego controlado sin estrés en la Etapa 1- Se aplica el 40 % de la lámina aplicada inicial
2	Riego controlado sin estrés en Postcosecha-Se aplica el 10 % de la lámina aplicada inicial
3	Riego controlado sin estrés combinando las simulaciones y una mínima reducción en la Etapa II (20%)

En la Figura 12 se presentan los resultados obtenido por el programa CROPWAT para las condiciones relevadas.

PROGRAM. DE RIEGO DEL CULT.

Eto estación: Roca Cultivo: Williams Siembra: 01/09
 Est. de lluvia: Roca Suelo: Franco Cosecha: 28/04

Red. Rend.: 0.0 %

Crop scheduling options
 Momento: Regar a 100 % agotamiento
 Aplicación: Reponer a 100 % de capacidad de campo
 Ef. campo 60 %

Formato de Tabla: Program. de riego

Fecha	Día	Etapa	Precipi mm	Ks fracc.	ETa %	Agot. %	Lám.Net mm	Déficit mm	Pérdida mm	Lam.Br. mm	Caudal l/s/ha
1 Sep	1	Ini	0.0	0.00	0	100	136.3	0.0	0.0	227.2	26.30
20 Oct	50	Des	0.0	1.00	100	55	84.1	0.0	0.0	140.2	0.33
9 Nov	70	Des	0.0	1.00	100	51	81.5	0.0	0.0	135.8	0.79
24 Nov	85	Des	0.0	1.00	100	49	79.9	0.0	0.0	133.1	1.03
5 Dic	96	Des	0.0	1.00	100	43	71.4	0.0	0.0	118.9	1.25
15 Dic	106	Med	0.0	1.00	100	44	74.0	0.0	0.0	123.4	1.43
25 Dic	116	Med	0.0	1.00	100	44	75.1	0.0	0.0	125.2	1.45
3 Ene	125	Med	2.7	1.00	100	42	70.7	0.0	0.0	117.8	1.52
11 Ene	133	Med	0.0	1.00	100	41	70.5	0.0	0.0	117.4	1.70
20 Ene	142	Med	0.0	1.00	100	44	74.7	0.0	0.0	124.4	1.60
29 Ene	151	Med	0.0	1.00	100	40	68.6	0.0	0.0	114.3	1.47
8 Feb	161	Med	0.0	1.00	100	42	71.0	0.0	0.0	118.4	1.37
17 Feb	170	Med	3.9	1.00	100	41	69.4	0.0	0.0	115.6	1.49
27 Feb	180	Med	4.8	1.00	100	40	68.8	0.0	0.0	114.6	1.33
11 Mar	192	Fin	0.0	1.00	100	44	75.2	0.0	0.0	125.4	1.21
31 Mar	212	Fin	0.0	1.00	100	53	89.3	0.0	0.0	148.8	0.86
28 Abr		Fin	0.0	1.00	0	51					

Totales:

Lámina bruta total	2100.7 mm	Precipitación total	187.2 mm
Lámina neta total	1260.4 mm	Precipitación Efectiva	186.1 mm
Pérdida total de riego	0.0 mm	Pérdida tot.prec.	1.1 mm
Uso real de agua del cultivo	1363.0 mm	Def. de hum. en cosecha	86.5 mm
Uso pot. de agua del cultivo	1364.7 mm	Requer. reales de riego	1178. mm

Figura 12: Programación de riego para el sitio 2 mediante programa CROPWAT.

Los resultados obtenidos de las distintas simulaciones se presentan en las Figuras 13 a 16:

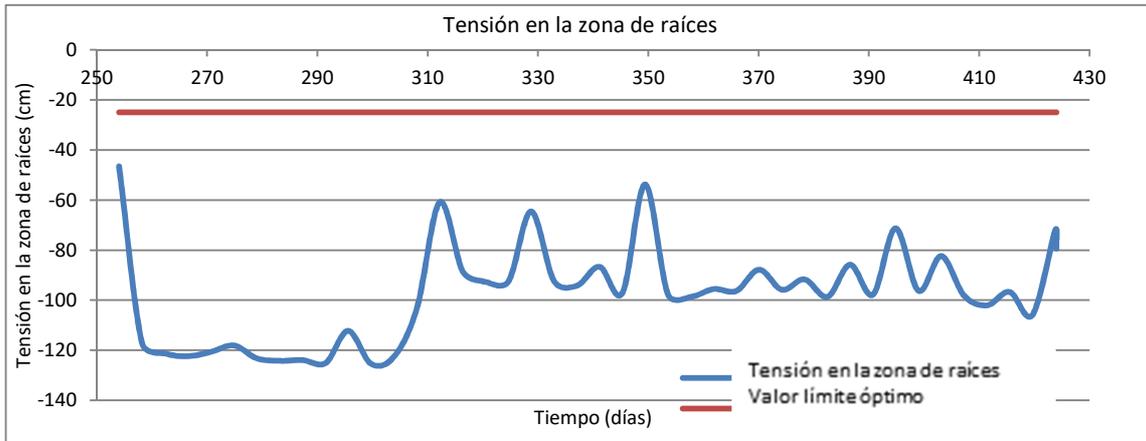


Figura 13: Tensión en la zona de raíces-CROPWAT

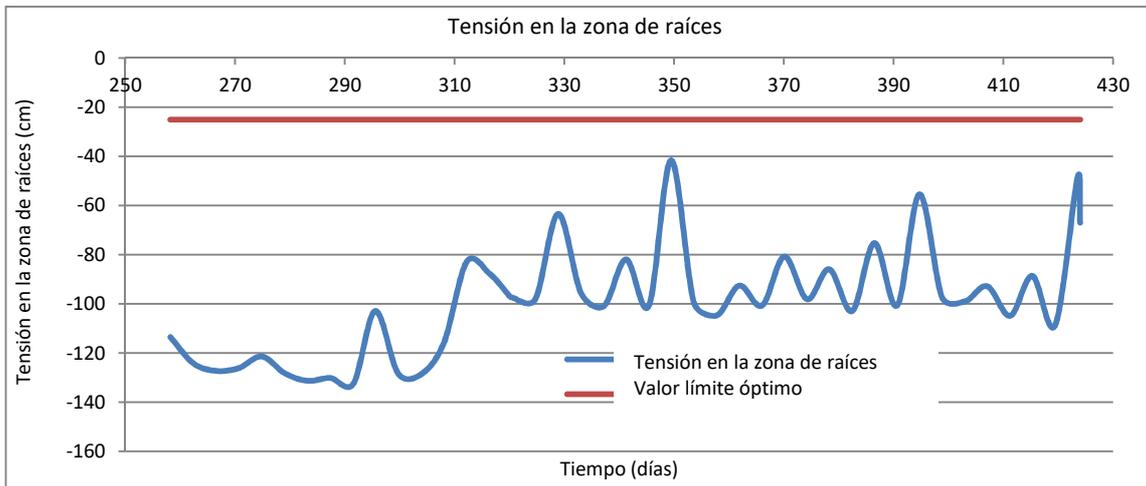


Figura 14: Tensión en la zona de raíces-Simulación 1: reducción 40 % Etapa 1

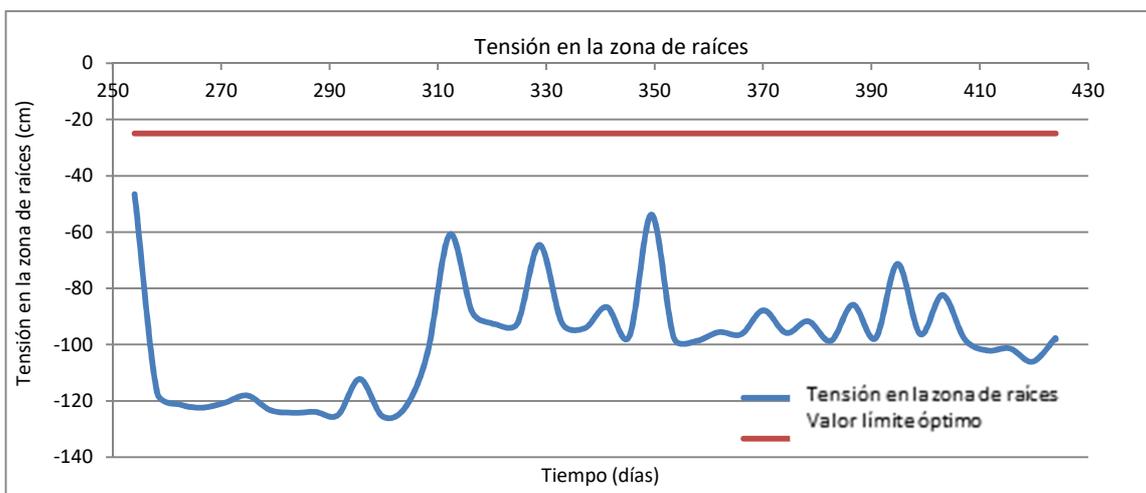


Figura 15: Tensión en la zona de raíces-Simulación 2: reducción 10 % en Postcosecha

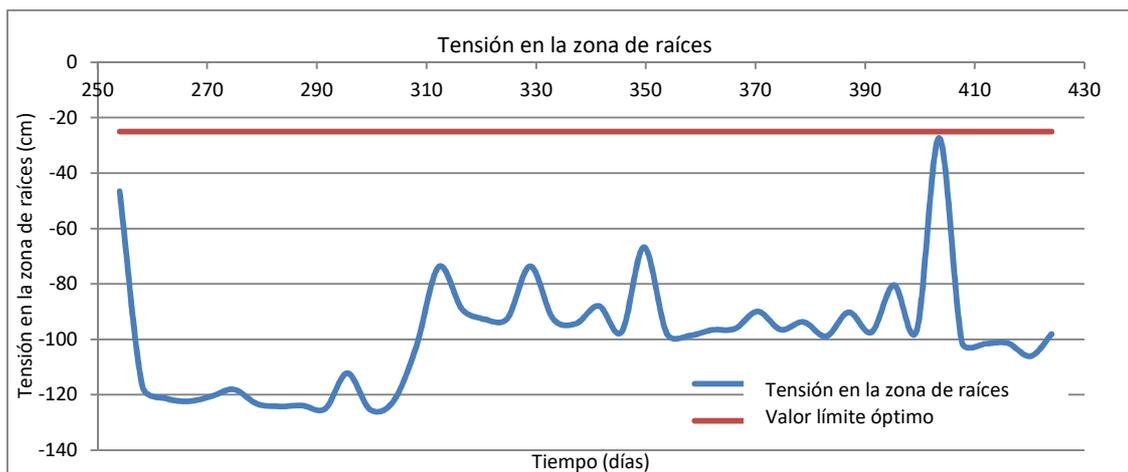


Figura 16: Tensión en la zona de raíces-Simulación 3: riego combinado.

En la Tabla 8 se presenta una síntesis de los distintos resultados obtenidos por el HYDRUS-1 para cada uno de los escenarios analizados:

Tabla 8: Resultados obtenidos con el modelo HYDRUS-1, para las distintas simulaciones-sitio 2.

Escenarios	1	2	3
Lámina aplicada (mm)	1188	1369	1087
Absorción del cultivo (mm)	721	739	747
Perdida por percolación (mm)	524	671	382
Reducción de lámina respecto a situación actual (%)	43	34	48
Eficiencia de aplicación (%)	61	54	69

Analizando las distintas situaciones se determina que realizar una combinación de reducción de láminas en distintas etapas (Simulación 3) sería lo más conveniente. Los resultados son similares con los obtenidos en los ensayos realizados por la FAO 66 (2012) donde se concluye que el enfoque más adecuado o prudente es aplicar una combinación en la Etapa I y postcosecha en combinación con una pequeña reducción en la etapa II donde se produce el crecimiento del fruto (Steduto et al., 2012).

Tomando la simulación que posee mejor resultado (Simulación 3), y a partir de la evapotranspiración potencial o de referencia (ET_p) y de la evapotranspiración real mensual (ET_c) simulados en el HYDRUS-1, para ese escenario, se ajustaron los valores mensuales de los coeficiente del cultivo para el cultivo de peral en un suelo franco y con capa freática profunda. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Valores de los coeficientes de cultivo ajustados.

Mes	ET _p (mm)	K _c CROPWAT	ET _c real simulado (mm)	K _c Combinado
Septiembre	3.7	0.45	2.91	0.78
Octubre	4.3	0.68	3.96	0.92
Noviembre	5.5	0.99	5.6	1.02
Diciembre	6.5	1.25	6.2	0.95
Enero	6.8	1.28	5.4	0.79
Febrero	6.2	1.28	3.83	0.62

Si ahora, se simula un riego controlado combinado, como el de la Simulación 3, con las mismas características que las del sitio 2 pero ahora sobre un suelo limoso, se observa que esta programación de riego sería inviable dado que las tensiones se escapan de los rangos aconsejados por Feddes et al. (1978), (-25-800). Como las tensiones están fuera de ese rango el valor de $\alpha(h)$ es distinto a la unidad y la absorción de la planta sería menor que la absorción potencial S_p (Figura 17).

Se observa que los valores se mantienen en el rango óptimo hasta el mes de marzo, luego descendiendo fuertemente a valores muy bajos, se observa que no es posible en este caso reducir al 10 % de la lámina de aplicación en la época de postcosecha.

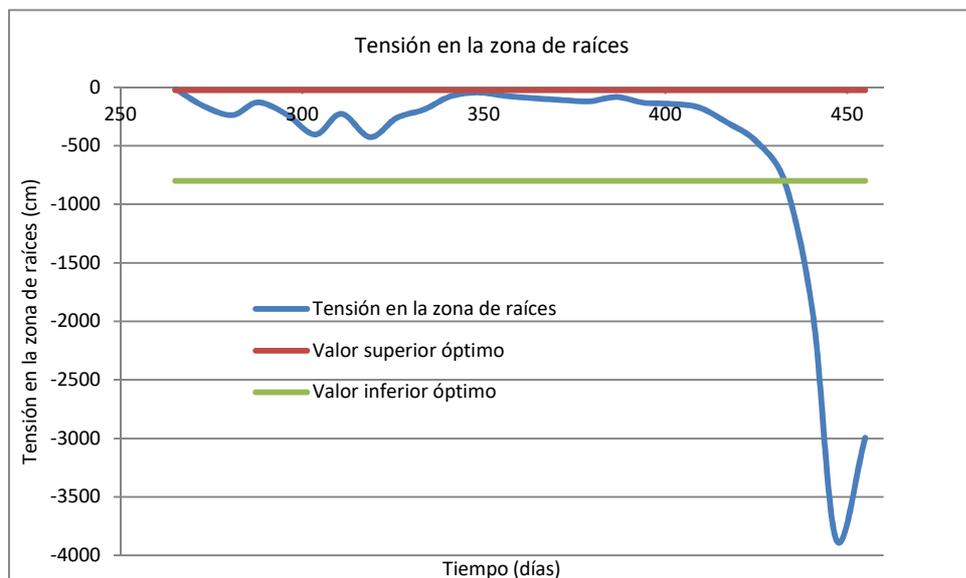


Figura 17: Tensión en la zona de raíces-Simulación 3 suelo limoso

Puede ocurrir que el manejo anterior, a pesar de ser una buena metodología para mejorar las eficiencias de aplicación, resulta una opción dificultosa para que la pueda realizar el productor en su parcela después de tanto tiempo de regar de la misma forma.

Por este motivo se propone una nueva opción, disminuir la frecuencia de riego y mantener la lámina que normalmente utiliza el productor, 200 mm.

Esta programación redujo la frecuencia de 11 riegos a 6 riegos, manteniendo la lámina que aplica normalmente el productor. Esta programación mantiene las tensiones en rangos adecuados como se observa en la Figura 18.

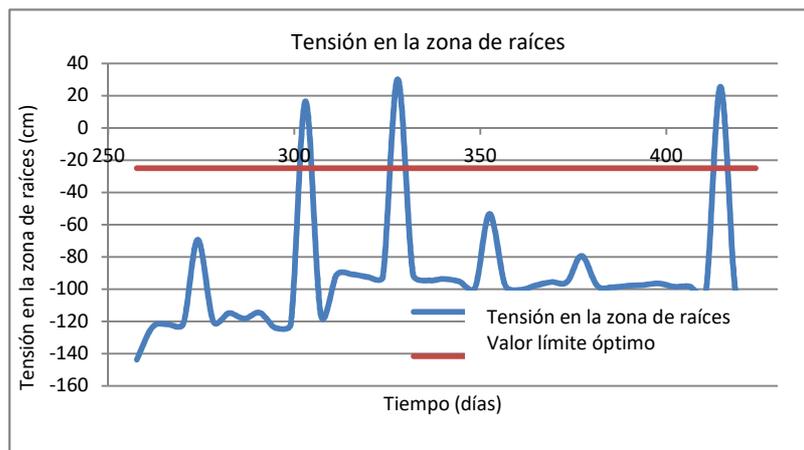


Figura 18: Tensión en la zona de raíces (frecuencia de riegos 6 durante el período)-sitio 2

Si se calcula la eficiencia de aplicación la misma alcanza un 61 %, dado que la lámina total aplicada es de 1283 mm y la que realmente toman las plantas de 783 mm.

A pesar que la eficiencia de aplicación es buena si se compara la figura de tensión con aquellos donde se aplicó riego controlado sin estrés, se observa que las tensiones a lo largo del período en muchos casos se encuentran superando el valor límite superior (-25 cm) Feddes et al. (1978), indicando situaciones de anegamiento en el perfil. Esta situación de anegamiento es habitual en riego gravitacional durante 24 a 48 h, pasado este lapso, se alcanza la capacidad de campo.

En las todas las Figuras de riego controlado sin estrés, las tensiones durante todo el período, se encuentran por debajo de dicho límite indicando un buen nivel de humedad en la zona de raíces y una absorción óptima de parte del cultivo.

A pesar que la eficiencia obtenida es menor a la encontrada a partir del riego deficitario, mejora la situación actual de cómo riega el productor, cuyo valor es de un 38 %.

5.4.2.2. ANÁLISIS SITIO 3

5.4.2.2.1. Diagnóstico de la situación-sitio 3

En el caso del sitio 3 las relaciones entre la evapotranspiración real y potencial sólo alcanzan la unidad en un 30 % de los casos (Figura 19).

Los valores de las tensiones, en un gran porcentaje son sensiblemente inferiores a -25 cm, producto de la presencia de la capa freática poco profunda, los mismos van disminuyendo cuando se aplica la lámina de riego (Figura 20).

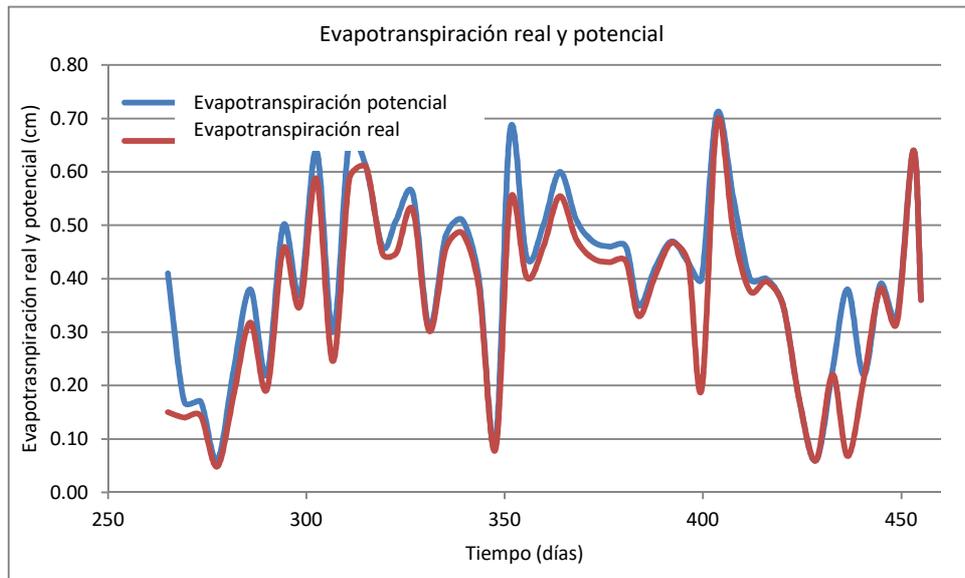


Figura 19: Evapotranspiración potencial y real-sitio 3

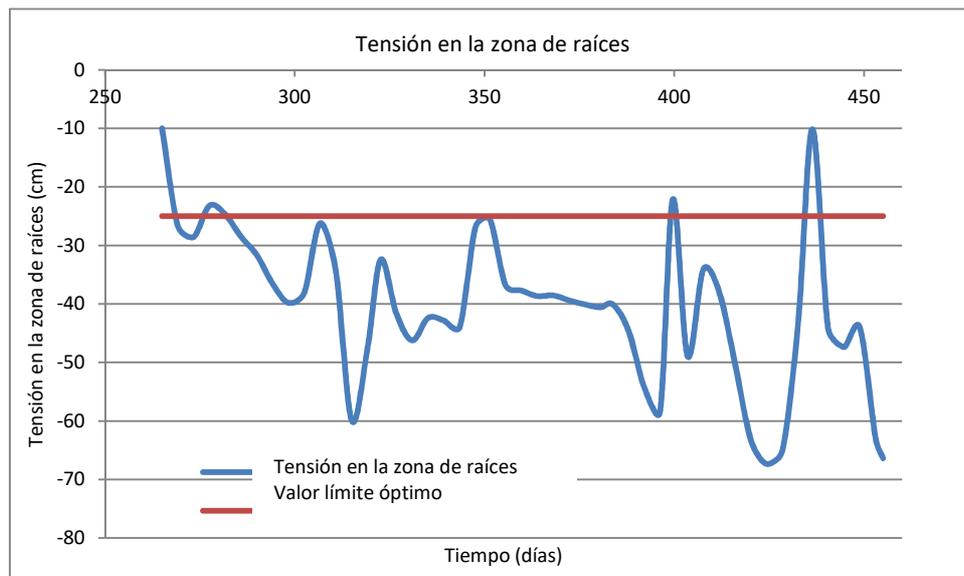


Figura 20: Tensión en la zona de raíces-sitio 3

Si se grafica la percolación profunda acumulada durante todo el período (Figura 21), se observa que dicha componente alcanza un valor de 479 mm, siendo un valor negativo dado que sale del perfil de suelo analizado.

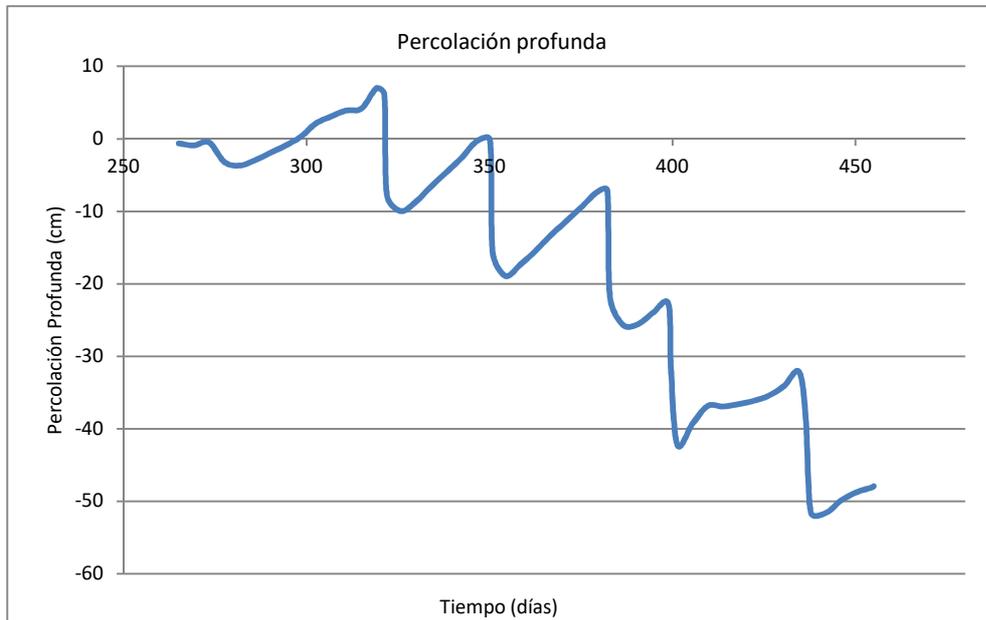


Figura 21: Percolación a través del fondo del perfil-sitio 3

Sería conveniente lograr un manejo tal que observando la profundidad de la capa freática se riegue lo mínimo posible cuando exista aporte capilar hacia la zona de raíces, disminuyendo lo que se pierde por percolación profunda.

5.4.2.2.2. Manejo y programación del riego – sitio 3

En esta situación se consideró la influencia negativa de la capa freática sobre el rendimiento de los cultivos, y a partir de allí, el manejo a lo largo del período de análisis.

El sitio posee graves problemas de anegamiento dado que la capa freática se encuentra a poca profundidad en la mayor parte del período.

Producto de estas condiciones es que se analizaron dos situaciones de manejo tendientes a mejorar las condiciones del área.

La primera propuesta fue diseñar un dren para disminuir la profundidad de la capa freática y a partir de allí determinar que lámina de riego es conveniente aplicar y su frecuencia de aplicación.

Para simular esta alternativa se debe cambiar la condición de borde inferior del modelo, utilizando “horizontal drains”.

En este caso el modelo propone dos soluciones analíticas diferentes en relación al drenaje de agua de la zona de raíces. La primera solución es la de la ecuación de Hooghoudt (Hooghoudt, 1940; van Dam et al., 1997) y la segunda solución analítica es la propuesta por Ernest (Ernst, 1962)(Ecuación 53).

$$q_{drain} = \frac{K_v * h_{dr}}{D_v} + \frac{8 \sum (K * D)_h * h_{dr}}{L_{dr}^2} + \frac{\pi * K_r * h_{dr}}{L_{dr} \ln \frac{\alpha_{dr} * D_r}{u}} + \frac{h_{dr}}{\gamma_{entr}} \quad (53)$$

Donde:

q_{drain} : velocidad de descarga de drenaje por unidad de superficie ($L * T^{-1}$).

h_{dr} : altura de la capa freática en el punto medio de los drenes (L)

L_{dr} : espaciamiento entre drenes (L),

γ_{entr} : resistencia en la entrada dentro de los drenes (T).

K_v y K_r : conductividades hidráulicas saturadas en las capas con flujo vertical y radial ($L * T^{-1}$), respectivamente

D_v y el D_r : espesores de las capas en las que se considera flujo vertical y radial (L), respectivamente.

$\sum (KD)_h$ es la transmisividad de las capas del suelo donde se considera flujo horizontal ($L^2 * T^{-1}$).

u : perímetro mojado del dren (L)

α_{dr} : factor geométrico [-] para flujo radial cuyo valor depende de la condición de flujo.

Se utilizó como profundidad del dren la establecida como la óptima para la zona del Alto Valle (Polla et al., 1998). La profundidad óptima se define como aquella que se obtiene a partir de las características hidráulicas e hidrogeológicas y que minimiza los costos de inversión y operación del sistema de drenaje, siendo el valor resultante de 2.4 m.

Los valores adoptados corresponden a valores que caracterizan el acuífero del Alto Valle, el cual esta conformado por dos horizontes: uno inferior de material grueso formado por gravas y arenas sin cementar de conductividad hidráulica de aproximadamente $25 \text{ m} * \text{d}^{-1}$, y uno superior de material más fino que forma el suelo, con un espesor promedio de uno a dos metros que puede estar saturado en los períodos de ascenso del nivel freático, de $1.5 \text{ m} * \text{d}^{-1}$.

Los valores del coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico, oscilan entre 5% a 30 %, lo cual califica al acuífero como libre. La interfase entre ambos horizontes se encuentra a 1.5 m del suelo (Polla et al., 2013).

La segunda opción fue no construir el dren y definir una programación de riego que minimice la cantidad de aplicaciones asegurando que las tensiones en que se encuentre el cultivo este dentro de rangos aceptables, respetando la lámina de riego que el productor aplica sobre su predio normalmente.

Dada la problemática del sitio, el manejo propuesto fue el instalar un dren con las características citadas previamente y regar únicamente en los períodos donde las tensiones no

son adecuadas para los cultivos. La instalación del dren permitirá mantener la profundidad de la capa freática en valores aconsejables para el cultivo de peral.

La Figura 22 muestra que la tensiones son muy bajas si se instala un sistema de drenaje, alcanzando un valor mínimo al final del período de aproximadamente -16000 cm (-160 m). En esta situación sólo se consideró el aporte producido por la precipitación durante toda la temporada sobre el cultivo.

Los picos de la Figura 22 corresponden a los días en que se produjeron precipitaciones. Como se puede observar sería imposible que se desarrollen los cultivos sin el complemento del riego en el área, ya que las tensiones son muy altas.

Las láminas aplicadas y los momentos se determinaron a partir del programa CROPWAT.

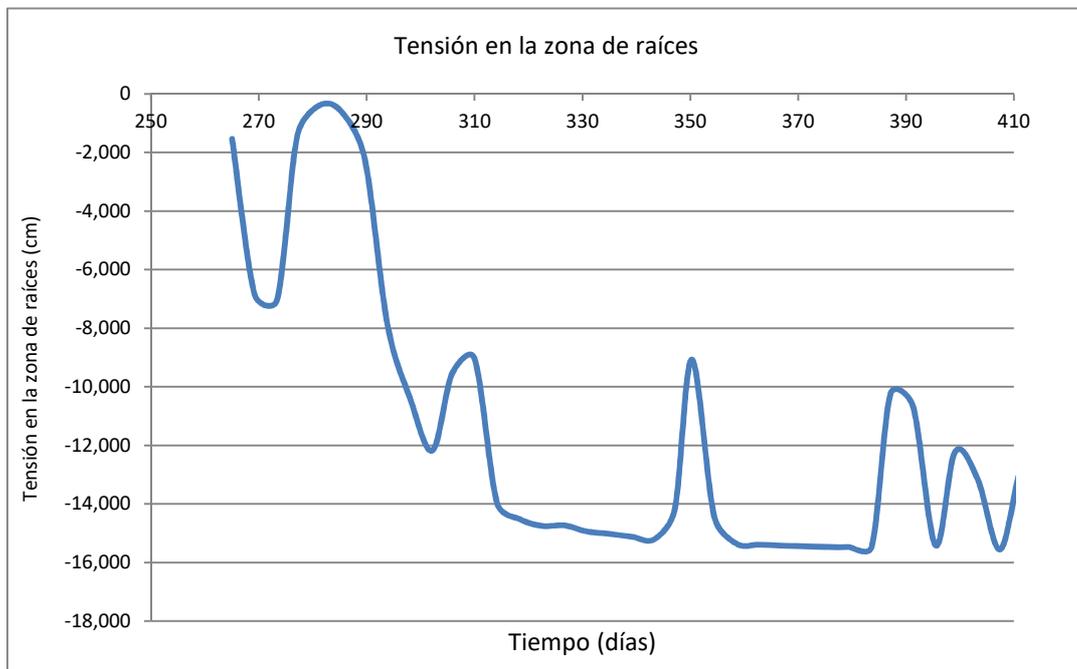


Figura 22: Tensión en zona de raíces. Instalación de un sistema de drenaje sin riego-sitio 3.

