



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

**CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DE CULTIVOS SEGÚN LA
CANTIDAD DE AGUA EMPLEADA, A PARTIR DE
MODELOS DE SIMULACIÓN NUMÉRICA.
(APLICACIÓN PRÁCTICA A UN PROYECTO DE RIEGO
EN URUGUAY)**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

NICOLÁS GUSTAVO CANAVESE JARDAS

TUTOR:

DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ

Ciudad Universitaria, CD. MX. ABRIL 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Dominguez Mora Ramón

Secretario: Dr. Fuentes Mariles Oscar Arturo

Vocal: Dr. Gracia Sánchez Jesús

1er. Suplente: Dr. Carmona Paredes Rafael Bernardo

2do. Suplente: Dr. Pozos Estrada Óscar

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, Unidad de Posgrado en Ingeniería, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Gracia Sánchez Jesús

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A la universidad Nacional Autónoma de México que a través del Programa de Posgrados en Ingeniería me permitió continuar con mi formación académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para la realización de los estudios de posgrado.

A los profesores, que durante este tiempo me transmitieron sus conocimientos y experiencias.

Al Sr. Marcos Guigou, por brindarme la información necesaria para desarrollar el proyecto de riego, parte importante del presente trabajo.

Al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) por facilitarme información meteorológica para poder desarrollar el trabajo de tesis.

Al Dr. Jesús Gracia Sánchez por los conocimientos transmitidos y por mostrar la mejor disposición al dirigir este trabajo.

A los miembros del jurado, por su valioso tiempo prestado al revisar este trabajo y formar parte de la presentación final del mismo.

A México, un país maravilloso desde todo punto de vista, que me dio la oportunidad de conocer diferentes lugares, culturas y personas increíbles.

DEDICATORIA

A mis padres, por el apoyo incondicional en todo momento, sin ellos no habría llegado hasta este lugar.

A mis hermanos, por el apoyo y respaldo en cada decisión tomada.

A Bianca, por el amor incondicional que me ha dado desde hace ya muchos años, dejando por un tiempo sus proyectos para acompañarme a lograr mis metas.

Índice

1	RESUMEN.....	10
2	INTRODUCCIÓN.....	11
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
4	ESTADO DEL ARTE EN LA SIMULACIÓN DE CULTIVOS	14
4.1	TIPOS DE MODELOS	14
4.2	MODELO DESARROLLADO EN LA UNAM	16
4.3	AQUACROP	19
4.3.1	<i>Parámetros intervinientes.....</i>	<i>22</i>
4.3.2	<i>Usos y ventajas del modelo</i>	<i>29</i>
4.4	DSSAT.....	30
4.4.1	<i>Modelos de cultivo.....</i>	<i>31</i>
4.4.2	<i>Parámetros de entrada.....</i>	<i>34</i>
4.4.3	<i>Usos, ventajas y desventajas.....</i>	<i>35</i>
4.5	CROPSYST.....	36
4.5.