A partir de la Figura 22 se determinaron los días en que las tensiones eran menores a -800 cm, valor límite propuesto por Feddes et al. (1978) para que el cultivo absorba agua en forma óptima.

Con el dren construido se aplicó el programa CROPWAT para ver cuáles eran las láminas de riego y frecuencia adecuada en este caso (Tabla 10).

Tabla 10: Programación de riegos con el dren construido- sitio 3.

Fecha de riego (2014-2015)	Lámina (cm)
25 de setiembre	13.75
7 de octubre	12.38
27 de octubre	11.95
10 de noviembre	11.69
22 de noviembre	11.34
4 de diciembre	11.9
15 de diciembre	11.8
5 de enero	12.13
24 de enero	11.5
4 de febrero	11.59
17 de febrero	13.14
6 de febrero	14.87

Los valores de evapotranspiración del cultivo acumulada alcanza un valor de 102 cm, se acerca a la potencial que es de 108 cm (Figuras 23 y 24). Asimismo las tensiones son adecuadas, dado que se encuentran en rangos entre -50 y -450 cm (Figura 25).

La evapotranspiración del cultivo es igual a la potencial en un 85 % de los días, es decir la relación entre ET_c/ET_p es igual a 1 en la mayor parte del tiempo.

La aplicada total a lo largo del período es de 1600 mm, producto del riego o la lluvia y la evapotranspiración real del cultivo acumulada de 1020 mm, durante toda la temporada, alcanzando una eficiencia de aplicación del 64 %.

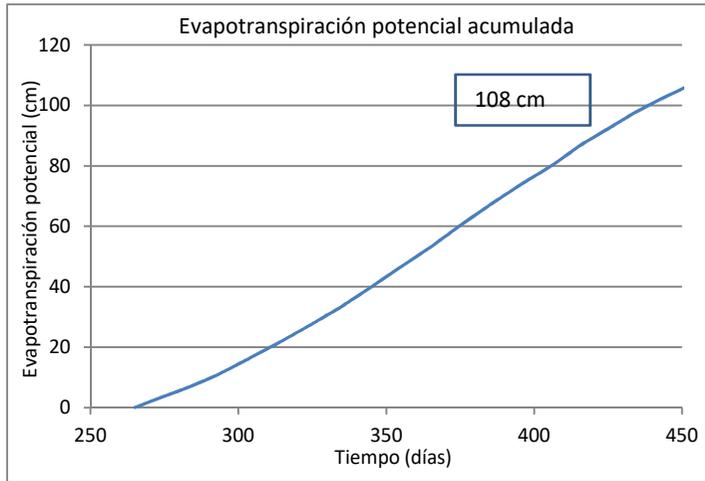


Figura 23 : Evapotranspiración potencial-sitio 3

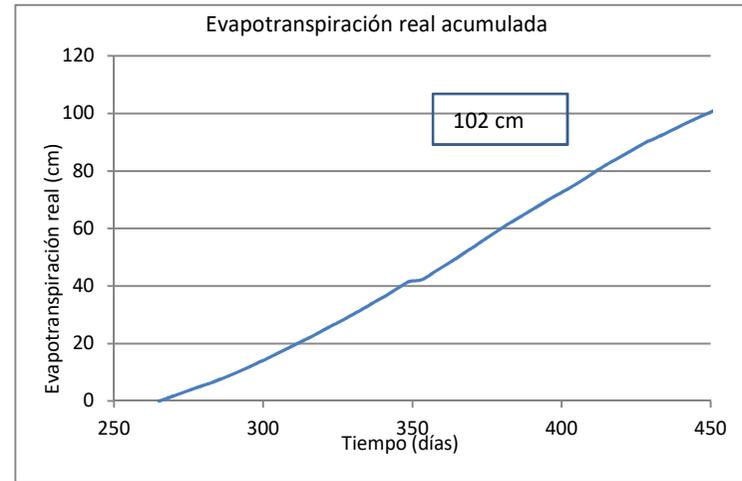


Figura 24: Evapotranspiración real-sitio 3

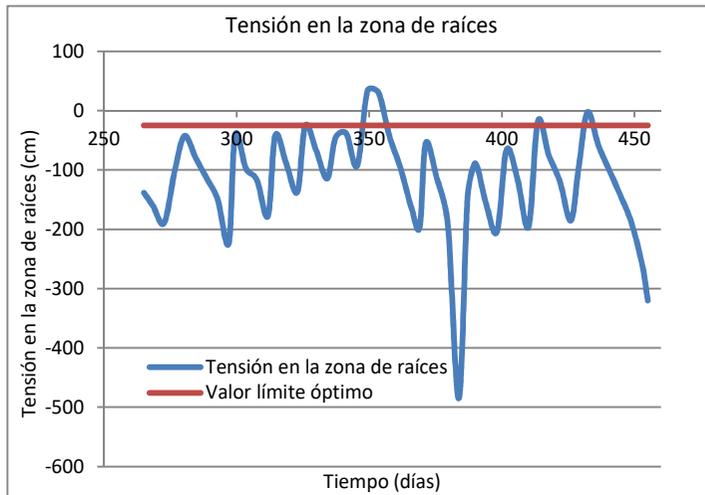


Figura 25: Tensión en la zona de raíces-sitio 3

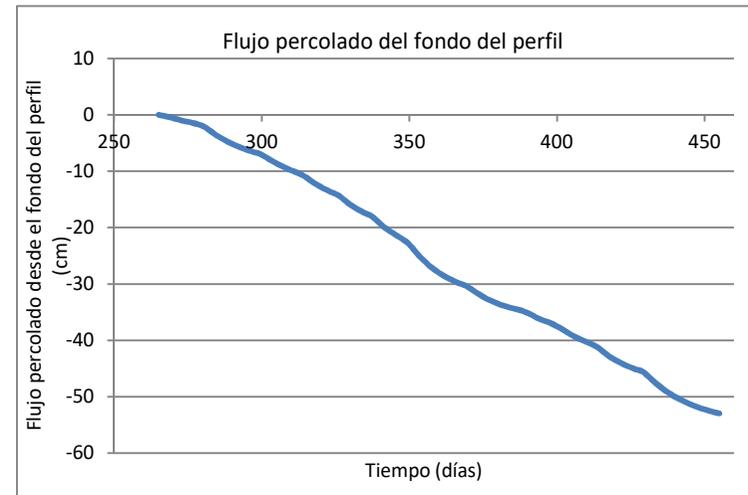


Figura 26: Flujo a través del fondo del perfil-sitio 3

En el caso que el productor no tenga la posibilidad de construir un dren parcelario dado los costos que el mismo implica, se propondrá una programación de riegos, suponiendo una lámina de aplicación como la que maneja el productor, con una frecuencia tal que, en combinación con la profundidad de la capa freática, preserven la humedad necesaria para un buen desarrollo de los cultivos.

La programación elegida era aquella que regaba una vez por mes: 23/9, 23/10, 23/11, 22/12, 21/1, 20/2 y 22/3 una lámina de 200 mm.

Los resultados muestran tensiones dentro de los límites aceptables, no obstante a pesar de llegar a una solución, la eficiencia de aplicación en este caso es mas baja 48 % (Figura 27).

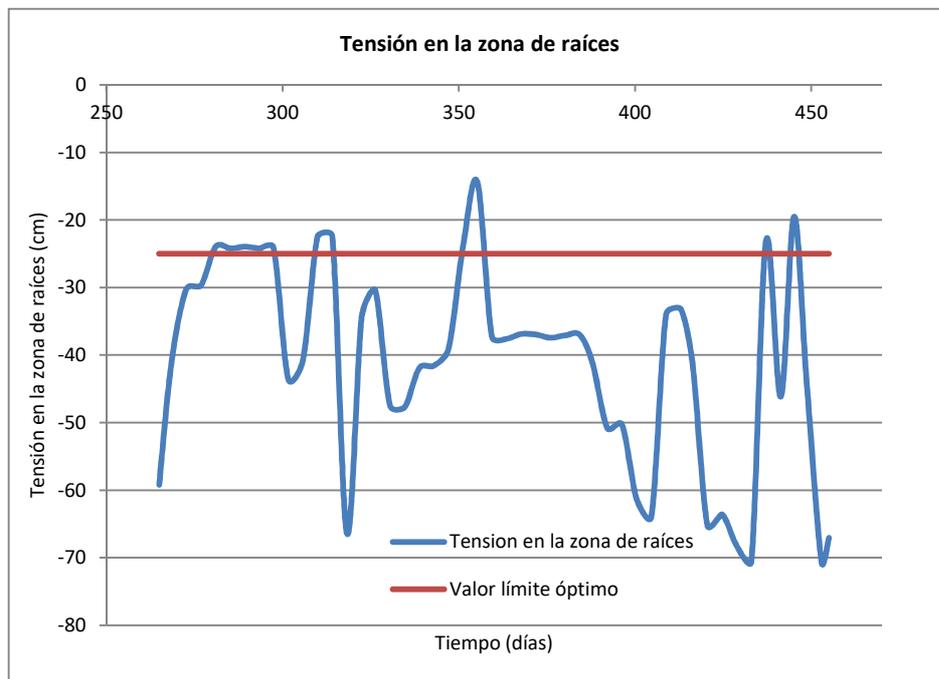


Figura 27: Tensión en la zona de raíces-sitio 3

5.4.3. Análisis del efecto de las concentraciones salinas al cabo de 20 años

El anegamiento y salinización de sus suelos, son uno de los principales problemas que posee el Alto Valle, consecuencia de un manejo deficiente del recurso hídrico en relación a las características del suelo y del acuífero.

Cuando el ascenso capilar es alto -en suelos limosos especialmente- el agua que llega a superficie se evapora dejando el residuo salino. Si además son suelos con mal drenaje, difíciles de lavar, se enfrenta la peor situación: salinidad y anegamiento, requiriéndose de drenaje artificial para su solución (Horne et al., 2010).

A continuación se analizará cuál será la evolución de la salinidad a largo plazo (20 años), sobre los sitios 2 y 3, si se regara con agua de características similares a la de la zona del Alto Valle. Las conclusiones sólo representarán una tendencia, ya que los datos son valores medios y no se cuentan con una densidad que permita obtener resultados precisos.

Para el análisis se consideró una concentración del agua de riego usada de $0.23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, valor coincidente con la que se encuentra en el agua de río Neuquén y de $1.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para la capa freática, valores medidos en el área de estudio. Se consideraron dos valores de concentración inicial en el suelo $0.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (límite inferior dentro de los rangos encontrados en el Alto Valle) y $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Se realizaron distintas simulaciones variando las eficiencias de aplicación, componente que depende directamente de la lámina de riego aplicada, para una proyección a 20 años y analizando en cada caso la concentración salina en la zona de raíces.

Sitio 2 -capa freática profunda

En la simulación se consideró una concentración salina en el suelo de $0.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ una concentración del agua de riego $0.23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y de $1.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para la capa freática.

En la Figura 28, se puede observar en que para un 100 % de eficiencia (sin lavado) los valores de concentración de sales en la zona de raíces aumentan hasta un valor de $0.27 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en la zona de concentración de raíces al cabo de 20 años, para el resto de las eficiencias los valores tienden a un valor promedio de $0.22 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Es esperable este tipo de resultado, valores de concentración en zona de raíces mayores para el 100 % de eficiencia (sin lavado del perfil), porque la lámina de agua infiltrada es menor en relación a las otras eficiencias.

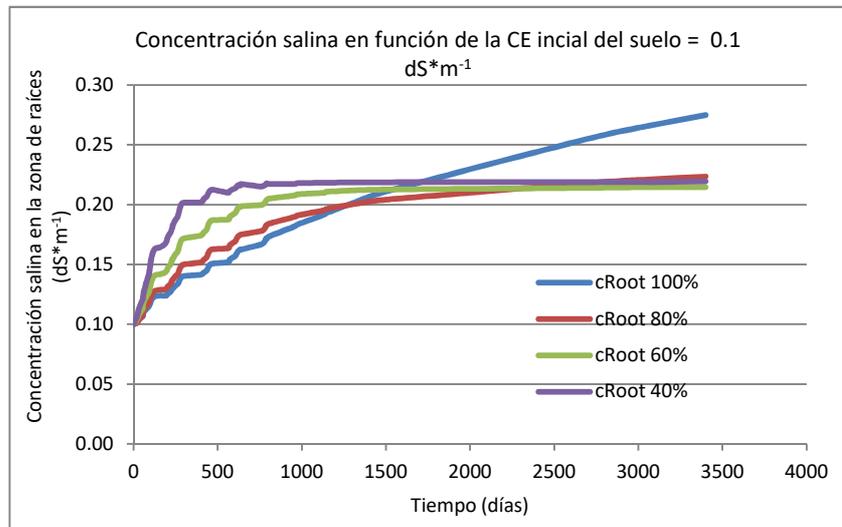


Figura 28: Concentración salina en la zona de raíces (cRoot)- CE inicial del suelo $0.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ -sitio 2

La segunda simulación consideró una concentración de sales en el suelo al inicio del período de $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, con el paso del tiempo los valores de concentraciones disminuyen a medida que también los hace la eficiencia. Los valores de concentración descienden tendiendo a $0.47 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, para una eficiencia del 100 %, y a $0.21 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para el resto de las eficiencias. A pesar de que la concentración del suelo en la zona de raíces en el momento cero, es alta, al cabo de 20 años no se identifican valores que puedan comprometer el cultivo (Figura 29).

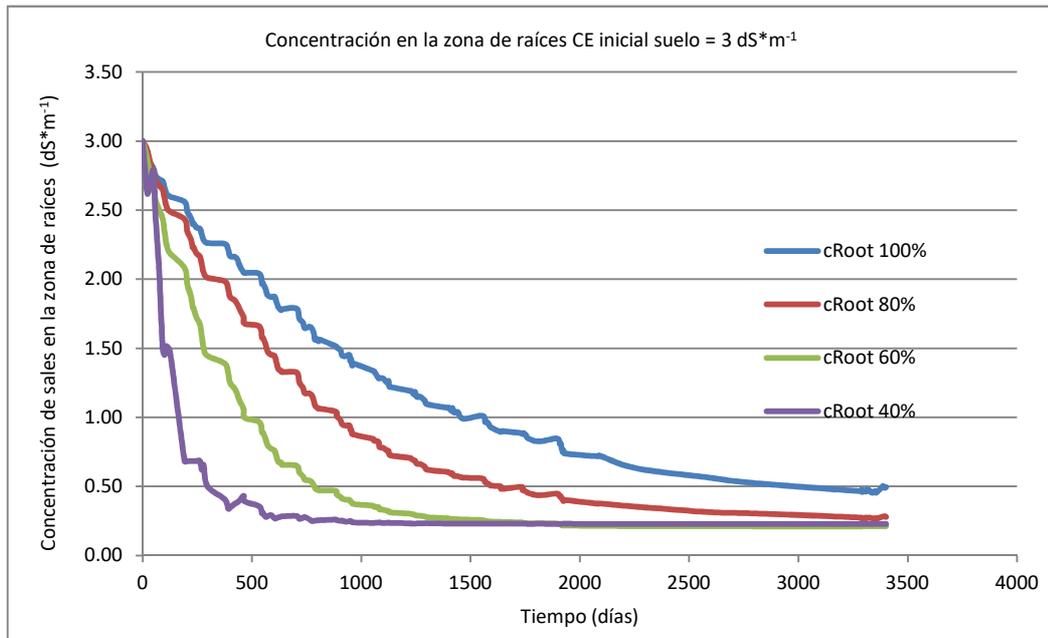


Figura 29: Concentración salina en la zona de raíces(cRoot) - CE inicial del suelo $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ - sitio 2.

Sitio 3- capa freática poco profunda

En la simulación se consideró una concentración salina en el suelo de $0.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, una concentración del agua de riego $0.23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y de $1.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ para la capa freática.

En la Figura 30, se puede observar que para un 100 % de eficiencia los valores de concentración aumentan hasta un valor de $0.4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ en la zona de concentración de raíces al cabo de 20 años, para el resto de las eficiencias los valores tienden a un valor promedio de $0.26 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (entre 0.24 y 0.28).

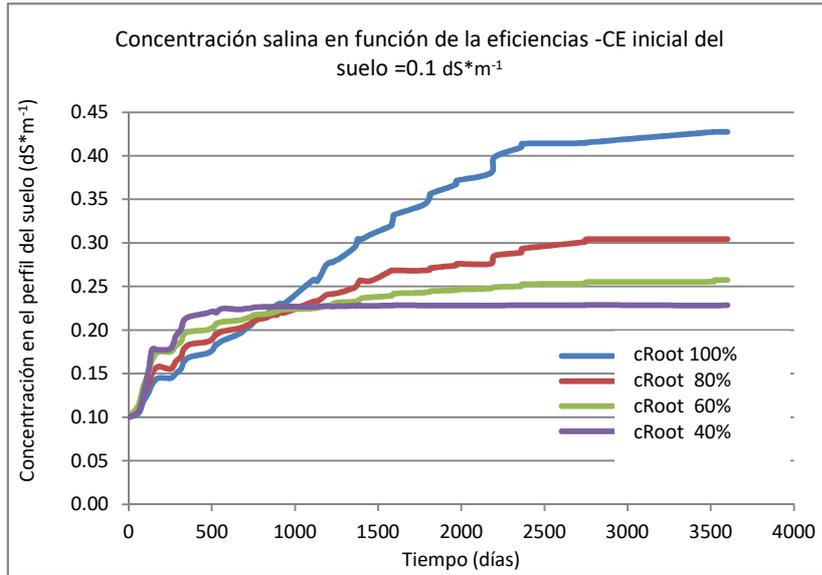


Figura 30: Concentración salina en la zona de raíces (cRoot) - CE inicial del suelo $0.1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ - sitio 3

La segunda simulación consideró una concentración de sales en el suelo al inicio del período de $3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, con el paso del tiempo los valores de concentraciones disminuyen a medida que también los hace la eficiencia.

Los valores de concentración salina descienden de $0.48 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ para eficiencia de 100 % (sin lavado de suelos), y tienden a un valor de $0.23 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ para el resto de las eficiencias. A pesar de que la concentración del suelo en la zona de raíces en el momento cero, es alta, al cabo de 20 años no se identifican valores que pueda comprometer el cultivo (Figura 31).

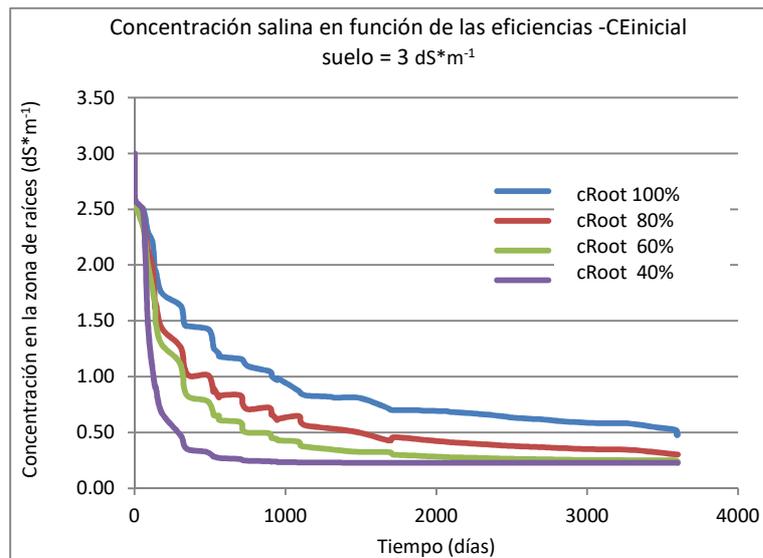


Figura 31: Concentración salina en la zona de raíces (cRoot) - CE inicial del suelo $3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ - sitio 3

En este sitio, dado que la capa freática se encuentra a poca profundidad se hará una simulación suponiendo que la concentración de sales del agua de riego posee un valor de $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, de manera de verificar la influencia de la concentración del agua de riego sobre el perfil, manteniendo la concentración salina en el suelo de $0.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y la concentración del agua de la napa freática de $1.7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

En la Figura 32, se observa que a medida que la eficiencia disminuye, la concentración en el perfil de suelo tiende a aproximarse a la concentración del agua de riego.

En este caso $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, esto indicaría que a largo plazo la concentración del agua de riego es la que influencia la concentración de sales en el perfil de suelos.

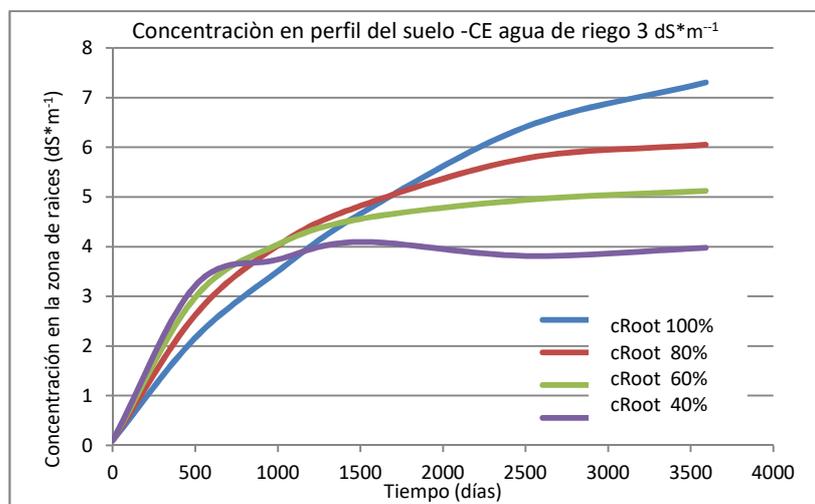


Figura 32: Concentración salina en la zona de raíces (cRoot) - CE del agua de riego $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ - sitio 3.

Finalmente se simuló, para diferentes eficiencias, cómo sería la concentración salina en la zona de raíces al cabo de 20 años si la concentración de la napa freática es de $3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, del agua de riego $0.23 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y en el suelo de $0.1 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los resultados señalan que salvo con el 100 % de eficiencia, en el resto todas tienden a la concentración del agua de riego (Figura 33).

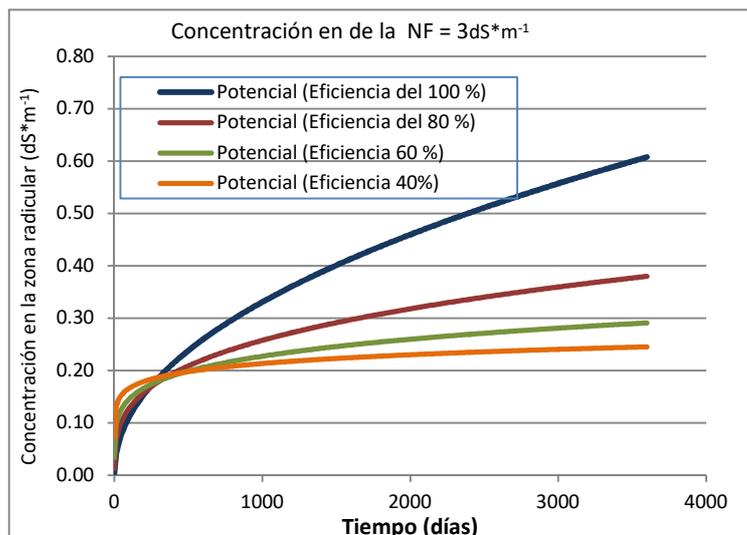


Figura 33: Concentración salina en la zona de raíces - CE de la Napa freática de 3 dS*m⁻¹ -sitio 3

Analizando ambos sitios se observa que a largo plazo las concentraciones que se encuentran en el perfil del suelo, para eficiencias 80, 60 y 40 % tienden a converger al valor de concentración del agua de riego, que actúa además como agua de lavado de sales. En todos los casos los valores finales no son excesivos para un buen desarrollo del cultivo, salvo cuando los valores de concentración del agua de riego alcanzan los 3 dS*m⁻¹.

En el sitio 2 donde la capa freática esta a mayor profundidad, los valores de concentración en el perfil son menores que en el sitio 3 dado que en este caso se suma la influencia de la capa freática.

5.5. DISCUSION

De la revisión realizada en el Capítulo 2 se pudo determinar que la ecuación de Richards (1931), es la ecuación que mejor explica el movimiento del flujo en la zona no saturada del suelo, describiendo adecuadamente el proceso de redistribución del agua en el perfil.

El modelo HYDRUS-1 es una herramienta potente que permite describir y cuantificar las variaciones de humedad del perfil a lo largo del tiempo cuando interactúan componentes como la recarga por precipitación o riego, la evapotranspiración, la absorción de raíces, la interacción con la capa freática, la presencia de sales, el tipo de suelo, entre los más importantes. Asimismo se puede conocer como varían en el tiempo los procesos de capilaridad, percolación, flujo a través del fondo del perfil, entre otros.

En la primera parte del capítulo se analizaron las diferencias, para una misma zona, de la aplicación del modelo WINISAREG e HYDRUS-1, determinando que existe una sobrestimación

de algunos parámetros tales como percolación profunda. Utilizar el HYDRUS-1 implica una mejora en el análisis de la situación ya que trabaja con la ecuación de flujo y no con ecuaciones que describen los procesos de forma empírica.

El modelo WINISAREG no cuantifica el ascenso capilar cuando la humedad del suelo se encuentra en la zona de agua fácilmente aprovechable, aunque esta exista. Esto representa un desventaja ya que no se puede conocer el comportamiento real de esta variable.

Esto se detectó al momento de calibrar los parámetros (coeficientes de cultivo), ya que el ajuste se logró con valores menores de los adoptados debido a que existía un aporte en la zona de raíces diferente del riego y la precipitación, que era producto de la capa freática.

En relación a los sensores para la recolección continua de datos sobre el suelo y los cultivos se han convertido en esenciales para una implementación exitosa de la agricultura de precisión.

Dentro del desarrollo de esta Tesis su implementación y seguimiento sobre el área de estudio resultó uno de los puntos que presentaron mayor dificultad dado que en algunos casos no registraron valores adecuados o dejaron de funcionar, perdiendo así el registro completo de una temporada, como en el sitio 2, donde sólo se pudieron utilizar los valores de los sensores Watermark dado que los anexos a la estación meteorológica dejaron de funcionar en el mes de noviembre, interrumpiendo el registro de datos del periodo.

A partir de esta experiencia es que en el sitio 3, además de contar con los sensores Watermark y de la estación, se adicionó la extracción de muestras para determinación de humedad de suelo en laboratorio como otro punto de control y resguardo por si las lecturas de los sensores no resultaban confiables o se interrumpía su registro.

Estas grandes redes no sólo son costosas de construir, sino estos sensores pueden dejar de informar y luego volver a entrar en la red, provocando serie de datos discontinuas que resultan un problema a la hora de aplicar un modelo de simulación (Coopersmith et al., 2014).

Respecto al análisis de las situaciones principales que se presentan en el Distrito, capa freática profunda y poco profunda, las simulaciones realizadas en los sitios 2 y 3 reflejan lo que sucede en cada situación. Asimismo en cada caso se realiza una propuesta que intenta mejorar algunos de los indicadores que explican un “buen manejo del riego”.

En situaciones como las del sitio 2, donde la profundidad de la capa freática es mayor de 1.7 m durante todo el período, el manejo está centrado en mejorar la eficiencia de aplicación.

Al momento de definir el tipo de manejo utilizado en este sitio, se pensó en trabajar con el concepto de riego deficitario (RD). Aquí surgió la discusión del termino “deficitario” ya que este indicaría que se producía “déficit” sobre alguna variable del sistema: tensión a que están sometidas las raíces, o la disminución en la lámina aplicada, etc. situación que no se explicitaba claramente.

Para precisar y aclarar el concepto de RD se revisaron las definiciones de algunos autores en relación a esta forma de manejo.

Santa Olalla et al.(2005) definieron esta forma de aplicación como “una herramienta para el manejo de los cultivos que se fundamente en la estrategia de reducir el agua aplicada con el mínimo impacto sobre la producción”.

Mitchell et al. (1984), lo definieron como una alternativa para aumentar la eficiencia del uso del agua. Existe otro concepto, el riego deficitario controlado (RDC), que consiste en reducir los aportes hídricos sólo en determinados momentos del ciclo de cultivo, en los que dicha reducción no afecta sensiblemente a la producción ni a la calidad de la cosecha y cubrir plenamente la demanda de la planta durante el resto del ciclo de cultivo, en particular durante los denominados “períodos críticos” o estado fenológicos de mayor sensibilidad al déficit hídrico (Mitchell et al., 1984; Chalmers et al., 1986).

Gurovich et al. (2004) definieron al riego deficitario controlado, en el caso de producción de uvas (*Vitis vinifera L.*) como una estrategia de riego que aporta menos agua que los requerimientos evapotranspirativos totales, durante algunos períodos en las diferentes etapas fenológicas de desarrollo anual.

English et al. (1996) sugirieron que es necesario considerar ciertos factores que son capaces de determinar el éxito en la aplicación de una estrategia de RDC y que se pueden dividir en factores ambientales como características del suelo, sistema de riego y clima y en factores propios de la especie como períodos críticos del cultivo, conciencia entre el crecimiento vegetativo, el fruto y la resistencia a la sequía.

Girona (1996) indica que el suelo es el factor más determinante sobre el resultado de éstas estrategias de RDC. Sánchez et al. (1995), afirmaron que es necesario que el suelo facilite la generación de un estrés hídrico en forma rápida y que también permita a los árboles una rápida salida de este estado. En suelos profundos, con una mayor capacidad de retención de agua, las respuestas debieran ser mucho más lentas, tanto en la restricción como en el humedecimiento (Saavedra, 2000).

A partir de analizar estos conceptos se entendió que la expresión que mejor expresaba el manejo utilizado en este sitio fue “riego controlado, sin estrés”, que consistía en reducir la lámina de riego aplicada en determinados períodos del cultivo con tensiones en la zona de raíces dentro de los rangos sugerido por Feddes de extracción máxima de agua por parte del cultivo.

En particular el trabajo de la FAO 66 (2012) “Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua” se tomo como patrón de aplicación para replicarse en este estudio, allí se utilizó el riego deficitario aplicado a un cultivo de peral, disminuyendo la cantidad asignada de agua en

función de los requerimientos hídricos del peral en 3 etapas diferentes y en una combinación de ellas. Los resultados se centran en la estimación de la disminución en porcentaje del agua aplicada, respecto al requerimiento hídrico real en cada escenario, y del ingreso bruto de los productores, relacionado este con el crecimiento del fruto.

En relación al coeficiente de cultivo (K_c) el valor utilizado en el programa CROPWAT para el sitio 2, fue obtenido de FAO 56 (2006), dicho valor es función de las características particulares del cultivo y de su etapa fenológica y en pequeña proporción en función del clima. Este valor pudo ser ajustado a las condiciones locales (tipo de suelo) a partir de la absorción real del cultivo y la evapotranspiración del cultivo de referencia, ambas variables simuladas por el modelo HYDRUS-1.

Cabe aclarar que en este trabajo se evalúa la disminución en la eficiencia de aplicación, como variable de decisión, para las distintas situaciones. No se realizaron mediciones a campo de calidad ni de producción del cultivo ya que esto implicaría el desarrollo de otra Tesis.

No obstante el modelo permite determinar las tensiones del cultivo, variable que actúa como indicador de las condiciones productivas y que está directamente relacionada con los rendimientos.

En relación al sitio 3 la situación es totalmente diferente, en lugares donde la capa freática se encuentra a profundidades menores que 1 m, en forma permanente, no se puede realizar una programación de riego sin antes diseñar un dren parcelario para controlar la capa freática.

Con la construcción del dren parcelario se debió definir una nueva programación del riego con ayuda del programa CROPWAT, que incrementó la frecuencia del riego de 6 a 12 riegos pero con láminas menores a las actuales, de manera de asegurar un 64 % de eficiencia de aplicación.

Asimismo se determinó, en el caso que no se pudieran adoptar los manejos de riego sugeridos para los sitios 2 y 3, una programación distinta que mantenga la lámina de aplicación actual (variable difícil de manejar por el productor), pero cambiando la frecuencia de aplicación, respetando en ambos casos la profundidad de la napa freática y el tipo de suelo de cada sitio. Cabe aclarar que aunque las eficiencias en estos caso no son tan bajas, no sólo se debe considerar este aspecto como variable de decisión sino además analizar los gráficos de tensión en la zona de raíces donde en los casos que se realizó el manejo propuesto, los rangos de variación son mucho más convenientes para el cultivo.

En relación a la concentración de sales en el perfil del suelo, al cabo de 20 años, lo que se observa en las diferentes simulaciones es que la concentración de sales en la zona de raíces tiende a converger al valor de concentración del agua de riego.

Muchas veces, sobre todo en establecimientos pequeños, el buen manejo del agua de un sólo productor puede no reflejarse en el comportamiento de la freática que afecta sus cultivos. La explicación hay que buscarla en el manejo zonal del agua. De tal forma que si el riego eficiente de un productor tiende a bajar los niveles freáticos respecto de sus vecinos, el agua se moverá desde las chacras vecinas hacia su parcela, neutralizando los efectos de un buen manejo del riego. Asimismo ocurre con canales sobre-elevados no impermeabilizados o desagües embancados sin mantenimiento. Este efecto se hace más incisivo cuando más alta es la transmisividad del acuífero (Horne et al., 2010)

Es así que la recomendación técnica es la de un abordaje zonal del problema de drenaje, ideal si se hace a escala de Distrito de Riego, ya que de esta manera se involucra también a quien maneja y opera las conducciones: canales de riego, desagües y drenes (Horne et al., 2010).

A pesar de que en el sitio 2 y 3 se realizaron propuestas de manejo que se consideran las más conveniente, se propusieron otras que serían fácilmente aplicadas por el agricultor ya que se ajustan al manejo tradicional que el mismo hace del riego.

CAPITULO 6 MODELO DE OPTIMIZACION

6.1. INTRODUCCIÓN

Antiguamente los proyectos de planificación hidrológica analizaban únicamente su viabilidad de ejecución a partir de la componente económica; con el correr del tiempo y el aumento de la población, para la misma disponibilidad de recursos, se incluyeron en el análisis los intereses de la sociedad y las implicancias del mismo sobre la calidad del medio que afecta. Este cambio de rumbo exigió que los encargados de la planificación analicen cuidadosamente el espectro de alternativas posibles para arribar a aquella que no solo sea óptima económicamente sino que además incluya otros aspectos (sociales, ambientales, ecológicos, etc.).

Existen dos tipos de modelos que se pueden aplicar en problemas de planificación: de simulación y de optimización. La diferencia entre ambos radica en que los modelos de simulación reproducen la dinámica de un sistema, mientras que el de optimización busca diseñar el mejor sistema. (Helweg, 1992). Los primeros identifican la solución a través de métodos de prueba y error, requiriendo generalmente de un gran esfuerzo computacional, que aunque refleje el comportamiento del sistema, está muy lejos de ser el mejor funcionamiento. Los algoritmos de optimización incluyen técnicas de cálculo y álgebra matricial, tales como programación lineal, dinámica, cuadrática, geométrica, multiplicadores lagrangianos, etc., que permiten seleccionar aquella alternativa más conveniente según la maximización o minimización de una función objetivo. Las desventajas que poseen los modelos de optimización, es que conllevan procesos muy laboriosos, planteos donde se realizan importantes simplificaciones y a menores niveles de detalle que los resultados de un modelo de simulación (Andreu, 1992).

6.2 MATERIALES Y METODOS

Muchos estudiosos del tema (Marsden et al., 1973), reconocieron que las técnicas de programación matemática son de mucha utilidad para seleccionar la alternativa que minimice los costos de un determinado proyecto.

El uso óptimo de los recursos disponibles es de suma importancia en el contexto de su creciente demanda por la población mundial, este fin se logra frecuentemente cuando se utilizan técnicas de optimización matemática.

La optimización es una herramienta que consiste en la aplicación de formulaciones lineales y no lineales para resolver problemas y encontrar soluciones. Ayuda a encontrar la respuesta obteniendo el mejor resultado con el máximo beneficio o con el mínimo costo, considerando una serie de restricciones que deberá cumplir la solución.

Randall et al. (1997) efectuaron una programación lineal entera mixta acoplada a un modelo de simulación para planificar la utilización del recurso hídrico en el Distrito de Alameda (California).

6.2.1.PROGRAMACION LINEAL

Un gran número de problemas se resuelven a través de la programación lineal, dada la sencillez conceptual en que se basa.

A pesar que la programación dinámica es muy utilizada en problemas de optimización de recursos hídricos por su versatilidad y por brindar, cuando se requiere, no sólo una política óptima sino una familia de ellas, a efectos prácticos y como iniciación al tema, la programación lineal sería suficiente para resolver éste problema. Es importante, en estos casos, realizar una programación específica para el problema a resolver.

En un problema de optimización lineal, las variables de decisión representan aquellos aspectos que son controlables. Las restricciones expresan, por ejemplo, limitaciones físicas reales (disponibilidad máxima del recurso) o expresan que la violación de una de ellas puede ocasionar un alto costo al sistema (daños ambientales irreversibles).

Cómo se considera linealidad, tanto en la función objetivo como en las restricciones, esto incluye los supuestos básicos de proporcionalidad y aditividad.

Las expresiones en que se basa son del tipo (Ecuaciones 1, 2, y 3):

Función objetivo $Max \text{ o } Min = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$ (1)

Sujeto a: $a_{1,1}x_1 + a_{1,2}x_2 + \dots + a_{1,n}x_n \leq b_1$ (2)

$a_{m,1}x_1 + a_{m,2}x_2 + \dots + a_{m,n}x_n \leq b_m$

siendo $x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$ (3)

donde:

a_{ij} : son constantes reales.

x_j las incógnitas o variables de decisión.

- b_i : son constantes reales .
- c_i : beneficio o costo según corresponda (U\$S).
- m_i : número de restricciones.
- n_i : número de variables de decisión.

En esta Tesis se aplicó optimización lineal sobre el Distrito de Riego de Cipolletti, donde se planifica implementar cierta variedad de cultivos.

La decisión de implementar diferentes cultivos, por parte del agricultor, se produce por cuestiones de mercado o que al disponer de un solo cultivo que en esa temporada no ha rendido lo esperado el productor pierda el costo de la inversión (Loucks, 1981).

Dentro de los recursos que se deberán considerar al aplicar un modelo son: cantidad de tierras existentes en el Distrito, insumo de pesticidas y fertilizantes, maquinaria, mano de obra, costo del canon de riego, entre otros.

Se debe conocer la cantidad y el tipo de los recursos que se deben aplicar sobre el área, esto formará parte de los costos que produce la implementación de cada cultivo.

El resultado de la función objetivo es la maximización de los márgenes brutos y las variables de decisión representarán la cantidad de hectáreas de cada cultivo que maximice dicha función.

Los márgenes brutos se definen como la diferencia entre los ingresos generados (ingreso bruto) menos los costos directos que se incurren para producir dicho ingreso. Denominando costos directos a aquellos afectados por la decisión tomada, es decir dependen de la realización o no de determinada actividad, y son específicos (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2007).

Los ingresos brutos o valor bruto de la producción se refieren a la producción obtenida o esperada, la que podrá tener distintos destinos como son la venta, el almacenaje, las cesiones a otras actividades o el consumo. Por lo general en cultivos anuales requiere solamente determinar dos componentes: rendimientos y precios de los productos (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2009).

La componente costos está constituida por los gastos, las amortizaciones y los intereses insumidos en un proceso productivo (Franck, 1995).

Dado que en esta Tesis se analizarán cultivos perennes y anuales, para poder comparar sus márgenes brutos, es necesario incorporar el concepto de amortización de la inversión dado que los cultivos perennes tienen una vida útil prolongada. Además el capital de trabajo requerido por cada cultivo tiene un período distinto de inmovilización. En general se considera para los cultivos perennes un ciclo productivo de 12 meses, con un período de seis meses como promedio de inmovilización del monto total. En el caso de los cultivos anuales los ciclos

productivos son de 6 meses o menores por lo que cambia sustancialmente el período de inmovilización del capital de trabajo.

Amortización

El cálculo se realizará a través del método simple (Ecuación 4) (Franck, 1995):

$$A = \frac{M}{n} \quad (4)$$

Donde:

A: es la cuota de amortización, M el monto (valor) y n el número de años de duración del bien. El monto sobre el cual se calcula la amortización es el valor a nuevo descontado el valor residual pasivo en caso que lo tuviera.

Interés:

Además al costo hay que incluirle intereses, estos reflejan el costo de oportunidad del dinero inmovilizado en la actividad analizada, para calcularlo se utiliza la Ecuación 5 (Borga et al., 2007)

$$Interes = \frac{Dinero\ inmovilizado * tasa\ anual * tiempo\ inmovilizado}{12} \quad (5)$$

Donde:

Dinero inmovilizado: en actividades agrícolas generalmente se considera solo el costo de implantación y protección del cultivo. Comprende el capital de trabajo del ciclo productivo

Tasa anual de interés: si los costos de implantación y protección se solventan con recursos propios, la tasa de interés a considerar debería ser la posible renta financiera que generaría este dinero. Si los costos se financian en su totalidad, se debe utilizar la tasa de interés del crédito y si se financian parte de los gastos se puede utilizar un promedio ponderado de las tasas de interés correspondientes.

Tiempo de inmovilización: se considera la mitad del tiempo transcurrido entre la implantación y la cosecha asumiendo una proporcionalidad en las erogaciones del capital de trabajo (meses).

A partir de estos conceptos los costos directos para cada tipo de cultivo (anual o perenne) resulta:

Costo Directo cultivos perennes: gastos culturales + amortización + interés al capital de trabajo.

Costo directo cultivos anuales: gastos culturales + interés

En esta Tesis no se realizará un estudio económico exhaustivo y en detalle de cada uno de los componentes económicos, dado que no es el objetivo del mismo, los valores serán estimativos. El objetivo principal es evaluar dos escenarios, el primero sólo considerar en el

modelo de optimización componentes económicas, en el segundo adicionarle componentes físicos tales como salinidad, profundidad de capa freática y ocurrencia de heladas, como factores que influyen negativamente sobre el rendimiento de los cultivos. Cabe aclarar que en el segundo caso deja de ser un modelo de optimización lineal para convertirse en no lineal.

6.2.2. OPTIMIZACIÓN LINEAL – SIN INFLUENCIA DE COMPONENTES FISICOS

Para ello se consideraron una combinación de 7 cultivos, cada uno con distintos requerimientos hídricos: manzano, peral, cereza, vid (para vinificar), tomate, lechuga y zapallo anquito.

En relación a los cultivos hortícolas se realizan las siguientes aclaraciones: el tomate elegido fue aquel utilizado para consumo en fresco que se desarrolla en la época libre de heladas (octubre-abril), dado que las bajas temperaturas representan una limitante para su crecimiento. La variedad de lechuga elegida fue la de verano, esta se realiza principalmente por siembra directa sobre suelo. La siembra puede ser al voleo o en línea. Las mayores densidades se utilizan en la siembra de verano por las fallas de implantación por las bajas temperaturas.

En el caso del zapallo anquito la siembra se realiza desde mediados de octubre a fines de noviembre, ya que este cultivo requiere de altas temperaturas para fructificar (Boggio et al., 1993).

La función objetivo consiste en maximizar el margen bruto, diferencia entre beneficios y los costos directos de cada uno de los cultivos considerados.

Cabe aclarar que tanto los costos como los beneficios se calcularon en dólares y por hectárea de superficie. El valor de un dólar (U\$S) en la fecha considerada (febrero de 2016) correspondió a 15.6 \$ (pesos argentinos).

$$\text{Max } MB_1 * x_1 + MB_2 * x_2 + MB_3 * x_3 + MB_4 * x_4 + MB_5 * x_5 + MB_6 * x_6 + MB_7 * x_7 \quad (6)$$

Donde:

MB_i : margen bruto del cultivo i , diferencia entre costo directo y el ingreso bruto del cultivo i (U\$S).

x_i : cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

Restricciones

Las restricciones están en función de la cantidad de hectáreas que posee un establecimiento, se consideraron establecimientos de 7 ha. Los requerimientos hídricos variarán según el cultivo elegido.

Una de las condiciones establece que la sumatoria de las áreas de cada cultivo no debe exceder el área total del establecimiento (Ecuación 7), la segunda condición que los requerimientos de cada cultivo multiplicado por el área asignada para cada uno (variable de decisión) no deberá exceder la cantidad de agua asignada a dicho establecimiento (Ecuación 8).

$$\sum_I^n x_i \leq A_D \quad (7)$$

$$\sum_I^n x_i * w_i \leq Q \quad (8)$$

Donde:

A_D : Cantidad de hectáreas del establecimiento (ha).

w_i : dotación del cultivo i ($l \cdot \text{seg}^{-1} \text{ ha}^{-1}$).

Q : caudal asignado al establecimiento ($\text{m}^3 \cdot \text{seg}^{-1}$).

x_i : cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

n = cantidad de variables de decisión.

La dotación de cada uno de los cultivos se determinó por hectárea y como valor promedio del período. Estos valores se obtuvieron como la evapotranspiración del cultivo dividida la eficiencia de riego, que en este caso, para un riego por melgas, se consideró de un 50 %.

La evapotranspiración del cultivo, se estimó como la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_p) por el coeficiente del cultivo, este último valor se lo consideró como un promedio de todo el período (setiembre-abril).

La evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_p) se estimó de los datos decadiarios (período analizado 2004-2013) y con una probabilidad de ocurrencia del 90 % (Ecuación 9).

$$ET_{ci} = ET_p * K_{ci} \quad (9)$$

$$ReqH_i = ET_{ci} / Ef \quad (10)$$

$$w_i (l/\text{seg ha}) = \frac{ReqH_i * 10000 \text{m}^2 * 1000l * 1 \text{día}}{1 \text{ha} * 1 \text{m}^3 * 86400 \text{s}} \quad (11)$$

Donde:

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

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

K_{ci} : coeficiente de cultivo i .

E_f : eficiencia de aplicación para melgas.

$ReqH_i$: requerimiento hídrico para el cultivo i ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$).

w_i : dotación del cultivo i ($\text{l} \cdot \text{seg}^{-1} \text{ha}^{-1}$).

Tabla 1: Dotación de los cultivos.

Cultivos	Dotación (w_i) ($\text{l} \cdot \text{s}^{-1} \text{ha}^{-1}$)
Manzana	1.03
Peral	1.03
Cereza	1.03
Tomate	1.07
Lechuga	1.07
Zapallo	0.98
Vid	0.55

Costos

Los costos incluyen los insumos como fertilizantes y pesticidas utilizados para los diferentes cultivos, mano de obra, maquinaria y canon de riego. La información utilizada y que era necesaria como insumo, para cada una de las componentes, corresponde a trabajos realizados para la zona del Alto Valle (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2004); (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2006); (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2007);(Boggio et al.,1993); (Blackhall et al., 2008) y en el caso de hortalizas al asesoramiento del Ing. Walter Mela, Técnico del Ministerio de Agricultura de la Nación- Secretaría de Agricultura Familiar-Sede Neuquén.

1) Fertilizantes

Se determinaron los componentes necesarios para fertilizar cada unos de los cultivos a lo largo del período anual, los que se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Fertilizantes aplicados a cada cultivo.

Cultivos	Fertilizantes
Manzana	Sulfato de Amonio
	Triple 15
	N de Ca
	Urea
Peral	Sulfato de Amonio
	Triple 15
	Acido Bórico
	Polvo para fertilización foliar (Lefinwell 25-25)

	Urea
Cereza	Foliar
Vid	Nitrógeno
	Lefinwell 25-25
	Acido Bórico
	Acido Fosfórico
Tomate	Nitrogenado Potásico
	Fosfato Monoamónico
Lechuga	Base de Nitrato
	Fosfato Monoamónico
	Fertilizante de Ca
Zapallo	Base de Nitrato
	Fosfato Monoamónico

$$FC = \sum_{i=1}^n F_i * x_i * c_i \quad (12)$$

Donde:

FC: Costo total de fertilizantes para la totalidad de los cultivos considerados (U\$S).

F_i : Cantidad de producto i (kg o lts).

x_i : cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

c_i : costo del producto i (U\$S).

n = cantidad de variables de decisión.

2) Pesticidas

Tabla 3: Pesticidas utilizados en cada cultivo.

Cultivos	Pesticidas
Manzana	Acetamiprid (Assail)
	Carbaryl
	Clorpirifos
	Tiacloprid
	Aceite de invierno
	Abamectina
	Polisulfuro de Calcio
	Azufre Micronizado
Peral	Acetamiprid (Assail)
	Carbaryl
	Mospilan o Acetamiprid (Assail)
	Aceite de invierno
	Abamectina
	Polisulfuro de Calcio
	Azufre Micronizado
Cereza	Oxi..de cobre
	Acetamiprid (Assail)
	Clorpirifos
	Ziram
	Acaricida organoclorado (Endosulfan)
	Tretser
Vid	Hormiguicida

	Azufre espolvoreo
	Azufre Micronizado
	Oxicloruro de Cobre
	Carbendazim (Carendazim)
Tomate	Insecticida(Deltametrina) Foliar
Lechuga	Insecticida Foliar
Zapallo	Insecticida Foliar

$$PC = \sum_{i=1}^n P_i * x_i * c_i \quad (13)$$

Donde

PC: Costo total de pesticidas para la totalidad de los cultivos considerados (U\$S).

P_i : Cantidad de pesticida para el cultivo i (kg o lts).

x_i : cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

c_i : costo del pesticida i (U\$S).

n = cantidad de variables de decisión.

Con los valores asignados a cada situación y los costos e ingresos brutos asociados se aplicó el programa LINGO (Canizo et al., 2002). Con este programa se calculará la alternativa que maximiza la función objetivo cumpliendo las restricciones establecidas. En la Tabla 4 se presentan los costos asociados a la fecha del análisis.

Tabla 4: Costos por componente de cada cultivo, precios febrero 2016.

CULTIVO	PRODUCTO	Cantidad	Unidad	Costo U\$S Fecha 25/2/16	Costo unitario
Manzano	Sulfato de Amonio	200	kg/ha	476 x bolsa de 25 kg	1.22 U\$S
	Triple 15	250	kg/ha	32 x bolsa de 50 kg	0.64 U\$S
	N de Ca	50	kg/ha	26 x bolsa de 25 kg	1.04 U\$S
	Urea	7	kg/ha	31x bolsa de 50 kg	0.62 U\$S
Peral	Sulfato de Amonio	200	kg/ha	\$ 476x bolsa de 25 kg	1.22 U\$S
	Triple 15	300	kg/ha	32 x bolsa de 50 kg	0.15 U\$S
	Acido Bórico	5	kg/ha	38.6 x bolsa de 25 kg	1.544 U\$S
	Polvo para fertilización foliar (Lefinwell 25-25)	6	kg/ha	185 x bolsa de 22 kg	8.4 U\$S
	Urea	7	kg/ha	31x bolsa de 50 kg	0.62 U\$S
Cereza	Fertiriego	1800	l/ha		0.28 U\$S
Vid	Nitrogeno	10	kg/ha	1 bolsa de 25 kg	2 U\$S
	Polvo para fertilización foliar (Lefinwell 25-25)	3	kg/ha	185 x bolsa de 22 kg	8.4 U\$S
	Acido Bórico	6	kg/ha	38.6 x bolsa de 25 kg	1.544 U\$S
	Acido Fosfórico	5	kg/ha	80 x bolsa de 35 kg	2.28 U\$S
Tomate	Nitrogenado Potásico	3	b/ha	3 bolsas x 58 U\$S por bolsa	58 U\$S
	Fosfato Monoamónico	4	b/ha	4 bolsas x 51 U\$S por bolsa	51 U\$S
Lechuga	Base de Nitrato	2	b/ha	2 bolsas x 58 U\$S por bolsa	58 U\$S
	Fosfato Monoamónico	3	b/ha	3 bolsas 45 U\$S por bolsa	45 U\$S
	Fertilizante de Ca	1.5	b/ha	1.5 bolsas x 64 U\$S por	64 U\$S

				bolsa	
Zapallo	Base de Nitrogeno	4	b/ha	4 bolsas x 58 U\$S por bolsa	58 U\$S
	Fosfato Monoamonico	4	b/ha	4 bolsas x 51 U\$S por bolsa	51 U\$S
Manzana	Acetamiprid (Assail)	2.5	kg	35 x bolsa de 0.1 kg	350 U\$S
	Carbaryl	3	kg	45 x bolsa de 2.4 kg	18.75 U\$S
	Clorpirifos	1875	cc	150 x bolsa de 20 l	7.5 U\$S
	Aceite de invierno	50	l	600 x tambor de 208 l	2.88 U\$S
	Abamectina	1	l	12.5 X litro	12.5 U\$S
	Polisulfuro de Calcio	60	l	156x 200 l	2.58 U\$S
	Azufre Micronizado	8	kg	64.5 x bolsa de 25 kg	0.78 U\$S
Peral	Acetamiprid (Assail)	2.5	kg	35 x bolsa de 0.1 kg	350 U\$S
	Carbaryl	3	kg	45 x bolsa de 2.4 kg	18.75 U\$S
	Mospilan o Assail	0.3	kg	35 x bolsa de 0.1 kg	350 U\$S
	Aceite de invierno	50	l	600 x tambor de 208 l	2.88 U\$S
	Abamectina	1	l	12.5 X litro	12.5 U\$S
	Polisulfuro de Calcio	60	l	156x 200 l	2.58 U\$S
	Azufre Micronizado	8	kg	64.5 x bolsa de 25 kg	0.78 U\$S
Cereza	Oxido de cobre	19.2	kg	203 x bolsa de 25 kg	8.12 U\$S
	Acetamiprid (Assail)	2.4	kg	35 x bolsa de 0.1 kg	350 U\$S
	Clorpirifos	1800	cc	150 x bolsa de 20 l	18 U\$S
	Ziram	6	kg	132 x bolsa de 20 kg	6.6 U\$S
	Tretser	240	cc		333 U\$S
Vid	Hormiguicida	5	kg	16 x bolsa de 5 kg	3.2 U\$S
	Azufre espolvoreo	20	kg	27 x bolsa de 25 kg	1.08 U\$S
	Azufre Micronizado	4	kg	64 x bolsa de 25 kg	0.78 U\$S
	Oxicloruro de Cobre	3	kg	203 x bolsa de 25 kg	8.12 U\$S
	Carbendazim (Carendazim)	0.8	lts	494 x bolsa de 20 l	24.7 U\$S
Tomate	Insecticida Foliar				295 U\$S
					320 U\$S
Lechuga	Insecticida Foliar				186 U\$S
					180 U\$S
Zapallo	Insecticida Foliar				128 U\$S
					192 U\$S

3) Mano de Obra

Se determinó la cantidad de horas de mano de obra necesarias para las distintas actividades que requiere cada cultivo y se asoció a los costos que la misma genera.

La cantidad de horas requeridas para los cultivos de manzana, pera y cereza se obtuvieron promediando la información recopilada de productores locales. El dato de vid se obtuvo del trabajo denominado "Pautas Tecnológicas: vid para vinificar" (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2007). Las horas correspondientes a la implantación de hortalizas de los trabajos Finales de Horticultura de la carrera de Ingeniería Agronómica-Universidad Nacional del Comahue (Blackhall et al., 2008) y (Boggio et al., 1993).

Se consideró el costo del jornal del peón general, valor que incluye aportes patronales. Se estableció para la zona de estudio un valor de \$ 473 = 30.3 U\$S, considerando que el mismo

corresponde a una actividad que se desarrolla durante 8 hs diarias. Dicho monto fue extraído de la página de la Comisión Nacional de Trabajo Agrario y que rigen hasta el 30 de septiembre de 2016.

Tabla 5: Mano de obra utilizada para cada cultivo.

Mano de Obra	(hs*ha ⁻¹)	(Jornales*ha ⁻¹)
Manzana	915	115
Peral	823	103
Cereza	1675	209
Vid	580	73
Tomate	840	105
Lechuga de verano	504	63
Zapallo Anquito	584	73

$$MO = \sum_{i=1}^n MO_i * x_i * c_i \quad (14)$$

Donde:

MO: Costo total por mano de obra de la totalidad de los cultivos (U\$S).

MO_i: Cantidad de horas hombre para el cultivo i (hs).

x_i: cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

c_i: costo de mano de obra para el cultivo i (U\$S*hs⁻¹).

n = cantidad variables de desición.

4) Maquinarias

El costo de las maquinarias incluye el costo del combustible, conservación y mantenimiento, adoptando un valor de 20 U\$S*hora⁻¹

Tabla 6: Horas de maquinaria utilizada en cada cultivo.

Maquinaria	(hs*ha ⁻¹)
Manzana	85
Peral	85
Cereza	99
Vid	62
Tomate	13
Lechuga	14
Zapallo	13

$$MAQ = \sum_{i=1}^n MAQ_i * x_i * c_i \quad (15)$$

Donde:

MAQ: Costo total por maquinaria para la totalidad de los cultivos (U\$S).

MAQ_i: Cantidad de horas máquina para el cultivo i (hs).

x_i: cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

c_i: costo por hora de maquinaria para el cultivo i (U\$S*hs⁻¹ ha⁻¹).

n = cantidad variables de decisión.

5) Canon de riego: el pago del canon de riego, en el caso de los Distritos del Alto Valle, se divide en dos valores, lo que se paga al Consorcio de primer grado, que en este caso lo constituye el Distrito específicamente y el segundo valor es el que se paga al consorcio de segundo grado quien es el que maneja el canal principal, los costos asociados en cada caso son diferentes y ambos se determinan por hectárea cultivada. En esta Tesis se consideró el costo total como la suma de ambos montos y alcanza un valor de 56 U\$S/ha año.

$$CC = \sum_I^n CCR * x_i \quad (16)$$

Donde:

CC: Costo canon de riego (U\$S).

CCR: costo total del canon de riego por hectárea año (U\$S), incluye el costo del consorcio de primer y de segundo grado (U\$S).

x_i: cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

n = cantidad variables de decisión.

Amortizaciones

Las amortizaciones de la plantación se calcularon según la Ecuación 4, los valores a depreciar y la vida útil se adoptaron a partir de los trabajos de INTA-Estación Experimental Alto Valle (2004, 2006, 2007). En la Tabla 7 se calcula el valor de las amortizaciones en cada caso.

Tabla 7: Calculo de amortizaciones (U\$S*ha⁻¹).

Cultivo	Valor a depreciar (U\$S*ha ⁻¹)	Vida Útil (años)	Amortización (U\$S*ha ⁻¹)
Manzano	15219	20	761
Peral	16088	20	804
Cerezo	28365	15	1891
Vid para vinificar	15216	20	761

Intereses: es la retribución del factor capital por involucrarlo al proceso productivo y no destinarlo a otras alternativas. El interés se calcula aplicando una tasa al valor del bien considerado y teniendo en cuenta el período de inmovilización del capital en el proceso productivo.

Los intereses se calcularon según la Ecuación 5. El dinero inmovilizado se consideró como el valor a partir del cual se hace constante la producción.

Los valores a partir del cual se hace constante la producción para manzano, peral y cerezo calculados en este trabajo fueron comparados con los estimados por el Ing. en recursos hídricos Sergio Stangaferro para su establecimiento productivo (2004), resultando similares.

Dichos datos se calcularon en dólares y por hectárea plantada.

Se adoptó un interés que incluía la tasa Libor cuyo valor se determinó en 0.45 % para mayo 2016 (<http://es.global-rates.com>) y la tasa de riesgo donde se adoptó un valor del 5 %, el valor del interés final fue 5.5%. El tiempo de inmovilización fue variable según cada cultivo.

Tabla 8: Determinación de intereses (U\$S*ha⁻¹).

Cultivo	Dinero inmovilizado (U\$S*ha ⁻¹)	Tiempo de inmovilización (meses)	Interés (U\$S*ha ⁻¹)
Manzano	6963	6	191
Peral	6624	6	182
Cerezo	9498	6	261
Vid para vinificar	3651	6	99
Tomate	4221	3	53
Lechuga	2780	3	35
Zapallo Anquito	2960	3	37

El cálculo de los costos totales variará si se trata de cultivos anuales o perennes:

Costo Directo cultivos perennes: gastos culturales + amortización + interés al capital de trabajo.

Costo directo cultivos anuales: gastos culturales + interés

En la Tabla 9 los costos totales para cada cultivo serán:

Tabla 9: Costos totales de cada cultivo (U\$S*ha⁻¹).

Cultivo	Costo Total (U\$S*ha ⁻¹)
Manzano	7915
Peral	7610
Cerezo	11650
Vid para vinificar	4460
Tomate	4274
Lechuga	2815
Zapallo Anquito	3000

Ingresos Brutos

El ingreso bruto total se calculó según la Ecuación 17:

$$B = \sum_{i=1}^n R_i * x_i * b_i \quad (17)$$

Donde:

B = ingreso bruto total (U\$S).

R_i = rendimiento promedio del cultivo i ($\text{kg} * \text{ha}^{-1}$).

b_i = beneficio obtenido por el productor por kilogramo del cultivo i ($\text{U\$S} * \text{kg}^{-1}$).

x_i = cantidad de hectáreas del cultivo i (ha).

n = cantidad variables de decisión.

Los valores de rendimientos para cada cultivo se obtuvieron del Informe de la FAO 12 (2015).

Los precios pagados al productor se determinaron a partir de un relevamiento propio, salvo los precios referido a hortalizas que se extrajeron del mercado concentrador. Los mismos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Beneficio obtenido para cada cultivo según FAO 12 (2015).

Cultivo	Rendimiento promedio (R_i) ($\text{kg} * \text{ha}^{-1}$)	Beneficio obtenido por el productor (b_i) ($\text{U\$S} * \text{kg}^{-1}$)	Ingreso Bruto por cultivo ($\text{U\$S} * \text{ha}^{-1}$)
Manzana	38000	0.30	11400
Peral	45000	0.30	13500
Cereza	12000	2	24000
Vid	35000	0.20	7000
Tomate	18000	1.1	19800
Lechuga	15000	0.9	13500
Zapallo anquito	20000	0.37	7400

6.2.3.OPTIMIZACIÓN LINEAL – CON INFLUENCIA DE COMPONENTES FISICOS

Los resultados de la optimización matemática se pueden ver alterados si se incluyen parámetros físicos que puedan afectar a algunos de los cultivos considerados en el trabajo.

Lo que puede ser la solución óptima en una situación, puede no serlo para otra, donde se incluyan variables como presencia de sales, capa freática poco profunda u ocurrencia de heladas primaverales.

A partir de estas consideraciones es que se determinaron los porcentajes, para cada componente analizada, que determinaba la disminución del rendimiento de los cultivos por efecto de dicha variable.

En esta situación los valores de producción de aquellos cultivos que estén influenciados por dicha componente se verán reducidos, afectando y modificando los beneficios que producen los mismos.

Factores Físicos analizados:

a) Profundidad de la capa freática:

Es conocido que para cada cultivo, suelo y condición climática existe una profundidad de la capa freática en que su aprovechamiento resulta óptimo. Uno de los principales efectos negativos de poseer una capa freática poco profunda es la disminución del número de raíces debido a la asfixia que esta produce. Como efectos positivos se puede nombrar su aporte al balance hídrico mediante el proceso de capilaridad. En este trabajo se hará hincapié a los aspectos negativos de esta componente ya que son los que se presentan en el área.

Experiencias de Wesseling y van Mijo (1955) demostraron que las raíces detienen su crecimiento aproximadamente a 30 cm por encima del nivel freático, no obstante esto no es totalmente válido dado que la zona, conocida como de subaireación, depende de las condiciones físicas del suelo y de la demanda evapotranspirativa de la atmósfera.

Existe un parámetro conocido como valor crítico de subaireación como el espesor del perfil que se extiende desde el nivel de la capa freática (potencial hídrico nulo por saturación), hasta una altura donde el contenido volumétrico de humedad es igual al 90 % del volumen. Este contenido hídrico depende de la textura y estructura de suelo (Aguirre et al., 1977).

Es de destacar que el clima, el suelo y el agua son los tres componentes básicos del ambiente físico de la agricultura, los cuales actúan integralmente y afectándose recíprocamente.

Estas variables actúan como un factor multiplicador de la productividad y del rendimiento en los cultivos.

Grassi (1998) determina que el exceso de agua en el suelo reduce la productividad de los cultivos ya que afecta las propiedades físicas que determinan el soporte de las plantas, el ambiente edafoclimático de la rizósfera, la nutrición mineral de las plantas y la lixiviación de fertilizantes.

Si la variable en consideración es un factor limitante, la productividad potencial estimada se acercará a la productividad real del cultivo.

Aguirre y Norero (1978) presentaron un análisis agrofísico de la relación productividad –nivel freático tratando de sintetizarla en una función general y de poner de manifiesto los principales factores edafoclimáticos involucrados.

La Ecuación 18 lo describe:

$$\frac{P}{P_p} = A_i * (1 - \exp(-3.44 * \frac{P_e}{D})) \quad (18)$$

Donde:

P/P_p : productividad relativa del cultivo.

P : productividad real (kg).

P_p : productividad potencial (kg).

P_e : profundidad efectiva de raíces; representa las raíces metabólicamente activas (m).

D : es la máxima profundidad de exploración radicular libre de impedimentos (m).

A_i : área (ha).

En cada uno de los cultivos analizados se estableció la profundidad potencial (D), la misma varía en función del tipo de suelo. En este caso se consideró el suelo como franco. En el caso de frutales el valor se determinó a partir del trabajo de Nolting (1976) (Tabla 11) y en vid y hortalizas se utilizó el trabajo de Grassi (1976)(Tabla 12).

Tabla 11: Máxima profundidad radical Nolting (1976).

Cultivo	Máxima profundidad de exploración radical libre de impedimentos (D) (m)
Frutales	1.8
Vid	1.0
Hortalizas	0.5

Tabla 12: Zona radical típica, que contribuye con la mayor parte del agua aprovechable. Adaptado con modificaciones (Grassi, 1976).

Tipo de suelo	Máxima profundidad de exploración radical libre de impedimentos (D) (cm)			
	Hortalizas,papas	Maíz, algodón, tabaco, sorgo, etc.	Alfalfa, pastos, arbustos, vid	Frutales
Arenoso	40	65	80	120
Franco arenoso	40	80	80	130
Franco	50	80	100	120
Franco Arcilloso	35	70	80	80
Arcilloso	20	40	60	70

Esta información se ingresó al modelo de optimización LINGO con el fin de analizar dos situaciones: profundidad de la capa freática a 0.6 m y a 1.00 m. Con estos valores se pudo estimar el valor de productividad relativa, para cada cultivo y para las dos profundidades de la capa freática consideradas (Tabla 13). Los valores de profundidad efectiva de raíces (P_e) se asumieron coincidentes con la profundidad del nivel freático en cada situación.

Como se observa en la Tabla 13, se produce una reducción de la productividad relativa a medida que disminuye la profundidad del nivel freático, convirtiéndose en un factor limitante del desarrollo normal del cultivo.

Tabla 13: Productividad relativa para diferentes profundidades de nivel freático y diferentes cultivos.

Profundidad del nivel freático (m)	Productividad relativa frutales (%)	Productividad relativa vid (%)	Productividad relativa hortalizas (%)
0.6	68	87	100
1.0	85	100	100

b) Salinidad:

Altos niveles de salinidad en la solución del suelo de la rizósfera, constituye una seria limitación para el crecimiento y la productividad de los cultivos. El descenso del potencial debido a los solutos, afecta el potencial hídrico total y por ende la capacidad de producción de los cultivos (Grassi, 1998).

Maas y Hoffman (1977) determinaron un listado de cultivos tolerantes a la salinidad donde se establecieron categorías que se clasificaron como altas, medias y bajas, considerando la conductividad en el extracto de saturación, que produce un 50 % de disminución de la producción.

En trabajos posteriores Ayers y Westcot (1976) encontraron una relación entre la productividad relativa del cultivo y la conductividad del extracto de saturación (CE_e) (Ecuación 19):

$$y = 100 - b * (CE_e - a) \quad (19)$$

Donde:

y : producción relativa (%)

a: es el valor umbral (o de comienzo) de la salinidad del cultivo, que representa la máxima CE_e a la cual se puede obtener un rendimiento del 100 % ($mmhos*cm^{-1}$).

b: es el decrecimiento de la productividad por unidad de salinidad o porcentaje de él perdido por unidad de salinidad, CE_e entre el valor umbral a y el valor de la CE_e que representa el 100% de disminución en el rendimiento %.

CE_e : conductividad eléctrica del extracto de saturación ($mmhos*cm^{-1}$).

En la Tabla 14 se presenta la tolerancia de un gran número de cultivos para diferentes porcentajes de decrecimiento de la productividad, cuando se usa riego por superficie (Grassi, 1998).

Tabla 14: Grado de tolerancia a las sales según los cultivos para distintos porcentajes de decremento de la productividad (Ayers y Westcot, 1976).

Productividad relativa (%)

Cultivo	100%		90%		75%		50%		max CE _e
	CE _e	CE _r							
Cultivos extensivos									
Cebada ¹	8,0	5,3	10,0	6,7	13,0	8,7	18,0	12,0	28,0
Maíz	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Algodón	7,7	5,1	9,6	6,4	13,0	8,4	17,0	12,0	27,0
Lino	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Arroz	3,0	2,0	3,8	2,6	5,1	3,4	7,2	4,8	12,0
Cártamo	5,3	3,5	6,2	4,1	7,6	5,0	9,9	6,6	15,0
Sorgo	4,0	2,7	5,1	3,4	7,2	4,8	11,0	7,2	18,0
Soja	5,0	3,3	3,5	3,7	6,2	4,2	7,5	5,0	10,0
Trigo ¹	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,4	13,0	8,7	20,0
Cultivos hortícolas									
Frijoles	1,0	0,7	1,5	1,0	2,3	1,5	3,6	2,4	7,0
Lechuga	1,3	0,9	2,1	1,4	3,2	2,1	5,2	3,4	9,0
Cebollas	1,2	0,8	1,8	1,2	2,8	1,8	4,3	2,9	8,0
Pimientos	1,5	1,0	2,2	1,5	3,3	2,2	5,1	3,4	9,0
Papas	1,7	1,1	2,5	1,7	3,8	2,5	5,9	3,9	10,0
Tomates	2,5	1,7	3,5	2,3	5,0	3,4	7,6	5,0	12,0
Cultivos forrajeros									
Alfalfa	2,0	1,3	3,4	2,2	5,4	3,6	8,8	5,9	16,0
Cebada forrajera ¹	6,0	4,0	7,4	4,9	9,5	6,3	13,0	8,7	20,0
Pasto bermuda	6,9	4,6	8,5	5,7	10,8	7,2	14,7	9,8	23,0
Centeno forrajero ⁹	5,6	3,7	6,9	4,6	8,9	5,9	12,2	8,1	19,0
Pasto sudán	3,9	2,6	5,8	3,9	8,6	5,7	13,3	8,9	23,0
Trébol pequeño	5,0	3,3	6,0	4,0	7,5	5,0	10,0	6,7	15,0
Cultivos frutales									
Manzanas, peras	1,7	1,0	2,3	1,6	3,3	2,2	4,8	3,2	8,0
Uva	1,4	1,0	2,5	1,7	4,1	2,7	6,7	4,5	12,0
Naranjas	1,7	1,1	2,3	1,6	3,2	2,2	4,8	3,2	8,0
Melocotones	1,7	1,1	2,2	1,4	2,9	1,9	4,1	2,7	7,0
Ciruelas	1,5	1,0	2,1	1,4	2,9	1,9	4,3	2,8	7,0

Nota: CE_e conductividad eléctrica del extracto de saturación (mmhos*cm⁻¹); CE_r conductividad eléctrica del agua de riego (dS*m⁻¹).

A partir de los datos extraídos de la Tabla 14, se determinaron los porcentajes de reducción de rendimiento en función de los valores de conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_e) para cada uno de los cultivos analizados (Tabla 15):

Tabla 15: Producción relativa, para distintos cultivos, según valores de concentración del extracto de saturación (CE_e).

Producción Relativa (y) (%)	CE_e ($dS \cdot m^{-1}$) (Manzana, Pera y Cereza)	CE_e ($dS \cdot m^{-1}$) Vid	CE_e ($dS \cdot m^{-1}$) Lechuga -Zapallo	CE_e ($dS \cdot m^{-1}$) Tomate
0	8.0	12.0	9.0	13.0
50	4.8	6.7	5.2	7.6
75	3.3	4.1	3.2	5
90	2.3	2.5	2.1	3.5
100	1.7	1.4	1.3	2.5

Con los datos de la Tabla 15, se ajustaron funciones lineales para cada uno de los cultivos, donde “x” representa el valor de conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_e) para cada cultivo e “y” el valor de producción relativa (Tabla 16). Las ecuaciones determinadas en cada caso fueron:

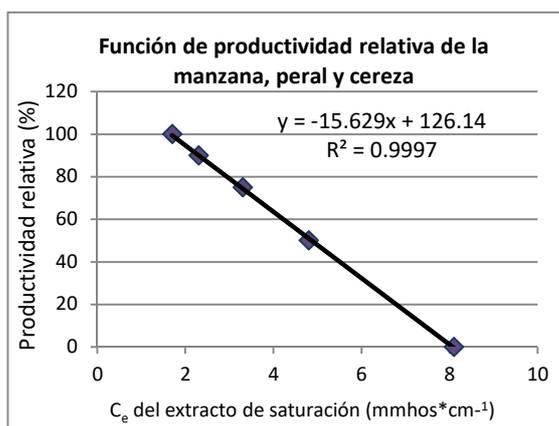


Figura 1: Producción relativa manzana, pera y cereza

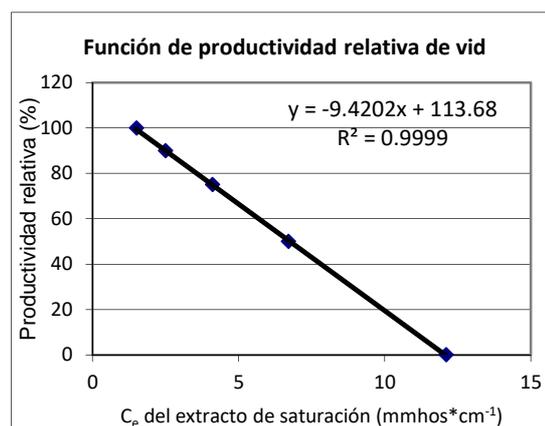


Figura 2: Producción relativa de vid

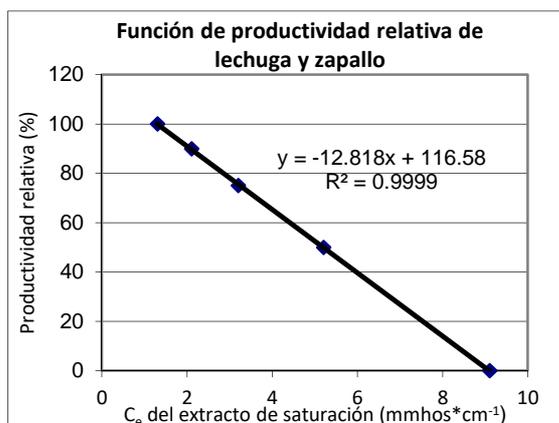


Figura 3: Producción relativa lechuga y zapallo.

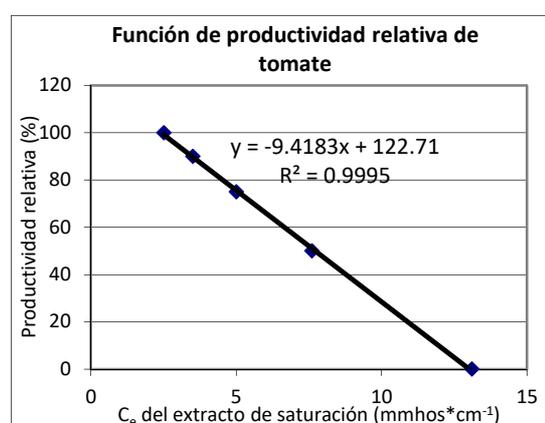


Figura 4: Producción relativa de vid

Tabla 16: Funciones de producción relativa para cada cultivo, en función de la conductividad del extracto de saturación.

Cultivos	Función producción relativa
Manzana, Pera y Cereza	$y = 15.629 * x + 126.14$
Vid	$y = 9.4202 * x + 113.68$
Lechuga y Zapallo	$y = 12.818 * x + 116.58$
Tomate	$y = 9.4183 * x + 122.71$

c) Ocurrencia de Heladas:

La ocurrencia de heladas primaverales (tardías), es otro de los factores limitantes de la producción en el área de estudio. Este evento produce importantes pérdidas económicas, al afectar la calidad y la cantidad de la producción frutícola en el momento que los árboles frutales comienzan a brotar y florecer.

En relación a las características regionales de las heladas se observó que los gradientes verticales de temperatura alcanzan valores medios entre $0.26 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ en el valle del río Neuquén y $0.14 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{m}^{-1}$ en el del Negro y el tope de la inversión térmica, en promedio, se ubicó a más de 30 m. El enfriamiento nocturno es superior en la zona de chacras y menor en cercanías del río y sobre la meseta y la temperatura del aire durante la noche es menor en el valle que en la meseta, dependiendo de su altura (Flores et al., 1996).

Tassara et al. (1984) realizaron el cálculo del riesgo de daño por heladas primaverales para los cultivares de manzano, peral y duraznero en la Estación Experimental del INTA Alto Valle a partir de la siguiente información: fenología de una serie de 19 años en manzanos y perales y de 10 años en duraznero.

Los riesgos totales en duraznero cv. Pavia amarillo de marzo son del 66.7 %, significando que en 7 años de cada 10 años es de esperar que se produzca afectación por heladas primaverales, un 46% en peral cv. William's y 42% en manzano cv. Red Delicious.

Tassara en 2005 definió los mecanismos de defensa activa y pasiva como formas de combatir las heladas primaverales en la región. Los métodos de defensa pasiva son aquellos que se implementan antes de la noche de la helada, para evitar la protección activa, algunos ejemplos son: riego superficial, el manejo del drenaje de aire frío, la poda adecuada, la cobertura de las plantas, entre otros. Dentro de los métodos de defensa activa más usados en la zona de estudio, se encuentra el riego por aspersión. Este se aplica en un monte frutal durante las horas nocturnas de heladas, para elevar las temperaturas de las plantas e impedir que se alcance el umbral de resistencia al frío del vegetal. En el trabajo de Tassara, se analizó el efecto y características de las heladas producidas en el Alto Valle, como así también las necesidades hídricas para su control mediante métodos de aspersión.

En los métodos de riego por aspersión, se permite la liberación del calor latente del agua al cambiar del estado líquido al sólido. Para aplicar este método es necesario contar con agua suficiente durante el tiempo que dure la helada, recurso que es extraído del acuífero.

En su trabajo las heladas primaverales Tassara (2007) define un gráfico donde representa la frecuencia acumulada de temperaturas mínimas actinotérmicas registradas a una altura de 1.5 m en el período comprendido entre el 10 de agosto y el 10 de noviembre de la serie 1980-96.

Establece que a partir de este gráfico se puede conocer las probabilidades de ocurrencia de daños en la plantación ingresando en abscisas con una fecha determinada y buscando la intersección con la temperatura de resistencia al frío del cultivar. En el corte de este punto, con las ordenadas, se arriba a un valor de probabilidad de daño.

En esta Tesis se utilizarán los resultados del análisis realizado por Tassara (Tassara, 1984), donde se analizó una serie de 57 años de la Estación Experimental Alto Valle del INTA. Estos valores afectarán, cuando exista riesgo de heladas primaverales, los rendimientos de los cultivos analizados disminuyendo los valores de los mismos.

Producto de que la temperatura del aire no es un fiel indicador de la temperatura de los órganos de un vegetal y si lo es la temperatura actinotérmica, se buscó un factor de corrección que fue aplicado a los valores de las temperaturas mínimas de aire de la serie analizada.

El factor de corrección se obtuvo analizando diariamente, durante el período primaveral, las diferencias de temperaturas mínimas del aire y actinotérmicas de una serie de 6 años del mismo sitio, encontrando una diferencia media de 1.7 °C.

Para un cultivar, el periodo con peligro de daño está delimitado por las fechas extremas del registro de plena floración en la serie fenológica.

La suma de probabilidades de los subperíodos proporcionó la probabilidad de daño por helada primaveral o riesgo de daño para cada cultivar.

En relación al cultivo de vid, la ocurrencia de heladas no pone en peligro la factibilidad y rentabilidad del cultivo. Su incidencia es baja, aunque su control es necesario porque la vid es muy sensible a esta adversidad. Para protegerla se usan métodos como calefactores o riego por aspersión (INTA-Estación Experimental Alto Valle, 2006).

Gallo et al. 2010 señalaron que en la zona de Viedma la cantidad de heladas registradas, así como su intensidad y duración, han sido variables. En todos los casos se produjeron mermas importantes que oscilaron entre el 30 y el 95 % del volumen de la cosecha, según año y variedad.

Con respecto al cultivo de cerezo, éste muy sensible a las heladas, no se podría implementar este cultivo si no se instala un sistema de protección contra heladas, de manera que se proteja la producción. La recomendación es tener métodos combinados de defensa como de control

pasivo y activo. En esta Tesis se adoptó como la probabilidad de daño la misma que para el caso de duraznero (66.7%). El momento más sensible ocurre al inicio del crecimiento del fruto, etapa en la cual no debiera exponerse a temperaturas inferiores a 0° C (INIA,2005).

A partir del análisis de los trabajos revisados se adoptaran los porcentajes de reducción aplicados al modelo de optimización para los distintos cultivos. Cabe aclarar que cuando se definían rango de reducción en la producción de algún cultivo, en el modelo de optimización se utilizó el límite inferior del mismo (Tabla 17).

Tabla 17: Disminución de rendimiento por efecto de heladas.

Cultivar	Probabilidad (%)	Disminución de rendimiento (%)
Peral cv. Williams	46	54
Manzano cv. Red Deliciuis	42	58
Vid para vinificar	30	70
Cereza	67	33

6.3. RESULTADOS

Se aplicó el programa de optimización LINGO, para determinar las variables de decisión en las distintas situaciones analizadas.

El objetivo consistía en determinar el cultivo que produce el máximo margen bruto, para un establecimiento de 7 ha, considerando la influencia de las componentes físicas como elementos limitantes y sin considerarlo, teniendo en cuenta que ninguno podía exceder 1 ha de extensión máxima.

ÁREA EN LOS CULTIVOS-7 ha

1) Optimización 1: corrida sin afectación física.

Solución: 1 ha de cada uno de los cultivos

Margen bruto: 54876 U\$S

2) Optimización 2: corrida suponiendo una profundidad de capa freática a 60 cm del nivel del terreno. Esto genera un rendimiento de:

Frutales: 68 %

Vid: 87%

Hortalizas.: 100 %

Solución: 1 ha de pera, vid, cereza, lechuga, tomate y zapallo anquito.

Margen bruto: 38271 U\$S

Observación: si se incluiría manzano reduciría el margen bruto en 163 U\$S

3) Optimización 3: corrida suponiendo una profundidad de capa freática a 100 cm del nivel del terreno. Esto genera un rendimiento de:

Frutales: 85 %

Vid: 100%

Hortalizas.: 100 %

Solución: 1 ha de cada uno de los cultivos

Margen bruto: 47541 U\$S

4) Optimización 4: corrida suponiendo un $CE_e = 10 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Aplicando las ecuaciones de la Tabla 16 se obtiene Tabla 18:

Tabla 18: Productividad relativa (%) para cada cultivo $CE_e = 10 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Cultivos	Producción relativa (y) (%)
Manzana, Pera y Cereza	0
Vid	20
Lechuga y Zapallo	0
Tomate	29

Solución: 1 ha cultivo de tomate

Margen bruto: 1374.94 U\$S

Si incluiría vid, se reduciría el margen bruto.

5) Optimización 5: corrida suponiendo un $CE_e = 7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Aplicando las ecuaciones de la Tabla 16 se obtiene Tabla 19:

Tabla 19: Productividad relativa (%) para cada cultivo, $CE_e = 7 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Cultivos	Producción relativa (y) (%)
Manzana, Pera y Cereza	17
Vid	48
Lechuga y Zapallo	27
Tomate	57

Solución: 1 ha cultivo de tomate y 1 ha de lechuga

Margen bruto: 7842 U\$S

6) Optimización 6: corrida suponiendo un $CE_e = 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Aplicando las ecuaciones de la Tabla 16 se obtiene Tabla 20:

Tabla 20: Productividad relativa (%) para cada cultivo, $CE_e = 4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$.

Cultivo	Producción relativa (y) (%)
Manzana, Pera y Cereza	64
Vid	76

Lechuga y Zapallo	65
Tomate	85

Solución: 1 ha de pera, vid, cereza, lechuga, tomate y zapallo anquito.

Margen bruto: 25926 U\$S

Si agregaría 1 ha de manzana el margen bruto se reduciría 619 U\$S

7) Optimización 7: corrida suponiendo ocurrencia de heladas (fines de setiembre) sin considerar hortícolas.

Solución: 1ha de vid

Margen bruto: 440 U\$S

6.4 DISCUSIÓN

Cuando se aplica la optimización matemática con el objetivo de encontrar el cultivo que produce el máximo margen bruto para el productor, normalmente la solución depende de los costos y beneficios de cada uno de los cultivos que forman parte del análisis.

En esta evaluación no se considera que pueden existir limitaciones físicas tales como variabilidad de suelos, profundidades de capa freática, zona con afectación de heladas, problemas de salinidad, etc., componentes que pueden variar la solución.

El objetivo planteado en ésta Tesis fue demostrar que el análisis económico debe incluir estas variables físicas ya que las mismas influyen negativamente sobre los rendimientos y por ende sobre los beneficios obtenidos.

Los resultados encontrados en el Distrito de Cipolletti indican que si no existieran limitaciones físicas se cultivaría 1 ha de cada cultivo y se lograría el máximo margen bruto, 54876 U\$S.

Si la profundidad de la capa freática se encuentra a 60 cm del suelo, se podría cultivar 1 ha de cada cultivo menos de manzano. Agregar 1 ha de manzana disminuiría el margen bruto en 163 U\$S. El valor del margen bruto obtenido es menor del sin limitaciones físicas (38271 U\$S) dado que existe una reducción en la producción de frutales y vid.

Cuando la profundidad de la capa freática es de 1 m se podría producir 1 ha de cada cultivo pero existe reducción de producción, dado que la profundidad no es la óptima para los frutales (85 %), por lo que el margen bruto alcanza 47541 U\$S.

En relación a la limitante "salinidad", cuando el valor alcanza $10 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ no podría producirse frutales, lechuga y zapallo anquito dado que el valor es excesivo, solo puede cultivarse 1 ha de tomate. No se incluye vid, aunque físicamente es factible, porque hacerlo disminuiría el margen bruto

Si el valor es de $4 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, se podría producir 1 ha de cada cultivo, menos de manzana, no porque no sea posible físicamente sino porque el margen bruto disminuiría en 619 U\$S.

En el caso de la limitación “heladas”, se podría producir 1 ha de vid. No es posible cultivar frutales dado que la ocurrencia de heladas perjudicaría la producción de dichos cultivos.

Una de las dificultades que se encontraron a la hora de realizar esta investigación fue definir el precio de venta de los diferentes cultivos. No existen estadísticas que permitan brindar información de esta componente, por lo que para su determinación se tuvo que recurrir a información de los productores de la zona.

CAPITULO 7

PAGINA WEB DEL DISTRITO DE CIPOLLETTI

Varios autores han señalado la importancia de mejorar la calidad de los servicios de los distritos de riego. Clemmens y Freeman (1987) analizaron cómo los distritos de riego influyen en el rendimiento de un proyecto de riego, teniendo en cuenta la importancia del flujo de información bidireccional entre el distrito y sus agricultores. Dedrick et al. (1989) propusieron el concepto del Programa de Mejoramiento de la Gestión como un procedimiento para desarrollar las capacidades de gestión y hacer cumplir las políticas de conservación del agua en un distrito de riego.

Luego de un conocimiento real del Distrito de Cipolletti, a partir del diagnóstico del funcionamiento del mismo y de la implementación del modelo de simulación HYDRUS-1 se propone implementar una herramienta tecnológica que permitirá, al distrito, mejorar su gestión hacia los productores.

En ésta Tesis, se plantea el desarrollo de una página web como instrumento para materializar la comunicación antes descrita. Esta página web contendrá información a tiempo real de forma tal que cada uno de los regantes puede conocer datos de utilidad para el manejo óptimo de su parcela de riego.

Una experiencia como ésta se desarrolla en Albacete (España) en el Centro Regional de Estudios del Agua (CREA) cuya finalidad es la investigación y desarrollo tecnológico sobre temáticas que afectan al uso del agua (<http://crea.uclm.es/crea>). Dentro del CREA se encuentra el SIAR (Servicio integral de asesoramiento al regante), este es un nuevo servicio de la Consejería de Agricultura, en colaboración con la Universidad de Castilla-La Mancha, que pretende colaborar con los agricultores en el manejo racional y eficiente de los medios de producción. El SIAR suministra un adecuado apoyo científico y técnico para optimizar el uso de un recurso tan básico para la vida como es el agua, de manera de conseguir que la agricultura sea una actividad sostenible y compatible con el medio ambiente.

El objetivo de construir la página web del Distrito de Cipolletti tiene como finalidad mantener una comunicación fluida entre los encargados del Distrito y los productores, así como también que el productor este informado de distintas variables de interés, las actividades que desarrolla el Distrito y los cursos de capacitación planificados para la temporada.

La página cuenta con una ventana de inicio donde se muestran 3 bloques que aportan información del Distrito de Riego, la ubicación, los objetivos del consorcio y las novedades.

En la barra superior se presentan 4 menus principales:

1. Meteorología (Figura 2)
2. Actividades del Distrito (Figura 3)
3. Cursos de Capacitación (Figura 4)
4. Contacto y ubicación del Distrito (Figura 5)

Dicha página deberá ser actualizada permanentemente con novedades y secciones que resulten de interés para el usuario.

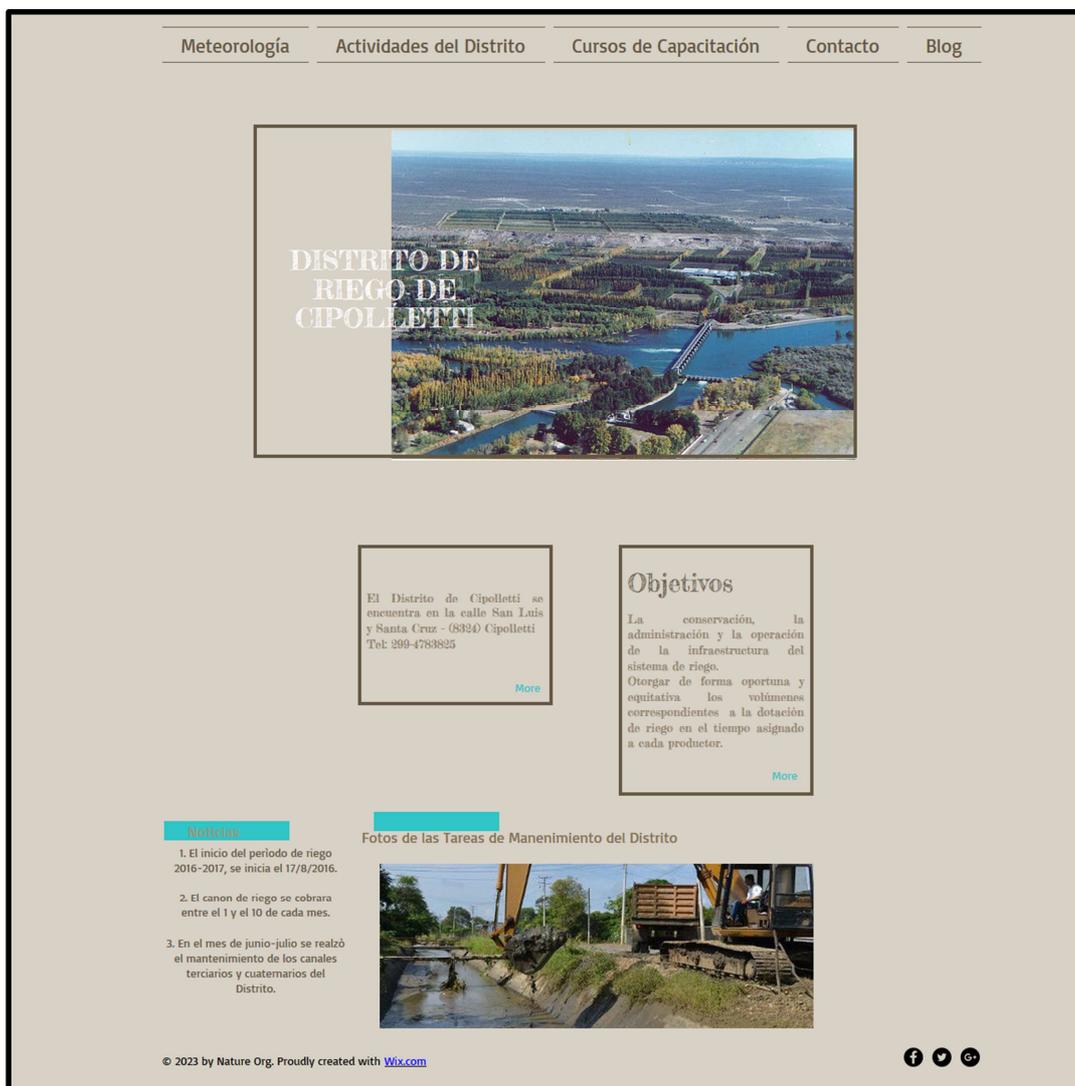


Figura 1: Página principal

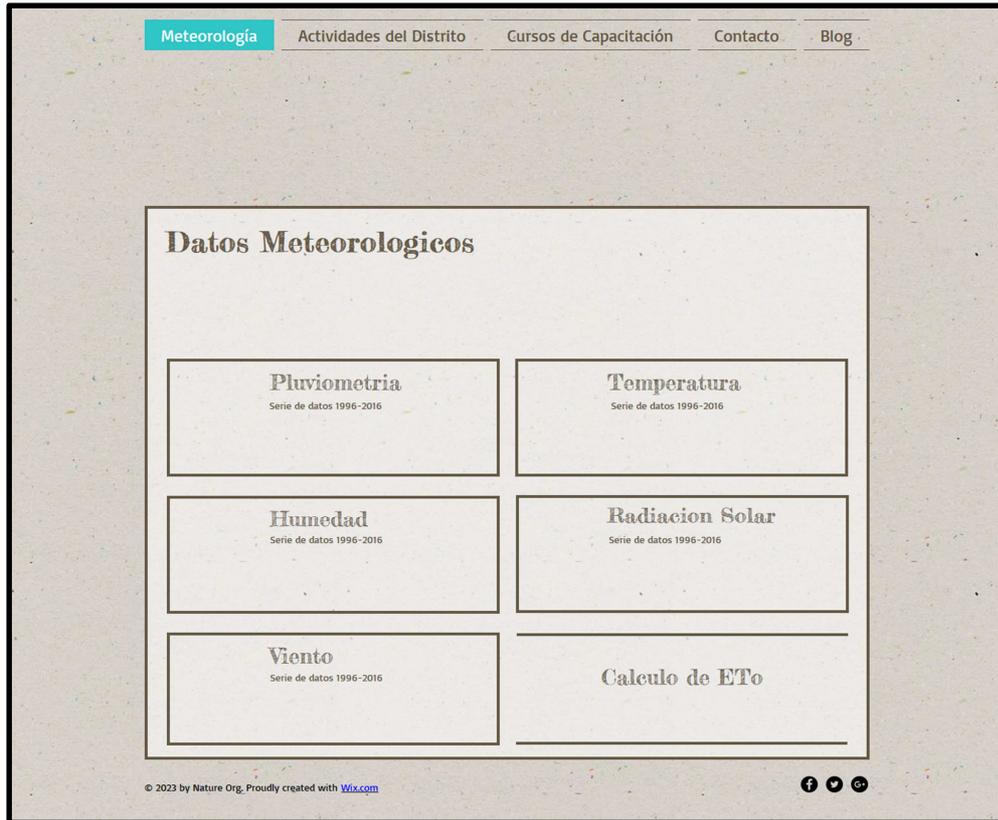


Figura 2: Datos Meteorológicos

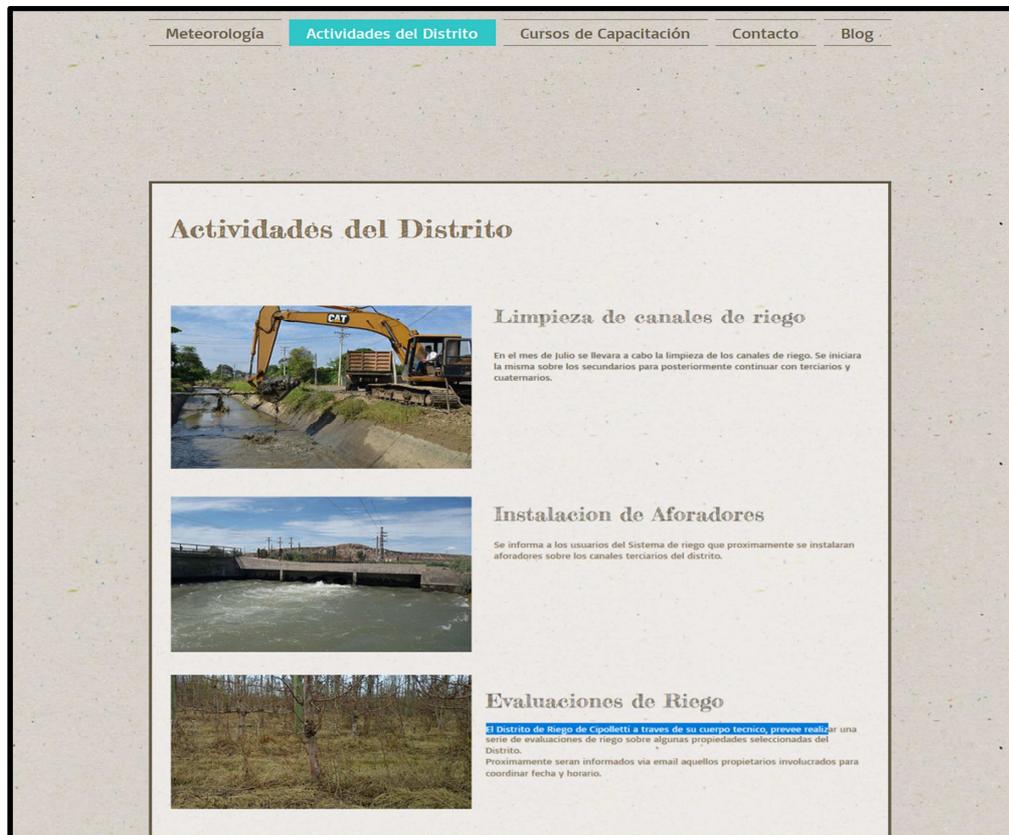


Figura 3: Actividades del Distrito

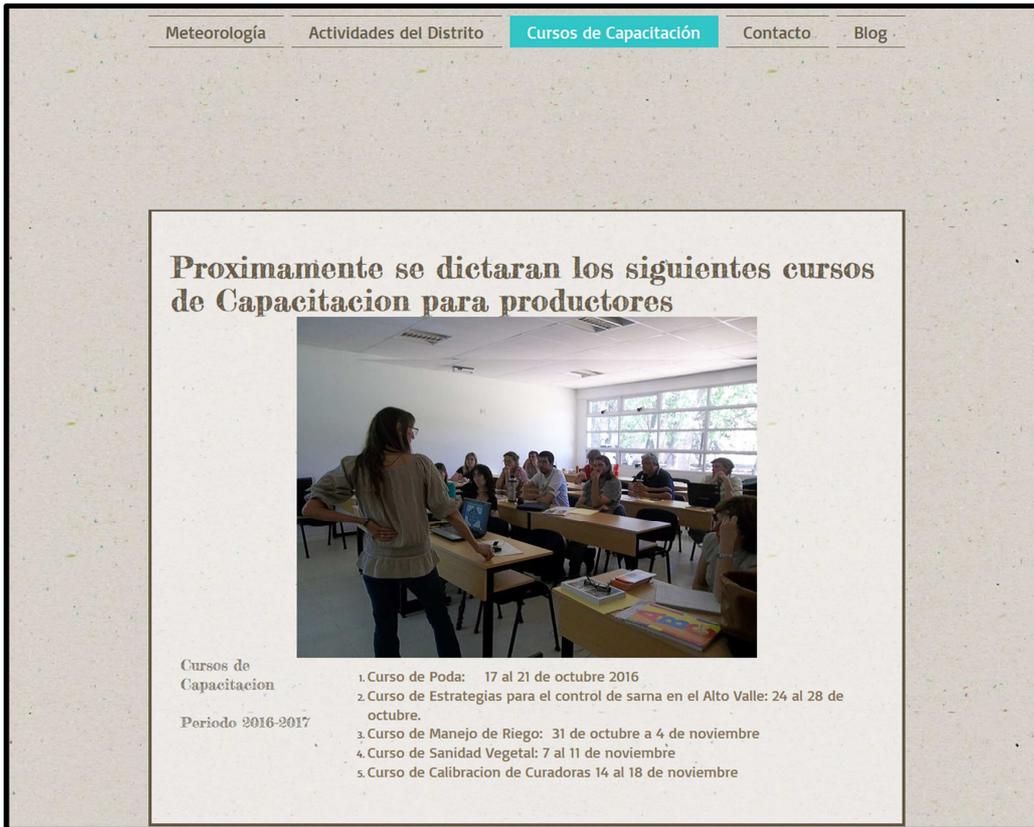


Figura 4: Cursos de Capacitación



Figura 5: Contacto y ubicación del Distrito.

CAPITULO 8 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que la propuesta metodológica utilizada en esta tesis contribuye a optimizar el uso del agua en el Distrito de Riego de Cipolletti.

La evaluación del funcionamiento del sistema de distribución y conducción y de las obras hidráulicas menores permiten concluir que:

- El sistema de riego posee una antigüedad centenaria, con un importante deterioro en sus obras de infraestructura (compartos, alcantarillas, sifones, acueductos, etc.), donde se producen fugas de agua en sus compuertas, problemas de cierre y caudales de entrega inexactos.
- Los valores encontrados de pérdidas en la distribución promedio a nivel de red de riego son de $33 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}\text{km}^{-1}$. Extrapolando este valor a todo el Alto Valle, con una longitud de canales terciarios, secundarios y cuaternarios 560 km, representa aproximadamente un 26 % ($18480 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) del caudal de ingreso al canal principal ($70000 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$).

Las eficiencias de aplicación, almacenaje y distribución en parcela (promedio) son 25, 100 y 90 % respectivamente.

- La deficiente nivelación, los bajos caudales disponibles, la preparación y dimensión de la melga, la falta de limpieza producen tiempos de aplicación elevados que generan una disminución de la eficiencia de aplicación sobre la parcela. Variables que pueden ser controlables por el productor.
- Todos estos factores intervienen en la excesiva dotación real utilizada para el riego, hecho reconocido por especialistas e instituciones y remarcado con las actuales variaciones climáticas, pues comprometen aun más la disponibilidad del recurso para el desarrollo futuro.

Las herramientas utilizadas en este trabajo y que conforman la metodología aplicada, se consideran adecuadas para analizar, administrar, controlar y optimizar el manejo sustentable de un Distrito de Riego.

- Para el ordenamiento y administración más eficaz del agua, el programa ADOR resulta apropiado para la implementar una base de datos y un sistema de información geográfica del Distrito de Riego. Se recomienda utilizar la versión 2.0 de manera de potenciar el uso de la herramienta y el cálculo de eficiencias de riego, componentes no aplicadas en este trabajo.
- En la aplicación de tecnología moderna para el manejo del riego, los sensores de medición de humedad han sido uno de los puntos críticos evidenciados dentro del desarrollo de la Tesis, ya que en algunos casos no registraron valores adecuados o dejaron de funcionar perdiendo así el registro completo de una temporada. La evaluación de su buen funcionamiento es prioritario para la implementación del modelo de simulación.
- La aplicación de modelos dinámicos, en lugar de modelos de balance hídrico, mejoran los resultados de las simulaciones dado que procesos como capilaridad y percolación profunda no se estiman a través de funciones empíricas que dependen solo del tipo de suelo, sino de los procesos físicos del flujo en el medio poroso.
- El ascenso capilar no solo depende del tipo de suelo, como consideran los modelos de balance hídrico, sino además de la profundidad de la capa freática y de la intensidad de evapotranspiración del cultivo.
- El modelo dinámico utilizado (HYDRUS-1) resulta una herramienta potente para determinar las variaciones de tensión y humedades en el perfil radical a lo largo del desarrollo del cultivo, así como para generar escenarios que permitan analizar las propuestas de manejo sugeridas para las distintas problemáticas del Distrito.
- El riego controlado sin estrés produce mejores eficiencias de aplicación (69 %), en un suelo franco y con buenas condiciones de drenaje, cuando a la programación sugerida se le incluye una reducción de la lámina aplicada en la Etapa I y postcosecha, en combinación con una pequeña reducción en la Etapa II donde se produce el crecimiento del fruto (sitio 2).
- No se podría aplicar el mismo patrón de reducción de lámina, a la programación obtenida para suelos limosos, dado que las tensiones serían superiores a la que exige una extracción óptima por parte del cultivo.

- Cuando se analiza una situación con freática poco profunda (sitio 3) la alternativa que mejora la eficiencia de aplicación comienza con el diseño de un dren que permita aumentar la profundidad de la napa freática combinado con una nueva programación de riego que logra eficiencias del 64%.
- El modelo HYDRUS-1 permite determinar la tendencia a largo plazo (20 años) del efecto de las sales en el perfil analizado, los resultados indican que el aumento en la concentración del perfil depende principalmente de la concentración de sales del agua de riego, más que de las condiciones iniciales del suelo y de la concentración de la capa freática.
- El Distrito de Riego debería programar anualmente y suministrar el agua que corresponde en volumen, caudal y oportunidad de riego de manera que el productor deba ajustarse a ese condicionamiento, condición que ayudará a mejorar la eficiencia de riego de su parcela
- Es necesario organizar, por parte del Distrito, cursos de capacitación dirigidos a los operadores del sistema de riego, así como también para los regantes en relación al uso y aplicación del agua.
- Es fundamental a la hora de realizar un estudio económico incluir las principales limitaciones bio-físicas que posee el área (profundidad de la capa freática, salinidad, ocurrencia de heladas), dado que si esto no ocurriera se obtendrían resultados erróneos.
- Altos valores de salinidad en el suelo, reducen ampliamente los márgenes brutos, dado que existe una reducción en los valores de producción de algunos cultivos.
- Dentro de los factores físicos analizados, la salinidad es la que genera mayor impacto sobre los márgenes brutos de la totalidad de los cultivos analizados.
- El mínimo margen bruto lo produce la ocurrencia de heladas en plena floración, período donde solo están implementadas defensas para los cultivos de frutales y la vid.

CAPITULO 9 BIBLIOGRAFIA REVISADA Y CITADA

Acevedo Netto, J.M. y Acosta Alvarez, G. (1975). Manual de Hidráulica . Editora Edgard Bucher Ltda. 578 pp.

Administración Provincial del Agua (APA). (1984). Dirección General de Hidráulica y Saneamiento. Estudio Hidrológico y Drenaje. Área de Riego Centenario. 119 pp.

Aguirre, M.; Norero, A. (1977). Estudio agrofísico de las relaciones entre la capa freática y la productividad de los cultivos. CIDIAT. Mérida. Venezuela. 47 pp.

Alam, M.M. y Bhutta, M.N. (2004). Comparative evaluation of canal seepage investigation techniques. Agricultural Water Management 66. pp 65-76.

Allen, R.G.; Burt, C. Clemmens, A.J.; 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). 6 pp.

Allen, R.G.; Willardson, L.S.; Frederiksen, H. (1997). Water use definitions and their use for assessing the impacts of water conservation. In: de Jager JM, Vermes LP, Ragab R (eds) Proceedings of the ICID workshop on sustainable irrigation in areas of water scarcity and drought. Oxford –England. pp 72–82.

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. y Smith, M.D. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage. Paper Nro 56. FAO. Roma. 300 pp.

Allen, R.; Santos Pereira, L.; Raes, D.; Smith, M. FAO56. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE. Roma. Italia. 298 pp.

Alvarez, O; Galeazzi, J.; Stangaferro, S.; Bartush, A. y Polla, G. (1995). Informe Final: Análisis y elaboración de datos freáticos e hidroquímicos del Alto Valle de Río Negro. Convenio UNCo-Agua y Energía. Plan de Trabajo Nro Cinco Saltos. Río Negro. 82 pp.

Anat, A., Duke, H.D., Corey, A.T. (1965). Steady Upward Flow from Water Tables. Colorado State University, Ft. Collins, CSU Hydrology Paper No. 7. 33 pp.

Andreu, J. ; Salas, J. (1992). La modelación en planificación hidráulica. Modelos de Simulación y síntesis de Hidrología Superficial. Serv. Publ. UPV. Valencia.
<https://aulavirtual.um.es/umugdocente-tool/guiahtml>

Arteaga Ramírez, R.; Montiel V. y Vázquez Peña, M. (2011). Programa CROPWAT para planeación y manejo del recurso hídrico. Revista mexicana de ciencias agrícolas. vol.2 no.2. Texcoco mar./abr. pp 179-195.

Arbat, G.; Puig-Bargués, J.; Duran-Ros, M.; Barragán, J.; Ramírez de Cartagena, F. (2007). Distribución del agua en el suelo en riego por superficie: aplicación del código Hydrus. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VIII. J.V. Giráldez Cervera y F.J. Jiménez Hornero. pp 305-311.

ASCE (1991). Management, operation and maintenance of irrigation and drainage systems. In: Johnston, W.R., Robertson, J.B. (Eds.). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice no. 57. New York. USA. 432 pp.

Ayers, R.S. y Westcot, D.W. (1976). Water Quality for agricultura. FAO. Irrigation and Drainage papers Nro 29. 85 pp.

Barragán Fernández, J.; Cots Rubio, I.; Montserrat Viscarri, J. (2009). Evaluación de los regadíos y mejora de su eficiencia. Departamento de Ingeniería Agroforestal Universidad de Lleida. 21 pp.

Barros, R.; Isidoro, D.; Aragüés R. (2011). Long-term water balances in La Violada irrigation district (Spain): I. Sequential assessment and minimization of closing errors. Agricultural Water Management 102 (2011). pp 35–45

Bautista E.; Clemmens, A.J.; Strelkoff, T.S.; Niblack M. (2009). Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR - Example application. Agricultural Water Management 96. pp 1162–1169.

Bethune, M.G., Selle, B., Wang, Q. (2008). Understanding and predicting deep percolation under surface irrigation. Water Resour. Res. 44. W12430. doi: 10.1029/2007WR006380.

Biju A. G.; Raghuvanshi; N.S.; Singh, R. (2004). Development and testing of a GIS integrated irrigation scheduling model. Agricultural Water Management 66 (2004) 221–237.

Blackhall, V.; Chersicla, G.; Chiofalo, F. (2008). Análisis de un Establecimiento Productivo. Trabajo Final de la Cátedra de Horticultura. 44 pp.

Boggio, F.; Frattini, M.; Hemadi, A.; Kiessling, J. (1993). Estudio de caso: Planificación Hortícola para un establecimiento del Alto Valle. Trabajo Final Cátedra de Horticultura. 85 pp.

Borga, S., y Zehnder, R. (2007). Margen Bruto Agrícola. Revista Márgenes Agropecuarios. Nro. 269.

Bos, M. and Nugteren, J. (1982). On irrigation efficiencies. Publication 10. ILRI. The Netherlands.

Brooks, R.H., Corey, A.T. (1964). Hydraulic Properties of Porous Media. Colorado State University, Ft. Collins, CSU Hydrology Paper No. 3.

Bucks, D. A., T. W. Sammis, J. L. Dickey. (1990). Irrigation for arid areas. In: Hoffman, G.J., Howell, T.A. Solomon, K.H. (Eds.) Management of Farm Irrigation Systems. ASAE. St. Joseph, MI. pp 499-548.

Burt, C.M.; Clemmens, A.J.; Strelkoff, T.S.; Solomon, K.H.; Bliesner, R.D.; Hardy, L.A.; Howell T.A.; Eisenhauer, D.E. (1997). Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. J Irrig Drain Eng 123(6). pp 423–442

Canizo, E. y Lucero, P. (2002). Investigación operativa. Software para programación lineal LINGO/LINDO. www1-frm.utn.edu.ar/ioperativa. 22 pp.

Castro Franco, C., Reyes, H. E. C., Díaz, G. E. V., & Franco, S. N. H. E. C. (2009). Criterios técnicos para un manejo eficiente del riego en cebolla de bulbo: Distrito de Riego del Alto Chicamocha-Boyacá .No. Doc. 22998. Bogotá. 187 pp.

Catala, L.; Blanco, A.; Bandoni, A. (2010). Planeamiento óptimo de reemplazo de variedades de fruta de pepita. VI Congreso Argentino de Ingeniería Químicas. Mar del Plata. Septiembre 2010. 23 pp.

CAyEE-PRN-Convenio Agua y Energia Electrica-Provincia de Rio Negro.(1987). Estudio para el aprovechamiento integral del Río Negro. Sector drenaje: diagnostico Alto Valle. Cil- Consorcio Inconas- Latinoconsult.

Chalmers, D.J. Burge, G. Jerie, P.H. and Mitchell, P.D. (1986). The mechanism of regulation of "Bartlett" pear fruit and vegetative growth by irrigation withholding and regulated deficit irrigation. J.Amer.Soc. Hort. Sci. 111. pp 904-907.

Chambouleyron, J. (1977). Evaluación de la eficiencia de riego a nivel zonal. INCyTH -CRA. Mendoza. Argentina. 18 pp.

Chambouleyron, J.; Menenti, M.; Fornero, I.; Morábito, J. (1982). Evaluación y optimización del uso del agua en grandes redes de riego. INCyTH – IILA. Roma. Italia. 176 pp.

Chávez-Morales, j.; Mariño, M.A.; Holzapfel, E.A.(1992). Planning simulation model of irrigation district J. Irrig. Drain. Eng. 118 (1). pp 74–87.

Clemente, R.S.; De Jong, R.; Hayhoe, H.N. y Hares, M. (1994). Testing and comparison of Three Unsaturated Soil Water Flow Models. Agricultural Water Management 25. pp 135-152.

Clemmens, A.J.; Freeman, A.J. (1987). Structuring distribution agencies for irrigation water delivery Planning, Operation, Rehabilitation and Automation of Irrigation Water Delivery Systems. Proceedings of the Irrigation Division. ASCE. Portland, Oregon. pp 72–80

Coopersmith, E.; Cosh, M.; Daughtry, C. (2014). Estimación de humedad a escala de campo usando sensores COSMOS: un estudio de validación con redes temporarias y índice de área foliar. Journal of Hydrology 519. pp 637–643.

Crea-Centro regional de estudios del agua. (2001). Universidad Castilla la Mancha. Albacete. España. <http://crea.uclm.es/crea>.

Criddle, W.; Davis, S.; Pair, C.; Shockley, D. (1956). Methods for evaluating irrigation systems. U.S. Department of Agricultural Handbook. 82. 24 pp.

Cropwat 8.0-FAO.(2000). Organización de las Naciones unidas para la alimentación y la agricultura. <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

Danuso, F., Gani, M., Giovanardi, R. (1995). Field water balance: BidriCo 2. In: Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G. (Eds.) Crop-Water-Simulation Models in Practice. Wageningen Pers, Wageningen, pp 49–73.

Dedrick, A. R., Clyma, W., & Palmer, J. D. (1989). A management improvement process to effectively change irrigated agriculture. Planning for water shortages. Water reallocations and transfers. Drought management. Boise. Idaho. pp 45-58.

Deininger, R.A. Ph.D. (1964).Dissertation. Northwestern University. Evanston. Illinois.

Delibaltov, Y. y Rey, R. (1982). Metodología para la determinación de la evapotranspiración real a partir de los datos de humedad del suelo. Instituto de Investigaciones de Riego y Drenaje. Informe Técnico.

Diaz Abril, D.; Velez Sanchez, J.E. y Rodríguez- Hernández, P. (2016). Evaluación de la respuesta a la aplicación de riego deficitario controlado en cultivo de pera variedad triunfo de viena (*Pyrus communis* L.).Acta Agron. 65 (2). pp 156-163.

Dietrich, S. (2013). Infiltración y recarga a través del suelo y zona no saturada en áreas de llanura. Caracterización en base a la aplicación de tomografía eléctrica y trazadores. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Geológicas. 187 pp.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO, Rome, FAO Irrig. Drain. Paper 24 (revised). 144 pp.

Doorenbos, J., Kassam, A.H. (1979). Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. FAO. Roma. Italia. 193 pp.

Dourado-Neto, D. (1998) Principles of Crop Modelling and Simulation: I Uses of Mathematical Models in Agricultural Science. Sci. Agric. Piracicaba 55. Numerous Especial. pp 46-50

Duarte Torres, O. ; Pulido Herrera, P.; Silva Zalzuk, J.; Holmann, J. (1999). Análisis de la situación actual y de alternativas tecnológicas de los sistemas de producción agropecuarios de la microregión Valle del Cesar a través de un modelo de optimización. APA. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). 21 pp.

Durner, W. (1994). Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, Water Resour. Res.32(9). pp 211-223.

Durner, W.; Priesack, E.; Vogel, H.-J. and T. Zurmühl. (1999). Determination of parameters for flexible hydraulic functions by inverse modeling. In: M. Th. van Genuchten, F. J. Leij, L. Wu (Editors), Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media. University of California. Riverside. CA. pp. 817-829.

Engelbert, P.J.; Hotchkiss, R.H.; Kelly, W.E. (1997). Integrated remote sensing and geophysical techniques for locating canal seepage in Nebraska. Appl. Geophys. 38. pp 143-154.

English, M. y Navaid, S. (1996). Perspectives on deficit irrigation. Agricultural Water Management. Vol. 32(1). pp 1-14.

Ernst, L. F. (1962). Groundwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidengen (Groundwater flow in the saturated zone and its calculation when horizontal parallel open conduits are present), Versl. Landbouwk. Onderz. 67.1. Pudoc. Wageningen. the Netherlands (in Dutch). 189 pp.

Fernando, R. M., Pereira, L. S., & Liu, Y. (2001). Simulation of capillary rise and deep percolation with ISAREG. In International Conference on Agricultural Science and Technology. Vol. 6, pp 447-455.

FAO. (2001). SIMIS: scheme irrigation management information system, version 2.0 for Windows. In: Sagardoy, J.A.; Pastore, G.; Yamashita, I.; López-Cortijo, I.; Lozano, D.; Mateos, L. (Eds.). Land and Water Digital Media Series no. 6. FAO. Rome. Italy.

FAO 12. (2015). Documento de Trabajo N°12 Aspectos ambientales de la Provincia de Río Negro. Proyecto FAO UTF ARG 017. Desarrollo Institucional para la Inversión. General Roca. 48 pp.

FAO 29. (1976). Calidad de Agua para la agricultura. Riego y Drenaje. Roma-Italia. 85 pp.

FAO 39. (1982). Lysimeters. Rome: Irrigation and Drainage Paper. 68 pp.

FAO 56. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. ISBN 92-5-304219-2. Roma-Italia. 298 pp.

FAO 66. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Estudio FAO Riego y Drenaje. ISSN 0254-5284. Roma-Italia. 510 pp.

Feddes, R. A. Kowalik, P.J. and Zaradny, H. (1978). Simulation of Field Water Use and Crop Yield. John Wiley & Sons, New York. 198 pp.

Feyen, Jan y Zerihum, Dawit. (1999). Assessment of the performance of border and furrow irrigation systems and the relationship between performance indicators and system variables. Agricultural Water Management 40. pp 353-362.

Flores, A. ; Lässig, J. ; Cogliati, M. ; Palese, C., Bastanski, M. (1996). Mediciones de la Capa de Inversión Nocturna en los valles de los ríos Limay, Neuquén y Negro. Anales VII Congreso Argentino de Meteorología. VII Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología. Bs. As. Resumen Actas 2 pp.

Fortes, P.S.; Platonov, A.E.; Pereira, L.S. (2005). GISAREG—A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use. Agricultural Water Management 77. pp 159–179.

Fox, D. (1981). Judging air quality model performance. A summary of the AMS workshop on dispersion model performance. Bull Am. Meteorol. Soc. 62. pp 599-609.

Franck, R.G. (1995). Introducción al cálculo de costos agropecuarios. 6ta edición. Editorial Ateneo. ISBN 950-02-3064-X. Buenos Aires. pp 57 p.

Freundlich, H., & Hatfield, H. S. (1926). Colloid and capillary chemistry. Publisher: Methuen And Co. Ltd. London. 916 pp.

Fundación Bariloche-UNCo-Cure-Conyct UBA-PIRNA-Coop. Ing. Jacobacci-SEI. (2016). (<http://www.climagua.org.ar/>).

Galeazzi, J. y Requena, A. (2011). Proyecto INTA-AUDES-CONADEV: Aportes para mejorar la Operación de Distritos de Riego. pp 15.

Gallardo, J.; Fonseca, J. (1979). Ajuste de algunas funciones de producción para el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). Agron. Costarr. 3(1). pp 35-44.

Gallo, S.(2010). Heladas Primaverales en el Valle de Viedma: Su efecto en la producción de los viñedos, en los últimos seis años. Comunicaciones - Publicación del Valle Inferior Año 20 - N° 64. pp 15-16.

Girona, J. (2005). Análisis de la respuesta de la viña a la aplicación de la técnica de "Partial Rootzone drying" (PRD). L'innovation en viticulture/oenologie. Station Regionale ITV Midi-Pyrenees. pp 18-22.

Golberg, A.D.; Kin, A.G. (2008). El agua: de la molécula a la biosfera. Ediciones Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. La Pampa. Argentina. 231 pp.

Goncalves, M.C. ; Pereira, L.S.; Leij, F.J. (1997). Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of Portuguese soils. Eur. J. Soil Sci. 48. pp 387-400.

Grassi, C.J.(1976). Métodos de riego. CIDIAT. Mérida. Venezuela. 265 pp.

Grassi, C.J. (1998- Primera impresión 1988). Fundamentos del riego. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT): Mérida. Venezuela. 392 pp.

Grassi, C. (2001). Operación y Mantenimiento de Sistemas de Riego. Serie Riego y Drenaje. RD-44. CIDIAT. Mérida. Venezuela.

Graves, G.W.; Hatfield, G.; and Whinston, A. (1969). Water pollution control using by-pass piping. Water Resources. Res 5.1. pp 13-47.

Graves, G.W.; Hatfield, G.; and Whinston, A. (1972). Mathematical programming for regional water quality management. Water Resources. Res 8.2. pp 273-290

Gurovich, L.A. y Pàez, C.I. (2004). Influencia del riego deficitario controlado sobre el desarrollo de las bayas y la composición química de los mostos y vinos. Artículo de Investigación. Departamento de Fruticultura y Enología. Facultad de Agronomía e Industria Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile. pp 175-186.

Hartkamp, A.D., White, J.W. y Hoogenboom, G. (1999). Interfacing Geographic Information Systems with Agronomic Modeling: A Review. Agron. J. 91. pp 761-772.

Hatcho, N. Sagardoy, J.A. (1994). Water distribution module of the SIMIS program. Irrigation water delivery models. Water Reports (FAO). Nro. 2 / FAO. Rome (Italy). Land and Water Development Div.p. pp 63-78

Helweg. (1992). Recursos Hidráulicos. Planeación y Administración. Limusa. Noriega Editores. 379 pp.

Hernandez Reyes, M. (2000). Optimización simultánea de funciones de producción: una propuesta de modelación para el caso de dos funciones sujetas a las mismas restricciones.

Boletín Informativo CIAGROS 1-2000. Guatemala. Facultad de Agronomía. Universidad de San Carlos. 18 pp.

Hillel, D. (1998). Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. California. 771 pp.

Hoffman, G. J. and van Genuchten, Th. (1983). Soil properties and efficient water use: Water management for salinity control. In: H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R. Sinclair (eds.), Limitations and Efficient Water Use in Crop Production, Am. Soc. Of Agron. Madison. WI. pp. 73-85

Hooghoudt, S. B.(1940). Bijdrage tot de kennis van enige natuutkundige grootheden van de grond (Contribution to the knowledge of several physical soil parameters). Versl. Landbouwk. Onderz. Wageningen. the Netherlands (in Dutch). 46 (14) B. pp 515-707.

Horne, F.; Galeazzi, J. y Polla, G. (1996). "Informe de evaluación de pérdidas del canal secundario norte distrito "El Chañar". 10 pp.

Horne, F.; Galeazzi, J. y Polla, G.M. (2010).". Capítulo 7 libro: "Pera Williams: Manejo DEL Riego Manual para el productor y empacador". Edición: ProRioNegro, Buenos Aires. Elaborado en el marco del proyecto: "Competitividad de la pera Williams". Programa de eslabonamientos productivos (ESPRO) COFECYT. Gob. Pcia. de Río Negro. ISBN: 978-987-25872-0-8. pp 52-67.

Hotchkiss, R.H., Wingert, C.B., Kelly, W.E. (2001). Determining irrigation canal seepage with electrical resistivity. ASCE J. Irrig. Drain 127. pp 20–26.

Humphries, M.S., Kindness, A., Ellery, W.N., Hughes, J.C., Bond, J.K., Barnes, K.B., (2011). Vegetation influences on groundwater salinity and chemical heterogeneity in a freshwater, recharge floodplain wetland, South Africa. Journal of Hydrology 411 (1–2). pp 130–139.

Informe FAO-Río Negro. (2015). Áreas de riego en la Provincia de Río de Negro. Provincia de Río Negro. Argentina. 48 pp.

INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. (2005). Fruticultura: Establecimientos de Huertos de Cereza. Boletín Nro. 130. ISSN 0717-4829. Vista Alegre. Chile. 85 pp.

INTA-Estación Experimental Alto Valle. (1987). Diagnóstico Regional. Reimpresión financiada por Corpofrut. 148 pp.

INTA-Estación Experimental Alto Valle. (2004). Pautas Tecnologías: frutales de Pepita. Manejo y análisis económico-financiero. ISBN 987-521-140-0. General Roca. 132 pp.

INTA-Estación Experimental Alto Valle. (2006). Pautas Tecnologías: cerezo. Manejo y análisis económico-financiero. ISBN 987-521-208-3. General Roca. 138 pp.

INTA-Estación Experimental Alto Valle. (2007). Pautas Tecnologías: vid para vinificar. Manejo y análisis económico-financiero. ISBN-13 987-521-229-93. General Roca. 98 pp.

INTA-Estación Experimental Alto Valle. (2009). Indicadores Económicos para la Gestión de Empresas Agropecuarias con cultivos plurianuales. Bases metodológicas. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales. ISSN 1851-6955- Buenos Aires. 44 pp.

INTA-Estación Experimental Alto Valle. (2011). Indicadores Económicos para la Gestión de Establecimientos Agropecuarios con cultivos plurianuales. Bases metodológicas. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales. ISSN 1851-6955- Buenos Aires. 56pp.

Inzunza López, J.O. (2008). Optimización de patrones de cultivo de distritos de riego del noroeste de México. Revista Chapingo Serie Zonas Aridas. 2008. 7. pp 157-163.

Israelsen, O.W. (1932 y 1950). Irrigation principles and practices. John Willey y Sons, Inc. 405 pp.

Israelsen, O.W y Hansen, V.E. (1962). Irrigation principles and practices. John Willey & Sons, Inc. 447 pp.

Israelsen, O. y Hansen, V. (1965). Principios y aplicaciones del riego. Universidad del estado de Utah, Logan, Utah, Estados Unidos. 396 PP.

ITAC.(1995). Organización, procesamiento y evaluación de la información sobre niveles del agua freática en el Alto Valle de Río Negro. Instituto de Tierras y Aguas del Comahue (ITAC). Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Comahue. 82 pp.

Jackson, R.D.; Idso, S.B.; Reginato, R.J. y Pinter, P.J.Jr.(1981). Canopy Temperature as a crop water stress indicator. Water Resources Research. Vol 17.4. pp 1133-1138.

Jensen, M. (1967). Evaluating Irrigation efficiency. Journal of irrigation and drainage division. Proceeding of the American Society of Civil Engineering 93 (1). pp 83-97.

Jensen, M.M.E.; Swarner, L.R.; Phelan, J.T. (1967). Improving irrigation efficiencies. Chapter 61. Irrigation of Agriculture Lands. Agronomy Serie 11. American Society of Agronomy. Wisconsin, USA

Jensen, M.E. (1972). Programming irrigation for greater efficiency. In: Hillel, D. (Ed.), Optimizing the Soil Physical Environment Toward Greater Crop Yields. Academic Press, New York. pp. 133–161.

Jensen, M.E. (1993). Impacts of irrigation and drainage on the environment. In: 5th N.D. Gulhati Lecture. The Hague. The Netherlands. French and English. 26 pp

Jiménez-Martínez, J.; Skaggs, T.H.; van Genuchten, M.Th.; Candela, L. (2009). A root zone modelling approach to estimating groundwater recharge from irrigated areas. Journal of Hydrology 367 (2009). pp 138–149.

Jury, W. y Horton, R. (2004). Soil physics. 6ta. ed. John Wiley & Sons, Inc., USA. 370 pp.

Karimov, A.; Simunek, J.; Hanjra, M.; Avliyakov, M.; Forkutsae, I. (2014). Effects of the shallow water table on water use of winter wheat and ecosystem health: Implications for unlocking the potential of groundwater in the Fergana Valley (Central Asia). Agricultural Water Management 131. pp 57–69.

King, H.W. y Brater, E.F.(1995). Manual de hidráulica, México, UTEHA; Limusa. 536 p.

Kinzli, K.; Martinez Oad, R.; David, A.P. (2010). Using an ADCP to determine canal seepage loss in an irrigation district. *Agricultural Water Management*. Volume 97. Issue 6. pp 801-810.

Kite, G.W. (2000). Using a basing –scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *Journal of Hydrology* 229. pp 59-69.

Kite, G. W., & Droogers, P. (2000). Comparing evapotranspiration estimates from satellites, hydrological models and field data. *Journal of Hydrology*. 229(1). pp 3-18.

Klute, A. (1982). Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review. In: Unger, P.W., et al. (Ed.), *Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes*. Special Publication 44. Madison. pp. 29–43.

Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation and the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. 6 th Comm. Inter. Soil Sci. Russian Part*. pp. 17-21.

Kosugi K.(1996). Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties, *Water Resour. Res.*, 32(9). Pp. 2697-2703.

Kraatz, D. B. (1977). *Irrigation canal lining*. FAO land and water development series. 28(1). 199 pp.

Kroes, J. G., & Van Dam, J. C. (2003). *Reference Manual SWAP; version 3.0*. 3 (No. 773). Alterra. 211 pp.

Kuo, F.; Merkley, G.P.; W. Liu, C. (2000). Decision support for irrigation project planning using a genetic algorithm. *Agric. Water Manage.* 45 (3). pp 243–266.

Kutilek, M. y Nielsen, D. (1994). *Soil Hidrology: textbook for students of soil science, agricultura, forestry, geoecology, hydrology, geomorphology or other related disciplines*. ISBN 3-923381-26-3. Catena Verlag. Germany. 364 pp.

Lecina, S.; Playan, E; Isidoro, D.; Dechmi, F.; Causape, J.; Faci, J.M. (2005). Simulación y evaluación de riego del Distrito de Riego V de Bardenas (España). *Agricultural Water Management* 73. pp 223–245.

Li, Y.H., Dong, B. (1998). Real-time irrigation scheduling model for cotton. In: Pereira, L.S., Gowing, J.W. (Eds.), *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*. E & FN Spon, London. pp. 197–204.

Linares Forero, J. (2012). *Aplicación de un modelo unidimensional para flujo en suelos saturados y no saturados y transporte de herbicidas. Aplicación en zona centro de la Provincia de Córdoba*. Tesis de Maestría en ciencias de la ingeniería - mención recursos hídricos Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Universidad Nacional de Córdoba. 204 pp.

Liu, Y.; Pereira, L.S.; Fernando, R.M. (2006). Los flujos a través de la frontera inferior de la zona de las raíces en suelos limosos: Enfoques paramétrico para estimar la contribución de las aguas subterráneas y percolation. *Agricultural water management* 84. pp 27–40.

Liu, Y., Fernando, R.M. (1998). Irrigation scheduling. In: Pereira,L.S., Musy, A., Liang, R.J., Hann, M. (Eds.), Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the North China Plain. ISA, Lisbon. pp 167–235.

Liu, Y.; Teixeira, J.L.; Zhang, H.J.; Pereira, L.S. (1998a). Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agric. Water Manag.* 36. pp 233–246.

Liu ,Y.; Pereira, L.S.; Fernando, R.M.(2006). Flujos de agua a través de la zona de enraizamiento en suelos limosos: enfoques paramétricos para estimar la contribución de las aguas subterráneas y de la percolación profunda. *Agricultural Water Management* 84. pp 27–40.

Lui, E. N.; Roa, R. C.; Martínez, R. S.; Zelmer, H.; Reinoso, L. y Donofrio, M. (2011). Evaluaciones de riego parcelarias en el Valle Inferior del Río Negro, estrategias para la mejora de indicadores. XXIII Congreso Nacional del Agua. CPCNA Resistencia, Chaco. 8 pp.

López, Teresa.; Ruiz, M.E.; Cid,G.; Gonzalez, F. (2003). Caracterización del movimiento del agua en suelos irrigados del sur de La Habana: Contribución metodológica al procedimiento actual para la determinación de los Balances Hídricos. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*.Vol 12. Nro 2. pp 49-45

Loucks, D. P., Revelle, C. S., & Lynn, W. R. (1967). Linear programming models for water pollution control. *Management Science*, 14(4). 166-181 pp.

Loucks, D; Stedinger J.; Hith,D.(1981).Water resource systems planning and analysis. Cornell University. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. E.U.A. 559 pp.

Lozano,D.; Mateos,L. (2008). Utilidad y limitaciones de los sistemas de toma de decisiones en la mejora de la gestión de una zona regable. *Agricultural water management* 95. pp 409-418.

Malano, H.M. ; Chien, N.V.; Turrall, H.N.(1999). Asset management for irrigation and drainage infrastructure. Principles and case study. *Irrig. Drain. Systems*. 13. pp 109–129

Manual Pera Williams. (2010). “Pera Williams: Manejo DEL Riego Manual para el productor y emparador”. Edición: ProRioNegro, Buenos Aires. Elaborado en el marco del proyecto: “Competitividad de la pera Williams”. Programa de eslabonamientos productivos (ESPRO) COFECYT. Gob. Pcia. de Río Negro. ISBN: 978-987-25872-0-8. 167 pp.

Marsden, J.; Pingry,D.; and Whinston,A. (1973). Application of Nonlinear Programming to Water Quality Control”. *Water, Air and Soil Pollution* 2. pp 155-169.

Martin, D.L., Gilley, J.R. (1993). Irrigation Water Requirements, Chapter 2 of the 3National Engineering Handbook, Irrigation Section. USDA Soil Conservation Service, Washington, DC, 283 pp.

Maas, E.V. y Hoffman, G.J. (1977). Crop Salt tolerance. Current assessment.*J.Irrig.Drain.E-ASCE* 103. IR2. pp 115-134.

Mateos,L.;Lopez Cortijo, I.; Sagardoy, J. (2002). SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agricultural Water Management Volume 56. Issue 3.* pp 193–206

Mejia Saenz,E.; Palacios Velez, E.; García, A.;Santos Hernandez, A. (2002). Problemas operativos en el manejo del agua en Distritos de Riego. Terra Latinoamericana. Vol 20. Nro 002. Chapingo.México. pp 217-225

Merriam,J. and Keller, J. (1978). Farm Irrigation system evaluation: A guide for management. Department of Agriculture and Irrigation Engineering. Utah State University, Logan, Utah, USA. 271 pp.

Mermoud,A.; Tamini ,T.D.; Yacouba,H. (2005).Impacts of different irrigation schedules on the water balance components of an onion crop in a semi-arid zone. Agricultural Water Management 77. pp 282–295.

Meyer, W.S., White, B., Smith, D. (1996). Water use of Lucerne over shallow watertables in Australia. In: Camp, C.R.,Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds.). Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. Proceedings of the ASAE International Conference. San Antonio. TX. ASAE. St.Joseph, MI. pp. 1140–1145

Miller, D.E., Aarstad, J.S. (1972). Estimating deep drainage between irrigations. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 36. 124–127.

Millar,C.W. and Benson,L.V.(1983). Simulation of solute transport in a chemically reactive heterogeneous system:Model development and application.Water Resour.Res.19. pp 381-391.

Millington, R. J. y Quirk,J.M. (1961).Permeability of porous solids. Trans. Faraday Soc. 57. pp 1200-1207

Minjares-Lugo,J.L.;Valdés,J.B.;Salmón-Castelo,R.F.;Oroz-Ramos,L.A.;López-Zavala,R. (2010). Planeación, manejo y evaluación sustentable de los recursos hidráulicos en el Distrito de Riego 041, Río Yaqui, México. Tecnol. cienc. ua vol.1 no. versión On-line ISSN 2007-2422.

Mitchell, P.D.; Jerie, P.E. y Chalmers, D.J. (1984).Effects of regulated wáter déficits on pear growth, flowering, fruit growth and yield. J. Amer.Soc.Hort.Sci.109. pp 604-606.

Mitchell, P.D.; Van Den Ende, B. ; Jerie, P.E. y Chalmers, D.J. (1989). Responses of 'Barlett' pear irrigation to withholding irrigation, regulated deficit irrigation and tree spacing. Journal of the American Society for Horticultural Science.109. pp 604-606.

Mladen Todorovic,M.; Steduto,P. (2003). A GIS for irrigation management. Physics and Chemistry of the Earth 28. pp 163–174.

Molden, D. (1997). Accounting for water use and productivity. In:IWMI/SWIM Paper No. 1, International water management Institute. Colombo. Sri Lanka. 25 pp

Molden, D.; Sakthivadivel, R. (1999). Water accounting to assess use and productivity of water. Int J Water Resour Dev15(1). pp 55–71.

Molina-Ochoa,M.J. y Vélez-Sánchez,J.E.y Galindo-Egea,A.(2015). Resultados preliminares del efecto del riego deficitario durante el periodo de crecimiento rápido del fruto de pera (var. Triunfo de Viena) en la producción y calidad del fruto. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas.Vol. 9.No. 1. pp 38-45.

Montenegro, A. (2013). Tesis de Grado: Análisis de la incidencia de los factores que intervienen en la sustentabilidad del agrosistema frutícola en “Colonia La Lucinda (Río Negro). Escuela Superior de Salud y Ambiente; Universidad Nacional del Comahue (UNCo), Neuquén; Argentina. 147 pp.

Montenegro,A.; Galeazzi, J. y Polla, G. (2014). Manejo del riego en un monte frutal con niveles freáticos críticos. Aplicación del modelo de balance hídrico Win-Isareg. II. Actas: Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Santa Fe. Argentina. 9 pp.

Morábito, J.; Salatino,S. y Schilardi, C.(2003).El desempeño del uso agrícola del agua en los oasis de los ríos Mendoza y Tunuyán a través de nuevos indicadores. VI Jornadas de riego y fertirriego. Facultad de Ciencias Agrarias. Univ. Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. w.w.w. riegoyfertirriego.com/VI_Jornadas/index.htm

Morabito, José. (2003). Tesis: Desempeño del riego por superficie en el área de riego del Río Mendoza. Eficiencia actual y potencial. Parámetros de riego y recomendaciones para un mejor aprovechamiento agrícola en un marco sustentable. Postgrado Magister Scientiae en Riego Y Drenaje. Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, UNCU, Mendoza, Argentina. 92 pp.

Morbabito, J.A.; Mirabile,C.; Salatino,S. (2007). Eficiencia de riego superficial, actual y potencial en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). Revista Ingeniería del Agua de la Universidad de Córdoba.España. Vol. 14. No 3. pp 199-213.

Morábito, J.; Salatino,S.; Angella,G.; Prieto,D. (2008). Evaluación de campo al riego de los agricultores: casos prácticos y ventajas para la difusión de la tecnología apropiada; asesoramiento a los regantes para la modernización de los regadíos y su ambientalidad. Jornadas sobre "Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad". La Antigua (Guatemala). Red Riegos. CYTED y AECID. 81 pp

Mualem, Y. (1976).A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.Water Resour. Res. 12(3). pp 513-522.

Navarro Comalrena de Sobregrau, M. Frontela Delgado, D.; Casanova Mangana, E.; González González F.J. (2004). Evaluación de la zona regable de Valde Alferche (Huesca). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Secretaría General de Agricultura y Alimentación. Dirección General de Desarrollo Rural. España. 69 pp.

Nolting, J. T. (1976). Estudio sobre la distribución radical del manzano y peral en el Alto Valle de Río Negro. Investigación Agropecuaria, N° 2. Estación Experimental Regional Agropecuaria Alto Valle de Río Negro. 26 pp.

Nolting, J. T. (2004). El riego en el Alto Valle. situación actual y algunas propuestas de manejo. Rompecabezas tecnológico. Vol. 9, Nro. 39. 5 pp.

Nielsen, D. (1994), Soil Hydrology. ISBN 3-923381-26-3.Catena Verlag. Germany. 370 pp.

Norero,A. (1974). El agua y el aire en el suelo. Relaciones físicas básicas. Serie Suelos y Clima. Material de Enseñanza. Nro SC.32. CIDIAT. Mérida.Venezuela. 113 pp.

Ogata, G., Richards, L.A. (1957). Water content changes following irrigation of bare-soil that is protected from evaporation.Soil Sci. Soc. Am. Proc. 21. pp 355–356.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). (1994). Guía de Practicas Hidrológicas. Adquisición y Proceso de datos. Análisis, predicción y otras aplicaciones. OMM N° 168. 779 pp.

Ortega,J.F.; De Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; Merino,R.; Valiente,M.(1999). Modelo de Optimización economica del Manejo del agua de riego en las explotaciones agricolas:aplicación a la agricultura de regadio de la Provincia de Toledo.Centro Regional de Estudios del Agua. Instituto de Desarrollo Regional (IDR).Universidad Castilla la Mancha.Invest.Agr.:Prod.Veg.Vol.14(3).Albacete.España. 354 pp.

Ortega-Gaucin,D.; Mejía Sáenz,E.; Palacios Vélez,E.; Rendón Pimentel,L.; Exebio García,A. (2009). Modelo de optimización de recursos para un distrito de riego. TERRA Latinoamericana, Vol. 27, Núm. 3. julio-septiembre. pp 219-226.

Oluwasemire, K.O., Stigter, C.J., Owonubi, J.J., Jagtap, S.S. (2002). Seasonal water use and water productivity of millet-based cropping systems in the Nigerian Sudan savanna near Kano. *Agric. Water Manag.* 56 (3). 207–227 pp.

Panigrahi, B., Panda, S.N. (2003). Field test of a soil water balance simulation model. *Agric. Water Manag.* 58 (3). 223–240 pp.

Paoli,H. (2004). Modelo organizativo de la administración del riego mediante el uso de la informática. aplicación programa Simis (FAO) en el distrito de riego del río Toro Valle de Lerma – Salta. Trabajo Final Tesis de Especialización en Riego de Tierras Agrícolas. 62 pp.

Paredes, P. y Pereira, L.S. (2010). Water balance and irrigation scheduling simulation model The WinISAREG model. CEER-Biosystems Engineering Institute of Agronomy, Technical University of Lisbon. Lisboa. Pp 69.

Parkes, M., Bailey, R., Williams, D., Li, Y. (1995). An irrigation scheduling model combining slow mobile water changes.In: Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G.(Eds.), *Crop-Water-Simulation Models in Practice*.Wageningen Pers, Wageningen. pp. 75–103.

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

Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G. (1995). *Crop-Water Simulation Models in Practice*. Wageningen Pers, Wageningen. 339 pp.

Pereira, L.S., Teodoro, P.R., Rodrigues, P.N., Teixeira, J.L. (2003). Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.) *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht. pp. 161-180.

Peri, Graciela. (2004). La agricultura irrigada en Río Negro y su contribución al desarrollo regional. Informe Banco Mundial. 115 pp.

Playan,E. ; Cavero,J.; Mantero,I.; Salvador,R.; Lecina,S.; Faci,J.M.; Andrés,J.; Salvador,V.; Cardeña, G.; Ramón, S.; Lacuela, J.L. ; Tejero,M.; Ferri,J. ; Martínez –Cob, A. (2007). A database program for enhancing irrigation district management in the Ebro Valley (Spain). *Agricultural water management* 87. pp 209–216.

Podestá, L., & Dueñas, F. (2010). Efecto del riego deficitario sobre el control de vigor en perales. CRA-RYD-28. Mendoza. 10 pp.

Polla, G.;Horne, F.; Galeazzi, J. (1998).Programa para optimización de drenaje subterráneo. Revista Agrociencia nº 14. vol 2. Chile. ISSN 0716-1689. 19 pp.

Polla, G.; Pavese, J.; Elissalde, M. y Horne, F. (2013). Evaluación del comportamiento del acuífero del Alto Valle de Río Negro para control de heladas en un distrito de riego. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología. U.N. de la Plata. Del 17 al 20 de setiembre. La Plata. Trabajo en Actas. Tomo 1. pp 78-83.

Prajamwong, S.; Merkley, G.P. ; Allen, R.G.(1997). Decision support model for irrigation water management. J. Irrig. Drain. Eng. 123 (2). pp 106–113.

Prosap. (2015). Proyecto: modernización del sistema de riego de San Patricio del Chañar componente: fortalecimiento institucional de la dirección provincial de recursos hídricos y del consorcio de riego. Neuquén. Argentina. Informe Técnico Nro VIII-IX. 65 pp

Raes, D.; Deproost, P. (2003). Model to assess water movement from shallow water table to the root zone. Agric. Water Manag. 62 (2). pp 79–91.

Radcliffe, D.E. y Simunek, J. (2010). Soil physics with HYDRUS. Modeling and applications. CRC Press. 373 pp.

Randall, D. ; Cleland, L. ; Kuehne, C.; Link, G. and Sheer,D. (1997). Water Supply Planning Simulation Model Using Mixed-Integer Linear Programming “Engine. Journal of Water Resources Planning and Management. Vol 123. Nº2. March-April. pp 116 -124.

Reardon, E.J. (1981). K_d 's.Can they be used to describe reversible ion sorption reactions in contaminant migration?.Ground Water 19. pp 279-286.

Requena, A.; Sanchez, E.; Nolting, J. (1994). Riego, capa freática y rendimiento del Peral cv Williams's en el Alto Valle de Río Negro. Ria. 25 (2).ISSN 0325-8718. pp 1-9.

Requena, A.; Figueroa, H.; Romera, M.; Brunetti, L. (1998). Efecto de distintos programas de riego localizado sobre el crecimiento, floración y producción del manzano. Trabajo presentado en el XXI Congreso Argentino de Horticultura. Rosario. Argentina. 6 pp.

Requena, A. y Nolting J. (2006).Manejo del Riego por Superficie a nivel de predio. Boletín de Divulgación Técnica Nro 51. Centro Regional Patagonia Norte-Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle. 39 pp.

Reyen, J.; Zerihun, D. (1999). Irrigación e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. “Assessment of the performance of border and furrow irrigation systems an the relationship between performance indicators and system variables”. Agricultural Water Management. 40. pp 353-362.

Reyes Hernandez, M. (2000). Optimización simultánea de funciones de Producción: una propuesta de modelación para el caso de dos funciones sujetas a las mismas restricciones. Boletín Informativo 1-2000. Ciagros.Facultad de Agronomía.U.de San Carlos de Guatemala. 22 pp.

Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. 1 (5). pp 318-333.

Rijtema, P.E. (1969). Soil Moisture Forecasting. ICW, Winand Staring Center, Wageningen, Note 513. 18 pp.

Saavedra, F. (2000). Ensayo de riego deficitario controlado en palto (*Persea americana Mill*). cv Hass en la localidad de Quillota. Taller de Licenciatura. Ing. Agr. Quillota. Universidad Católica de Valparaíso. Facultad de Agronomía. 59 pp.

Saez, Julieta. (2003). Informe Final Taller Prácticas de Riego. Dictado por la Cátedra de Hidráulica e Hidrología Agrícola. Facultad de Cs. Agrarias. U.N. del Comahue. C. Saltos. Río Negro. Argentina. 49 pp.

Sagardoy, J.A., Hatcho, N., vanden Bulcke, M., Bellostas, J.M. (1994). SIMIS (scheme irrigation management information system): an introduction to its use and potential. *Irrigation Water Delivery Models, Water Reports 2*. FAO, Rome, Italy. pp. 49–61.

Sánchez, C.M.; Salomón, M.A.; Santos Pereira, L. (2008). Evaluación del desempeño de los sistemas de distribución de riego tradicionales mediante uso del modelo Isareg en Mendoza (Argentina). 16 pp.

Sánchez, B.M.J. y Torrecillas, A. (1995). Aspectos relacionados con la utilización de estrategias de riego deficitario controlado en cultivos leñosos. En *Riego Deficitario Controlado, Fundamentos y Aplicaciones*. Mundi Prensa. Madrid. España. pp 43-63.

Santa Olalla F.M.; López Fuster, P.; Calera Belmonte, A. (2005). Agua y Agronomía. Universidad de Castilla la Mancha. Ediciones Mundi Prensa. Barcelona. España. 605 pp.

Santos Pereira, L.; de Juan Valero, J.A.; Picornell Buendía, M.R.; Tarjuelo Martín Benito, J.M. (2010). El Riego y sus Tecnologías. ISBN 13:978-84-692-9979-1. Centro Regional de Estudios del Agua. Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete. España. 296 pp.

Satchithanatham, S.; Krahn, V.; Sri Ranjan, R.; Sager, S. (2014). Shallow groundwater uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone. *Agricultural Water Management* 132 (2014). pp 101–110.

Satlari, J.G. (2011). Infiltración y erosión: sus efectos sobre la red de canales a partir de la regulación del Río Mendoza. Trabajo Final Integrador para aplicar al título de Especialista en Riego y Drenaje. Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Mendoza. 67 pp.

Schilardi, C; Morábito, J; Vallone, R. (2009). Parámetros físicos del riego por superficie en el área de regadío de la cuenca del río Tunuyán Superior, Mendoza – Argentina. XXI Congreso Nacional del Agua, 14 al 16 de noviembre, Trelew, Chubut. 16 pp.

Schilardi, C; Morábito, J; Vallone, R. (2009). Surface irrigation performance in the upper Tunuyán River, Mendoza Argentina. VI Simposio Internacional de Riego en Frutales y Hortalizas Viña del Mar. Chile. 7 pp.

Schilardi,C; Morábito,J.A.; y Vallone, R.C. (2011). Surface Irrigation Performance in the Upper Tunuyán River Basin Mendoza, Argentina. Proc. 6th IS on Irrigation of Hort. Crops Eds.: S. Ortega-Farias and G. Selles . Acta Hort. 889, ISHS 2011. pp 513-520.

Schmid, R.; Xu, D. (1998). Soil characterization. In: Pereira, L.S., Musy, A., Liang, R.J., Hann, M. (Eds.), Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the North China Plain. ISA, Lisbon. pp 93–119.

Selle,B.; Minasny,B.; Bethune,M.; Thayalakumaran,T.; Chandra,S. (2011). Applicability of Richards' equation models to predict deep percolation under surface irrigation. Geoderma 160. pp 569–578.

Sepaskhah,A.R. y Salemi,H.R. (2004). An empirical model for prediction of conveyance efficiency for small earth canals. Technical note. Dept. of Irrigation .Shiraz University Shiraz,I.R. of Iran. pp 623-628.

Šimůnek, J. (1993). Numerical modeling of transport processes in unsaturated porous media. 264 Dissertation. Czech Academy of Sciences., Prague (in Czech).

Simůnek, J.; Suarez,D.L. and Šejna, M. (1996). The UNSATCHEM software package for simulating one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport, and multicomponent solute transport with major ion equilibrium and kinetic chemistry, Version 2.0, Research Report No. 141. U.S. Salinity Laboratory. USDA. ARS. Riverside. California. 186 pp.

Šimůnek, J., y Suarez,D.L. (1993a). Modeling of carbon dioxide transport and production in soil: 1. Model development, Water Resour. Res. 29(2). pp 487-497.

Simunek, J.; Sejna, M.;van Genuchten, M.T. (2006). The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated-media. Technical Manual.Version 1.0.PC Progress.Prague.Czech Republic. 241 pp.

Simunek, J.; Sejna, M.; Saito, H.;Sakai, M. y van Genuchten, M.Th. (2013). The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, versión 4.17. Department of Environmental Sciences. University of California Riverside. Riverside. California. USA. 308 pp.

Singh, R.V., Chauhan, H.S. (1996). Irrigation scheduling in wheat under shallow water table conditions. In: Camp, C.R., Sadler, E.J., Yoder, R.E. (Eds.), Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, ASAE International Conference, November 1996, San Antonio, TX. ASAE. St. Joseph. M. pp 103–108.

Skogerboe, G.V.; Merkley, G.P. (1996). Irrigation maintenance and operations learning process. Water Resources Publications. LLC.Highlands Ranch.Colorado. USA. 358 pp.

Smith, M.; Pereira, L.S.; Berengena, J.; Itier, B.; Goussard, J.;Ragab, R.;Tollefson, L.; Van Hoffwegen, P. (Eds.).(1996).Irrigation Scheduling: From Theory to Practice. FAO. Rome.Water Report 8. p. 384

Soylu, M.; Kucharik,C.; Loheide,S. (2014). Influence of groundwater on plant water use and productivity:Development of an integrated ecosystem – Variably saturated soil water flow model *Agricultural and Forest Meteorology* 189–190. pp 198–210.

Steduto,P.;Hsiao,T.; Fereres,E. y Raes,D. (2012). FAO66. Estudio Fao:Riego y Drenaje Respuesta del Rendimiento de los cultivos al agua. ISSN 0254-5284.Roma. 511 pp.

Stegman, E. C., Musick, J. T., & Stewart, J. I. (1980). Irrigation water management. *Irrigation water management*. pp 763-816.

Storti M. (2008). Tesis de grado: Determinación de Parámetros hidrofísicos-químicos de los suelos relacionados con los procesos de degradación salina y drenaje restringido. Escuela Superior de Salud y Ambiente; Universidad Nacional del Comahue (UNCo), Neuquén.Argentina. 110 pp.

Suryavanshi, A.R.; Reddy, J.M. (1986). Optimal operation schedule of irrigation distribution systems *Agric. Water Manage.* 11 (1). pp 23–30.

Swennenhuis, J. (2009). Programa CROPWAT 8.0 .Water Resources Development and Management Service of FAO. Rome, Italy. http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

Tarjuelo Martin Benito, J. (2005). El riego por asperión y su Tecnología. Universidad de Castilla la Mancha.Ediciones Mundi Prensa. Barcelona. España. 581 pp.

Tassara, M.A. y Charles, M. (1984). Riesgo de daños heladas primaverales em manzanos, perales y durazneros em el Alto Valle de Río Negro. *Investigación Agropecuaria*. Ediciones INTA Nro 12. Gral Roca. 13 pp.

Tassara, M. (2005). Defensa contra heladas. *Fruticultura y Diversificación*. Vol 45. pp 20-24.

Tassara, M.A.(2007). Las heladas primaverales –Protección en frutales de clima templado-frío. Ediciones INTA. ISBN 978-987-521-273-2. Gral Roca. 164 pp.

Teixeira, J.L.; Pereira, L.S. (1992). ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bull.* 41 (2). pp 29–48.

Teixeira, J.L.; Fernando, R.M.; Pereira, L.S. (1995). Irrigation scheduling alternatives for limited water supply and drought. *ICID J.* 44 (2). pp 73–88.

Thorne, D.W. and Peterson, H.B. (1950). *Irrigated soils*. The Blakiston. Company. Philadelphia and Toronto. 288 pp.

Titouna,D.; Bougoul,S. (2013). Resolution of the Richards equation for the water transport in a growing substrate. *TerraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment*. Energy Procedia 36. pp 915 – 922.

Todorovic,M.; Steduto,P.(2003). A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth* 28. pp 163-174

Torrealba Almarza,A.(2008). Aplicación de un modelo numérico para estimar curvas de evaporación a partir de información de granulometría básica. Tesis para optar al grado de

Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería. Chile. 111 pp.

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

Valocchi, A.J. (1984). Describing the transport of ion exchanging contaminants using an effective K_d approach. *Water Resour. Res.* 20. pp 499-503.

Van Aelst, P.V., Ragab, R.A., Feyen, J. y Raes, D. (1988). Improving irrigation management by modelling the irrigation schedule. *Agric. Water Manage.* 13. pp 113-125

Vanclooster, M., Viaene, P., Diels, J., Christiansen, K. (1994) .WAVE, a deterministic model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. *Inst.Land and Water Management, K.U. Leuven.* 154 pp.

van Dam, J. C.; Huygen, J.; Wesseling, J.G.; Feddes, R. A.; Kabat, P.; van Walsum, P. E. V.; Groenendijk, P., and van Diepen, C. A. (1997). Theory of SWAP version 2.0. Report 71. Dept. of Water Resour., Wageningen Agricultural University. Wageningen. the Netherlands. 167 pp.

Van der Molen, W.H. (1983). Salt balance and leaching requirement, in *Drainage Principles and Applications: II Theories of field drainage and watershed runoff.*, International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI). The Netherlands. Publication 16, Vol. II. pp 59-100

van Genuchten, M.Th. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44. pp 892–898.

van Genuchten, M. Th. y Nielsen, D. R. (1985). On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae.* 3. pp 615-628.

van Genuchten, M. Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report No 121. U.S. Salinity laboratory. USDA. ARS. Riverside. California. 61pp.

van Genuchten, M.Th.; Leij, F.J.; Yates, S.R. (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. U.S. Salinity Laboratory, U.S.Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Riverside, California, USA. 93 pp.

Villavicencio, A.; Asumí, J.L. y Holzapfel, E. (2011). Planificación de recursos hídricos en zonas de secano usando un modelo de optimización no lineal. *Obras y Proyectos* no.10 Concepción. pp 73-80

Vogel, T. and Císlerová, M. (1988). On the reliability of unsaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve, *Transport in Porous Media.* 3. pp 1-15.

Wang, J.; Huang, G.; Zhan, H.; Mohanty, B.; Zheng, J.; Huang, Q.; Xu, X. (2014). Evaluation of soil water dynamics and crop yield under furrow irrigation with a two-dimensional flow and crop growth coupled model. *Agricultural Water Management* 141. pp 10–22.

Walker, W. and Skogerboe, G. (1987). *Surface Irrigation Theory and Practice.* Utah State University, Prentice – Hall. 386 pp.

Walker, W.R., Prajamwong, S., Allen, R.G., Merkley, G.P. (1995). USU command area decision support model–CADSM. In: Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G. (Eds.), *Crop-Water-Simulation Models in Practice*. Wageningen. Pers, Wageningen. pp. 231–271.

Walker, R. (2003). Simulación, diseño y evaluación de riego por superficie. Guía del curso y documentación técnica. Utah State University. Logan, Utah, USA. 63 pp.

Wesseling, J. y Van Wijk, W.R. (1955). Optimal depth of drainage. *Neth.J.Agr. Sci.* 3. pp 106-119.

Willardson, L.S.; Allen, R.G.; Frederiksen, H. (1994) Eliminating irrigation efficiencies. In: USCID 13th technical conference. Denver. CO. 15 pp.

Zairi, A.; El Amami, H.; Slatni, A.; Pereira, L.S.; Rodrigues, P.N., Machado, T. (2003). Coping with drought: deficit irrigation strategies for cereals and field horticultural crops in Central Tunisia. In: Rossi, G., Cancelliere, A., Pereira, L.S., Oweis, T., Shatanawi, M., Zairi, A. (Eds.), *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer. Dordrecht. pp 181–201.

Zimmermann, E. (1998). Esquema explícito para la resolución de la ecuación de Richards. In XVII Congreso Nacional del Agua. pp 258-266.

ANEXO 1- RELEVAMIENTO DE DATOS

Comparación de los modelos de Balance Hídrico y Modelo dinámico para un mismo sitio de análisis:

Sitio 1

El período simulado, luego de la calibración de los parámetros se extendió del 1 de octubre del 2011 al 30 de marzo del 2012, constituyendo 182 días.

Tabla 1: Mediciones de humedad a 40 y 60 cm - sitio 1.

Fecha de Muestreo	Humedad		Humedad		Prof. Capa freatica (m)
	40 cm		60 cm		
	% Peso	% Volumen	% Peso	% Volumen	
11/10/2011	21.7	31.1	22.7	34.1	1.02
31/10/2011	15.5	22.2	17.4	26.1	0.93
04/11/2011	21.6	30.9	22.7	34.1	1.06
10/11/2011	16.1	23.0	22.1	33.2	1.26
17/11/2011	15.3	21.9	20.6	30.8	1.00
24/11/2011	16.8	24.1	20.5	30.7	1.17
02/12/2011	19.7	28.2	23.0	34.6	0.97
08/12/2011	17.4	24.8	21.5	32.3	1.10
14/12/2011	13.8	19.8	18.3	27.5	1.17
22/12/2011	17.5	25.0	22.2	33.2	0.94
28/12/2011	16.3	23.3	21.9	32.9	1.18
05/01/2012	16.1	23.0	22.0	33.0	1.20
11/01/2012	16.0	22.8	22.0	33.0	0.73
18/01/2012	18.8	26.9	22.5	33.8	0.94
25/01/2012	19.2	27.4	22.0	33.0	0.98
01/02/2012	15.5	22.2	22.0	33.0	1.02
09/02/2012	12.6	18.0	21.5	32.3	1.21
14/02/2012	13.4	19.2	21.2	31.8	1.30
22/02/2012	14.0	20.0	22.2	33.3	1.29
01/03/2012	13.7	19.5	22.1	33.1	1.38
06/03/2012	13.8	19.7	21.5	32.2	1.32
15/03/2012	16.0	22.9	20.3	30.5	1.30
23/03/2012	18.6	26.6	22.4	33.5	1.21
29/03/2012	18.0	25.8	22.1	33.1	1.25

Tabla 2: Características físicas del suelo- sitio 1

Características físicas del suelo

Profundidad (cm)	40	60
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	13.1	13.7
Capacidad de campo (CC)	32.9	34.2
Densidad Aparente (dap)	1.43	1.5
Materia Orgánica	1.6	0.4

Tabla 3: Coeficientes de cultivo - sitio 1

Coeficientes de cultivo promedio decadiarios

Kc	1ero	2do	3ero
S	0.3	0.3	0.3
O	0.7	0.7	0.8
N	1.5	1.5	1.6
D	1.3	1.24	1.24
E	1.24	1.24	1.24
F	1.24	1.24	1.24
M	1.5	1.24	1.24
A	1.24	1.1	0.95

Las características edafológicas definidas consistieron en un perfil de suelo de 150 cm constituido por 3 estratos según la tabla 4.

Tabla 4: Características del perfil del suelo - sitio 1.

Tipo de suelo		
0-30 cm	30-60 cm	60-150 cm
Franco-limoso	Franco	Franco
Porcentaje de materiales		
21.7 % arcilla	19.4 % arcilla	14.6 % arcilla
50 % limo	43.8 % limo	46.2 % limo
28.3 % arena	36.8 % arena	39.2 % arena

Identificar situaciones que cumplan condiciones de sustentabilidad del sistema para los suelos más representativos del Distrito.

Sitio 2

El período simulado, luego de la calibración de los parámetros, se extendió del 12 de setiembre al 2013 al 28 de febrero del 2014, constituyendo 170 días.

Tabla 5: Curva de retención - sitio 2

Curva de Retención			
Succión Matriz (kPa)	0-30 (g%g) Franco	30-60 (g%g) Franco arenoso	90-100+ (g%g) Franco arenoso
10	39.6	31.4	28.3
30	27.7	20.4	18.4
100	19.2	15.3	14.1
200	16.6	13.2	11.8
500	13.7	10.6	9.5
1500	10.7	7.7	6.6

Tabla 6: Valores propuestos por Feddes para frutales de hojas caedizas - sitio 2.

Valores de Feddes para Frutales de hojas caedizas	Tensión (cm)
Presión mínima a partir de la cual la planta toma agua (Po):	-10
Presión por debajo de la cual la planta extrae agua a la máxima velocidad posible (POpt):	-25
Presión por debajo de la cual la planta no puede extra el agua a la máxima velocidad posible (P2H):	-500
Igual al caso anterior pero para una tasa de transpiración potencial (P2L):	-800
Presión a partir de la cual no se extrae más agua (P3):	-16000

Tabla 7: Valores de humedad registradas en los sensores - sitio 2

Valores registrados en los sensores

Fecha	WM1(Vol.)	WM2(Vol.)
03 10 13	0.342	0.363
10 10 13	0.350	0.386
17 10 13	0.348	0.372
24 10 13	0.341	0.375
31 10 13	0.33	0.361
06 11 13	0.332	0.35
12 11 13	0.342	0.37
20 11 13	0.343	0.37

28 11 13	0.330	0.365
05 12 13	0.343	0.38
13 12 13	0.345	0.36
16 12 13	0.33	0.363
23 12 13	0.334	0.366
28 12 13	0.347	0.359
09 01 14	0.337	0.342
03 02 14	0.3400	0.334
10 02 14	0.343	0.359
14 02 14	0.337	0.352

Sitio 3

El período simulado, luego de la calibración de los parámetros se extendió del 23 de setiembre del 2014 al 31 de marzo del 2015, constituyendo 190 días de datos.

Tabla 8: Curva de retención-sitio 3

Curva de retención Succión Matriz (kPa)	0-30 (g%g)	30-60 (g%g)
	Franco limoso	Franco arenoso
10	43.4	36.1
30	31.9	22.1
100	24.2	15.1
200	23.5	14.4
500	18	12.2
1500	15.2	9.4

Tabla 9: Características edáficas del perfil-sitio 3

Características físicas del suelo a distintas profundidades		
Profundidad (cm)	0-30	30-60
Textura	Franco limoso	Franco arenoso
Punto de Marchitez Permanente (PMP) (g%g)	15.2	9.4
Capacidad de campo (CC) (g%g)	31.9	22.1
Densidad Aparente (dap)	1.42	1.5
Materia Orgánica (%)	2.2	0.5

ANEXO 2- CURVAS AJUSTE DE SENSORES

CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES PREVIO A SU INSTALACIÓN EN LOS SITIOS 2 Y 3.

Implementar un modelo de simulación requiere de la obtención de un conjunto de datos que se utilizarán para ajustar el modelo.

Para poder desarrollar dicho objetivo, se deben calibrar los sensores que monitorearán la variable humedad de suelo a campo, durante todo el período de análisis.

Para realizar la calibración de los sensores se colocaron en una maceta, con un orificio en su parte inferior, 4 sensores Watermark y 2 sensores de humedad de suelo de la estación meteorológica, posteriormente a la instalación de los sensores, se regó hasta alcanzar la saturación.

A las 24-48 hs, cuando se alcanzó un contenido de humedad correspondiente a capacidad de campo, se pesó la misma y se midieron los sensores respectivos. Este procedimiento se realizó durante 45 días de manera de lograr una curva que se desarrolle entre capacidad de campo y punto de marchitez permanente (Tabla 2).

Tabla 1: Datos obtenidos de los sensores Watermark

Fecha	WM1 (kPa)	WM2 (kPa)	WM3 (kPa)	WM4 (kPa)	Peso (g)	Φ
22/11/2012	0	0	0	0	2671	1.000
23/11/2012	5	6	7	10	2635	0.951
27/11/2012	20	21	19	20	2538	0.819
28/11/2012	21	22	20	21	2508	0.778
29/11/2012	23	24	22	23	2480	0.739
30/11/2012	26	28	25	25	2454	0.704
03/12/2012	34	37	31	33	2389	0.615
04/12/2012	40	46	35	38	2359	0.574
06/12/2012	56	67	49	53	2312	0.510
07/12/2012	64	75	55	61	2293	0.484
07/12/2012	62	74	53	58	2285	0.473
10/12/2012	88	96	71	77	2219	0.383
11/12/2012	98	104	80	84	2194	0.349
12/12/2012	103	107	85	86	2171	0.318
13/12/2012	109	113	90	90	2154	0.295
14/12/2012	111	117	93	92	2138	0.273
17/12/2012	134	151	115	116	2097	0.217
18/12/2012	139	165	122	127	2087	0.203
19/12/2012	144	183	130	141	2074	0.186
20/12/2012	157	199	143	165	2065	0.173
06/02/2013	199	199	199	199	1938	0.000

Se consideraron los puntos de $W_{Mi} = 199$ y $\text{Peso} = 1938$ gramos como el punto de marchitez permanente (PMP) y $W_{Mi} = 0$ y $\text{Peso} = 2671$ gramos, como de capacidad de campo (CC), el valor de la humedad relativa ϕ se calculó como (Ecuación 52):

$$\phi = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso del agua mas suelo}}$$

Cabe aclarar el valor del sensor de 199, tomado como PMP es una aproximación que tiene como objetivo facilitar el calculo ya que en la realidad el suelo aun posee agua retenida.

La misma metodología se utilizó para la determinación de la humedad relativa de los sensores de la estación (Tabla 2).

Tabla 2: Datos Sensores de humedad estación meteorológica.

H1 (mV)	H2 (mV)	Peso (g)	Φ
860	814	2671	1.000
744	770	2635	0.951
508	481	2538	0.819
498	458	2508	0.778
479	434	2480	0.739
462	406	2454	0.704
436	344	2389	0.615
418	305	2359	0.574
324	251	2312	0.510
297	233	2293	0.484
296	231	2285	0.473
216	172	2219	0.383
195	155	2194	0.349
188	151	2171	0.318
183	148	2154	0.295
181	146	2138	0.273
171	138	2097	0.217
168	136	2087	0.203
167	136	2074	0.186
166	134	2065	0.173

Para obtener los datos de humedad a lo largo del período analizado, se ajustaron curvas exponenciales para los 6 sensores, graficando W_{Mi} versus Φ y H_i versus Φ .

Conociendo la curva de cada sensor se pudo determinar en cada caso el valor de humedad correspondiente, en cada punto de ubicación del mismo.

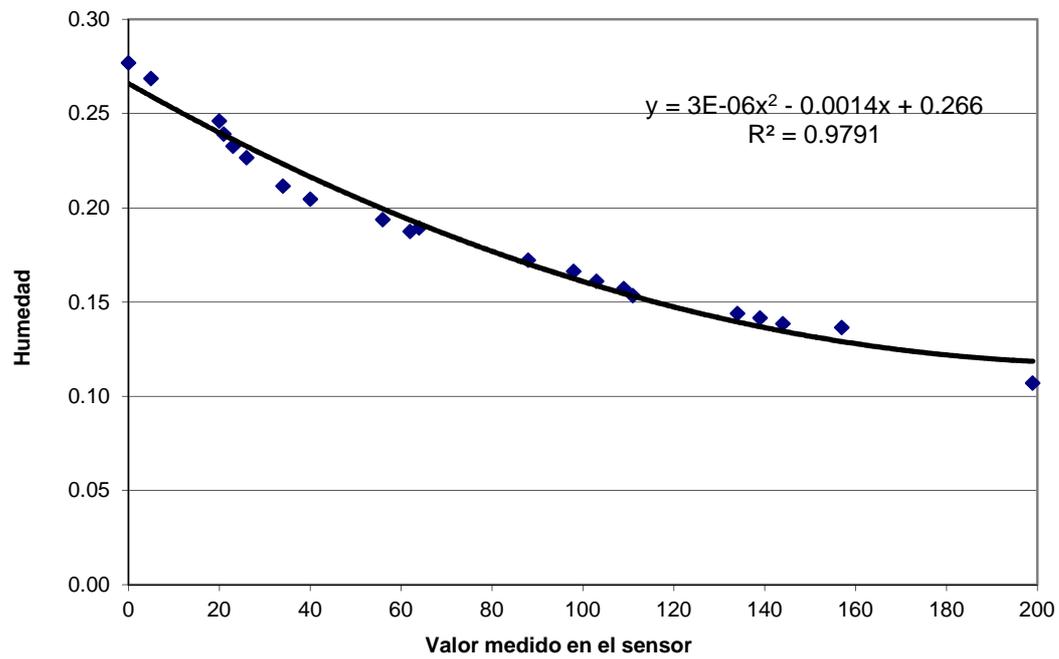


Figura 1: Curva de calibración Watermark 1

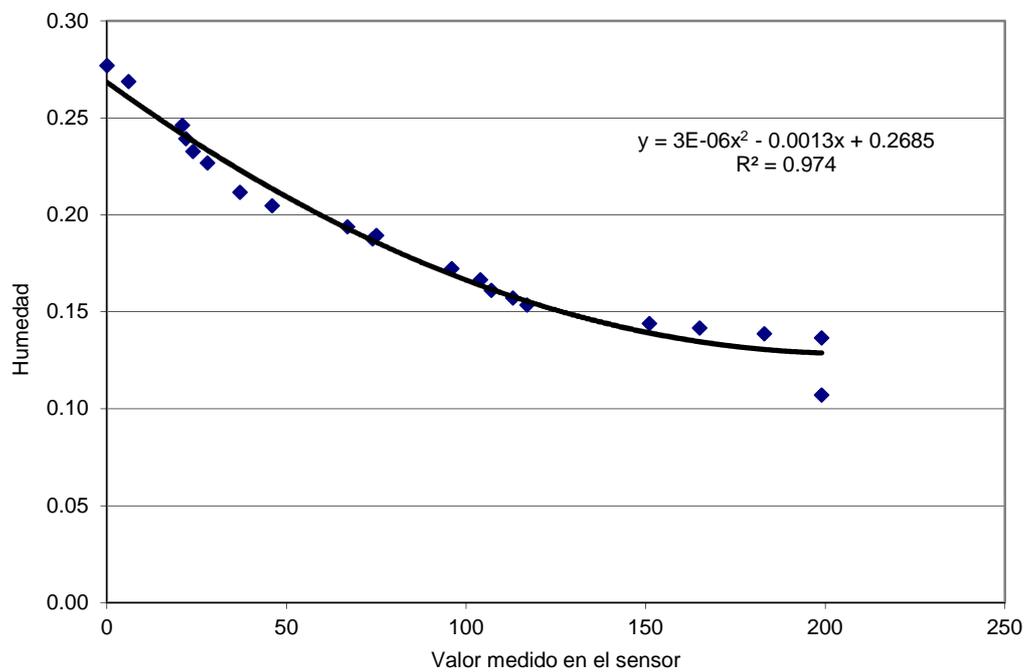


Figura 2: Curva de calibración Watermark 2

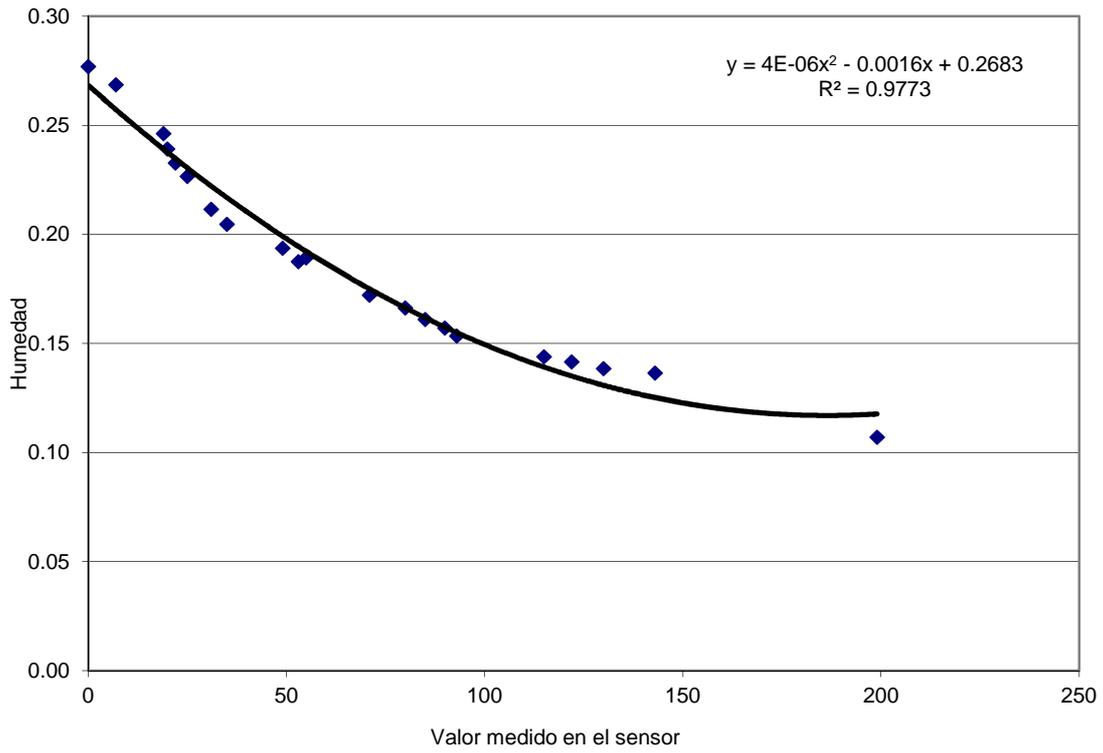


Figura 3: Curva de calibración Watermark 3

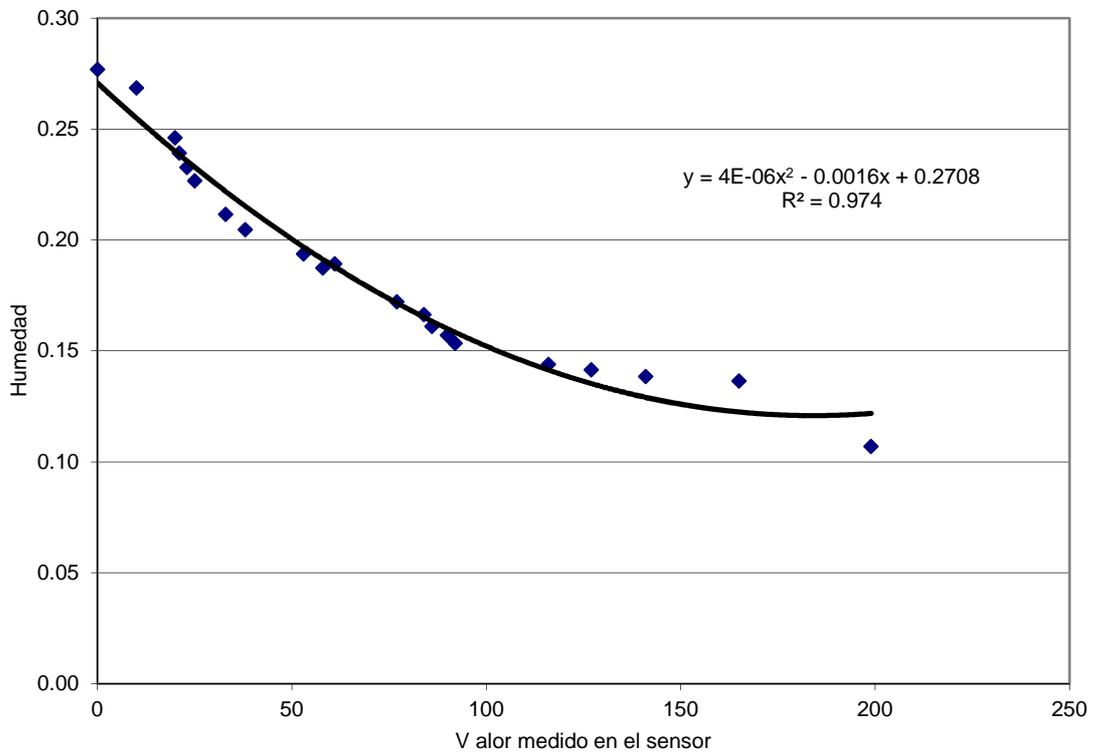


Figura 4: Curva de calibración Watermark 4

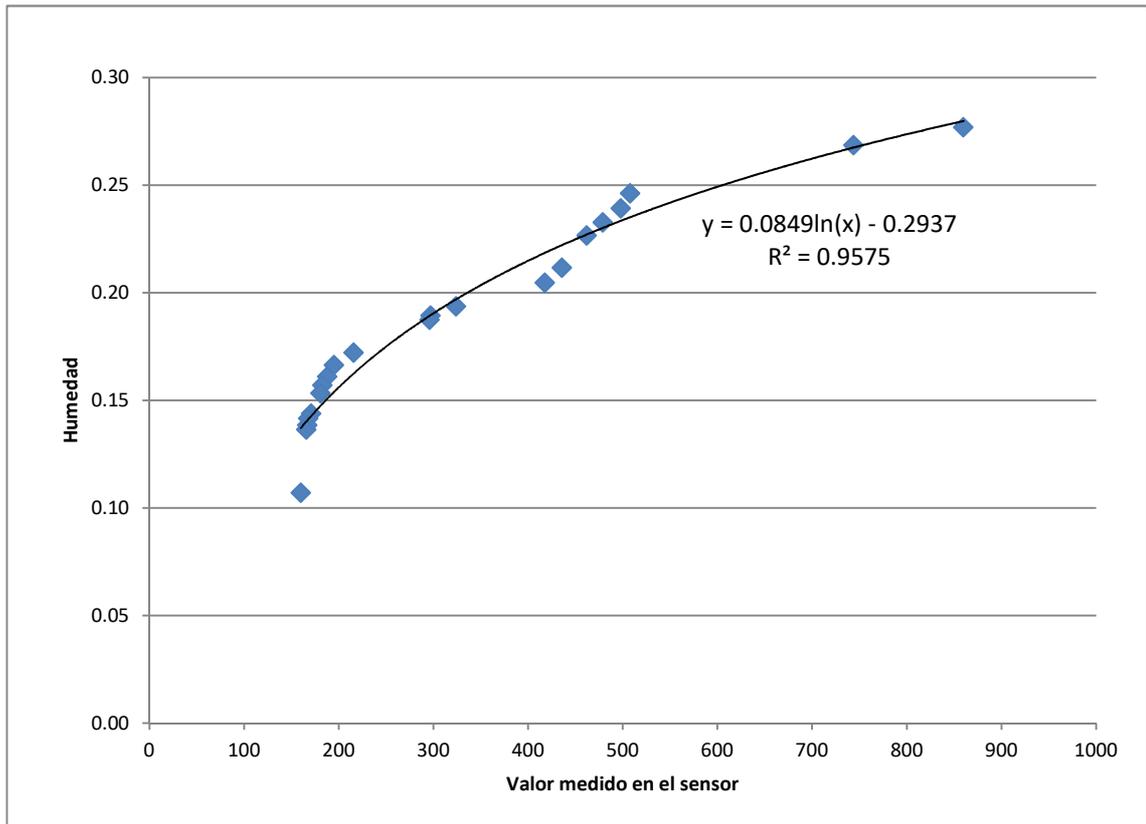


Figura 5: Curva de calibración Sensor estación 1

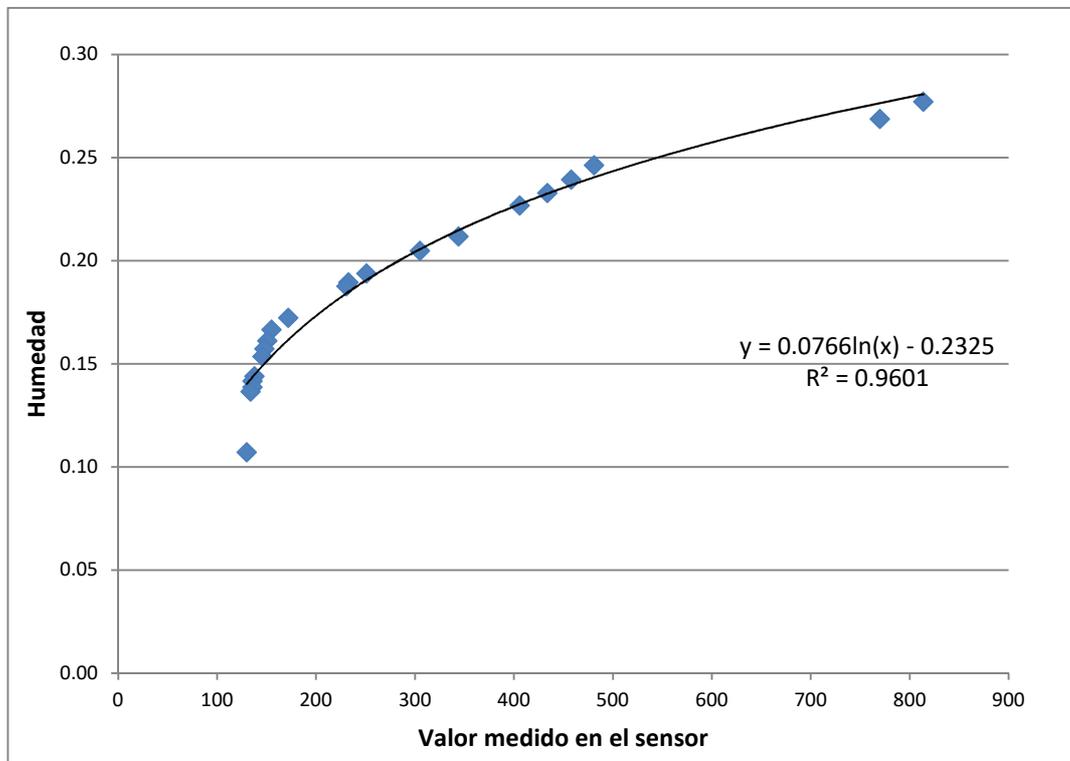


Figura 6: Curva de calibración Sensor estación 2

ANEXO 3- PLANILLAS Y GRAFICOS ADOR

RED DE RIEGO DISTRITO DE CIPOLLETTI

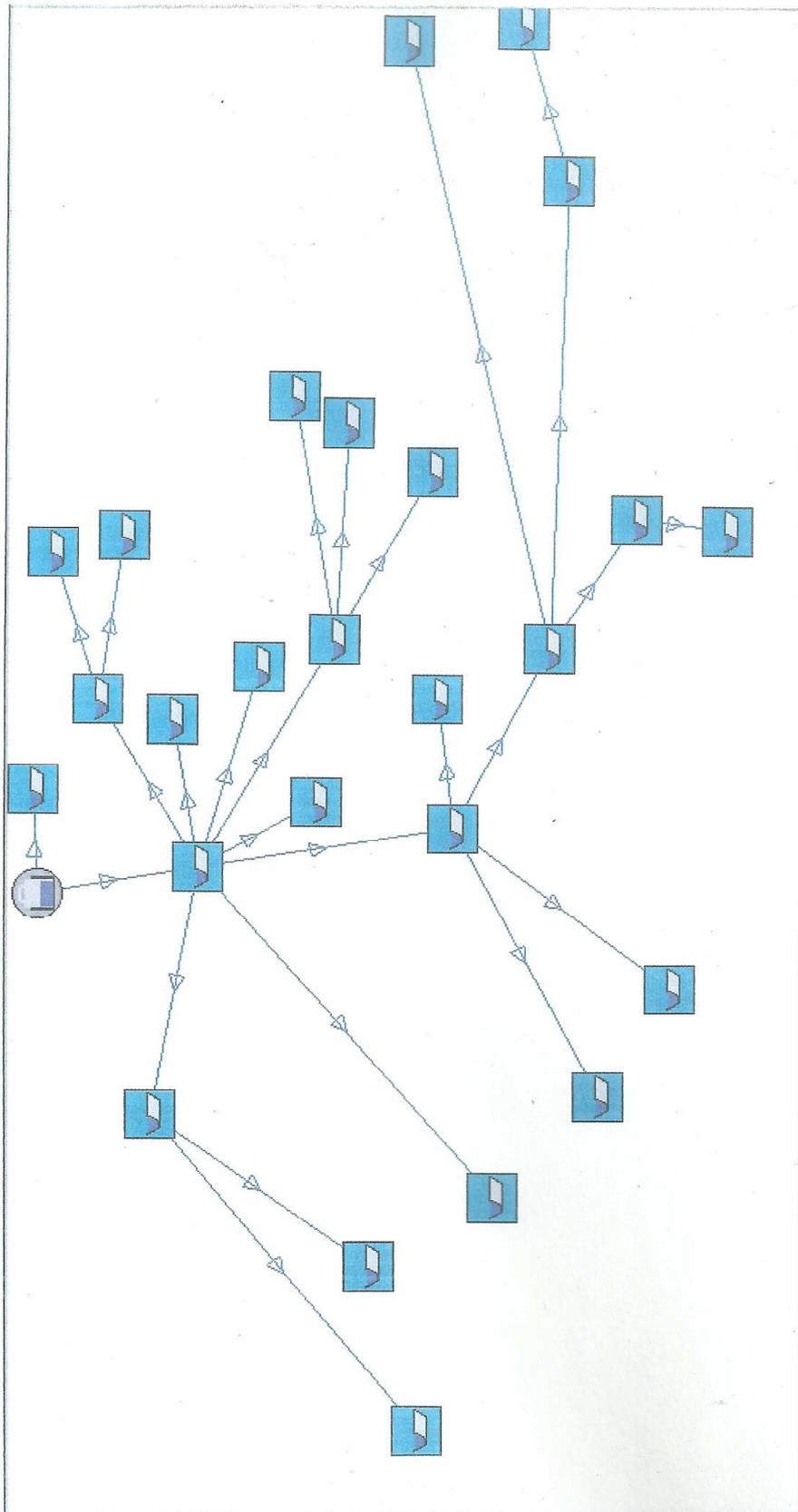


Figura 1: Esquema de la red de riego del Distrito de Cipolletti.

Criterios empleados para la realización de este listado de usuarios, usos y parcelas

Listado de todas las parcelas de propietarios

Listado de parajes parcelas y usos

Comunidad Cipolletti

Paraje	Nº de parcelas según uso: 1445		Sup. Uso: 8.461,4567 h				
1 Cipolletti	Codigo Municipio	Usuario	Poligono	Parcela	Subp.	Sup. Cat (ha)	Sup. Uso(ha)
Usos:		0,0000 ha					
12345	cipolletti	COOP. VIVIENDAS 10 DE MARZO ,	663	30553	3627	0,0000	
Usos: Agrícola		8.461,4567 ha					
<no asignado>		5.958,6719					
12345	cipolletti	ACCASTELLO PABLO VICTORIO ,	492	31276	1101	19,7162	19,7162
12345	cipolletti	BELLINO JOSE ,	909	30799	1720	11,4555	11,4555
12345	cipolletti	ELCAM S.A. ,	331	30221	1280	3,0000	3,0000
12345	cipolletti	FISCO DE LA PROVINCIA .	517	31301	1614	0,1460	0,1460
12345	cipolletti	GONZALEZ FRANCISCO ,	488	31272	1210	4,4606	4,4606
12345	cipolletti	GUTIERREZ ALFREDO ,	564	31348	1350	8,1921	8,1921
12345	cipolletti	MANNOZZI Y SALAZAR ,	265	30155	1370	6,0840	6,0840
12345	cipolletti	MARTINEZ JOSE ANTONIO ,	366	31150	1540	9,0402	9,0402
12345	cipolletti	TOSCHI S.A.A.I.Y C. ,	419	31203	1363	8,8047	8,8047
12345	cipolletti	U.N.T.E.R. ,	787	30677	1986	3,5250	3,5250
12345	cipolletti	"DOÑA ANTONIA SOCIEDAD ANONIMA" . ,	687	30577	1310	0,3985	0,3985
12345	cipolletti	(GUEKGUEZIAN CAMPILAY MARIO CARLOS ,	549	31333	1430	12,9353	12,9353
12345	cipolletti	(I.P.P.V. ,	587	30477	1611	2,2419	2,2419
12345	cipolletti	ABORES DEL SUD S.R.L. ,	562	31346	1301	331,5709	331,5709
12345	cipolletti	ACUDA NOEMI ALEJANDRA ,	598	30488	1725	1,0000	1,0000
12345	cipolletti	ADORO JOSE ALFREDO ,	164	30054	1720	5,1650	5,1650
12345	cipolletti	AGROACCION S.A. . ,	160	30050	1940	9,6530	9,6530
12345	cipolletti	AGUIRRE WALTER FERNANDO	263	30153	1430	8,0000	8,0000
12345	cipolletti	ALANIS Y GARCIA NELIDA MARIA ,	720	30610	1981	3,6397	3,6397
12345	cipolletti	ALANIS Y GARCIA NELIDA MARIA ,	842	30732	1811	5,0978	5,0978
12345	cipolletti	ALANIS Y GARCIA VICTOR JUAN ,	795	30685	1873	6,1489	6,1489
12345	cipolletti	ALBANESI JOSE LUIS ,	613	30503	1573	10,2356	10,2356
12345	cipolletti	ALBANESI JOSE LUIS ,	612	30502	1572	0,8684	0,8684
12345	cipolletti	ALBANESI JOSE LUIS ,	609	30499	1574	0,9316	0,9316
12345	cipolletti	ALBERONI ANDREA LORENA ,	682	30572	1506	0,2526	0,2526
12345	cipolletti	ALDANA OSCAR ,	983	30873	1630	5,5004	5,5004
12345	cipolletti	ALEGRE CARLOS ,	187	30971	1790	3,0014	3,0014
12345	cipolletti	ALEGRE FRANCISCO ,	182	30966	1611	3,6709	3,6709
12345	cipolletti	ALEGRE MIGUEL ANGEL ,	153	30937	1780	3,0202	3,0202

Figura 2: Listado de paraje, parcelas y usos.

Listado Global Consumos por Unidad

Consumos entre Fecha 01/09/2014 y 31/03/2015 Comunidad Cipolletti

Unidad	Superficie (ha)	Riegos	m3/ha.Riego	m3/ha	Consumo (m3)
II 1	160,302	16,4	101,39	1662,81	266552
II 1 A	627,0213	14,34	70,59	1012,19	634663
II 2 C	188,6692	21,16	214,24	4533,22	855279
II 2 D	62,7512	16,73	81,25	1359,29	85297
II 4	983,6877	1,58	65,93	104,17	102471
II 5	881,8414	4,44	198,56	881,6	777432
II 5 E	82,9753	7,88	55,2	435	36094
II 6	262,974	11,26	99,81	1123,84	295541
II 6 H	90,5989	11,77	99,88	1175,57	106505
II 6 K	357,7344	19,12	75,46	1442,73	516114
II 6 L	185,1863	25,33	66,13	1674,97	310181
II 6 M	272,0939	11,84	64,17	759,78	206732
II 6 N	235,6172	5,78	34,94	201,95	47582
II 6 O	168,672	8,42	93,69	788,87	133061
II 6 P	40,1117	17,5	87,69	1534,56	61554
II 7	117,1661	19,12	83,83	1602,86	187801
Total	4717,4026	10,02	97,8	979,96	4622859

Cultivo	<no asignado>	Superficie Total (ha)	5.958,6719
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			5.958,6719
Cultivo	Alfalfa	Superficie Total (ha)	147,6608
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			147,6608
Cultivo	almendro	Superficie Total (ha)	10,2360
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			10,2360
Cultivo	apio	Superficie Total (ha)	2,6893
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			2,6893
Cultivo	cereza	Superficie Total (ha)	8,2393
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			8,2393
Cultivo	ciruela	Superficie Total (ha)	19,6972
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			19,6972
Cultivo	Hortalizas	Superficie Total (ha)	7,9364
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			7,9364
Cultivo	Manzano	Superficie Total (ha)	881,9474
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			881,9474
Cultivo	Pelones	Superficie Total (ha)	2,5000
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			2,5000
Cultivo	Peral	Superficie Total (ha)	1.397,8468
Paraje		Superficie (ha)	
Cipolletti			1.397,8468
Cultivo	Vid	Superficie Total (ha)	24,0316
Paraje		Superficie (ha)	

Figura 4: Listado por cultivo y superficie asignada a cada uno.

Listado Peticiones sin Conceder

Pagador Agua	Unidad Gestión	Fecha Pet	Inicio Uso	H Inicio	Fin Uso	H Fin	m ³ /24h	Us	Consumo
DIAZ NESTOR JULIO ,	II 6 K	09/11/2015	02/08/2015	00:00	03/08/2015	00:00	259	3	259
GUTIERREZ ALFREDO ,	II 1	06/11/2015	01/09/2015	00:00	02/09/2015	00:00	769	8.9	769
MANNOZZI Y SALAZAR ,	II 6 K	09/11/2015	04/08/2015	00:00	05/08/2015	00:00	525	6.08	525
ADORO JOSE ALFREDO ,	II 6 M	02/11/2015	04/09/2015	00:00	05/09/2015	00:00	449	5.2	449
ALESSANDRINI NESTOR NILDIO ,	II 2 C	09/11/2015	04/09/2015	00:00	05/09/2015	00:00	436	5.05	436
ALESSI ALESSANDRO CLAUDIO ,	II 6 L	02/11/2015	06/09/2015	00:00	07/09/2015	00:00	1212	14.03	1212
ALVAREZ MIGUEL ,	II 2 D	09/11/2015	06/09/2015	00:00	07/09/2015	00:00	414	4.79	414
ALLIONE JOSE LUIS ,	II 1 A	09/11/2015	02/09/2015	00:00	03/09/2015	00:00	808	9.35	808
AMAOLÓ Y STORTINI EDIT ,	II 3	08/11/2015	02/09/2015	00:00	03/09/2015	00:00	848	9.82	848
AMORUSO INMACULADA ,	II 6 P	22/03/2015	03/09/2014	06:00	04/09/2014	06:00	406	4.7	406
AMORUSO INMACULADA ,	II 6 P	22/03/2015	03/09/2014	06:00	04/09/2014	06:00	441	5.1	441
AMORUSO MIGUEL FELIX ,	II 6 P	22/03/2015	03/09/2014	06:00	05/09/2014	06:00	406	4.7	812
ANTONINO Y LOPEZ MARIA ,	II 6 L	06/11/2015	04/09/2015	00:00	05/09/2015	00:00	570	6.6	570
ANTONINO Y LOPEZ NICOLAS ,	II 6	09/11/2015	05/09/2015	00:00	06/09/2015	00:00	447	5.17	447
ARGENBRAS S.A. ,	II 6 L	02/11/2015	01/09/2015	00:00	02/09/2015	00:00	1344	15.56	1344
ARIAS EVELYN NANCY ,	II 6 K	09/11/2015	05/08/2015	00:00	06/08/2015	00:00	723	8.37	723
ARTERO OSCAR ANTONIO ,	II 6 K	09/11/2015	08/08/2015	00:00	09/08/2015	00:00	1071	12.4	1071
ARUANO NORMA GRACIELA ,	II 6 M	02/11/2015	01/09/2015	00:00	02/09/2015	00:00	829	9.5	829
ARUANO Y OTROS CARLOS ALBERTO ,	II 3	06/11/2015	03/09/2015	00:00	04/09/2015	00:00	334	3.86	334

Figura 5: Listado de peticiones por propietario en el momento del riego.

Gráfico de Superficies Regables

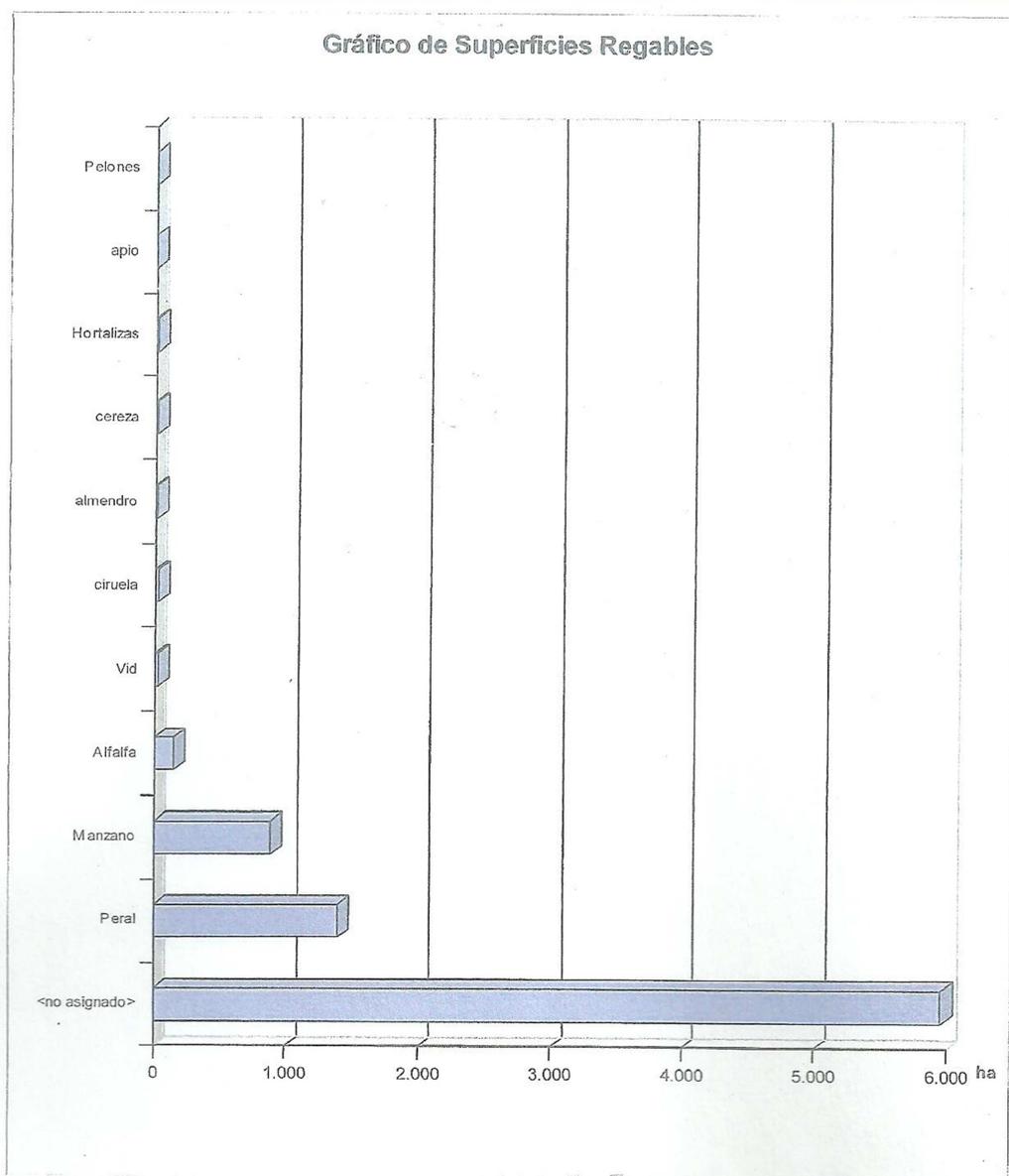


Figura 6: Gráfico de barra de superficie regable por cultivo.

Gráfico de Superficies Regables

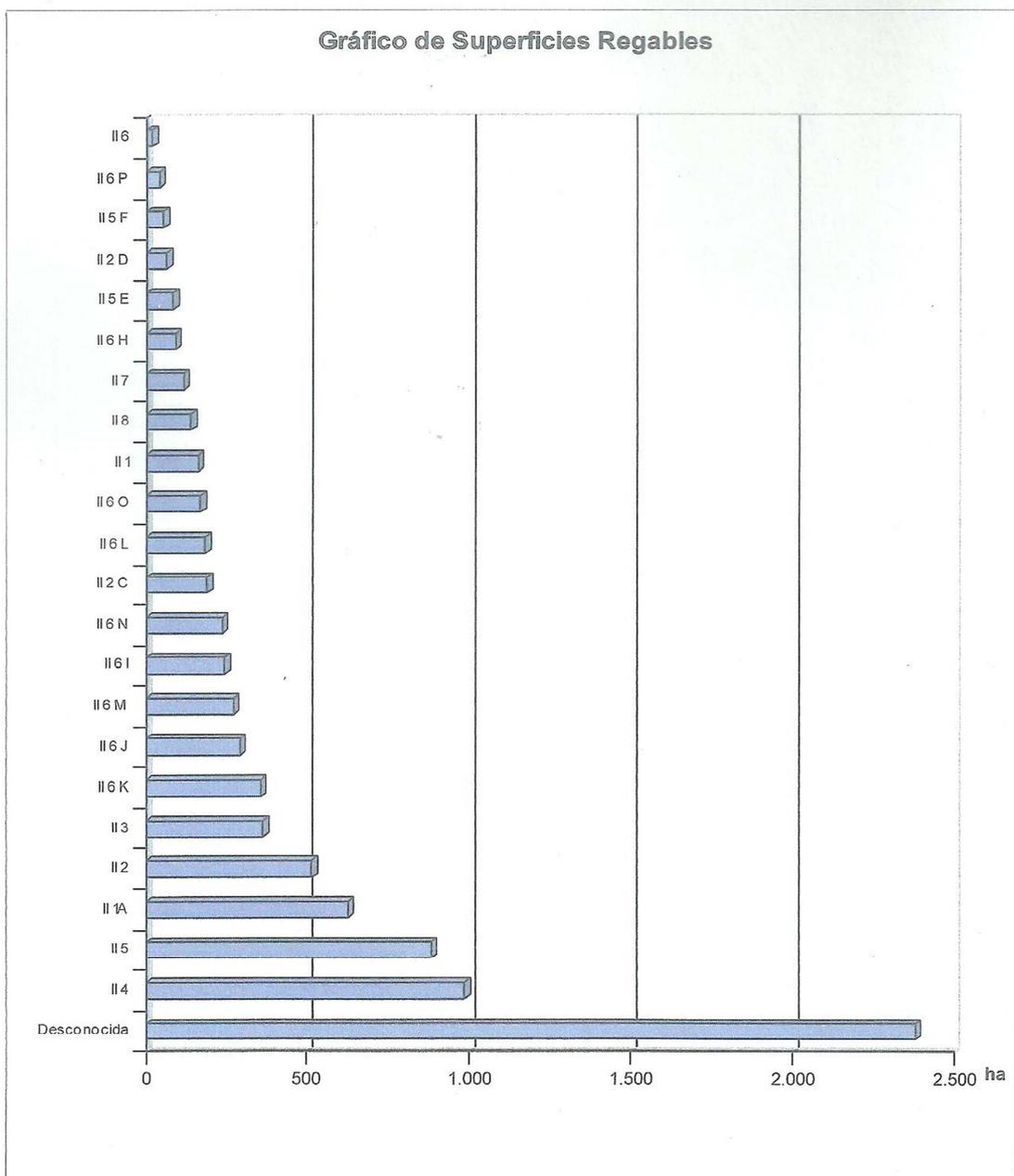


Figura 7: Gráfico de barra de superficie regable por hidrante.

Gráfico de Superficies Regables

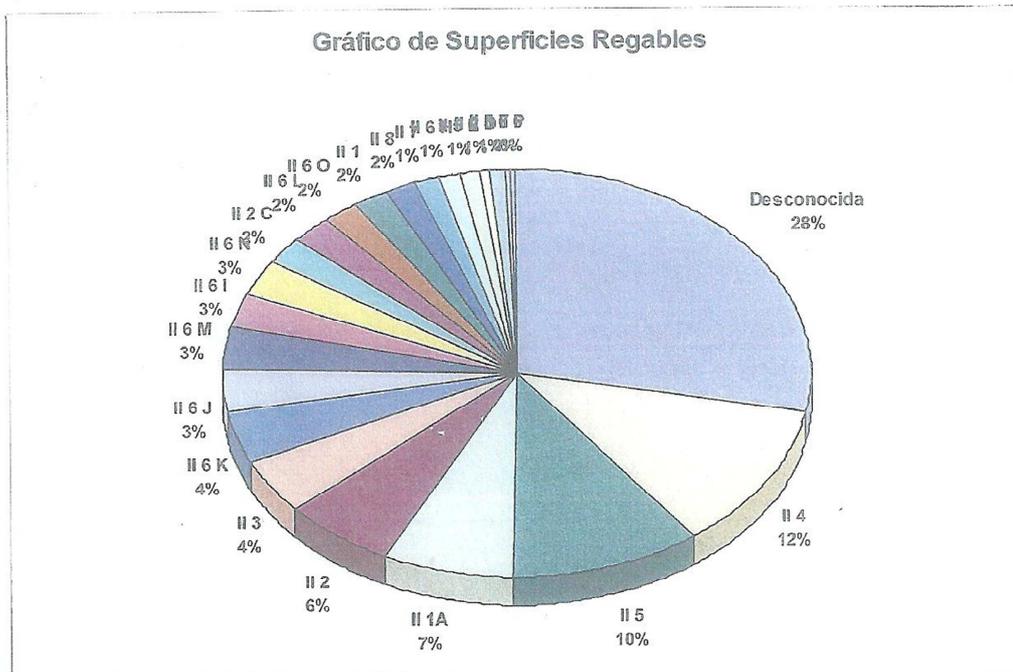


Figura 8: Gráfico de torta de superficie regable por hidrante.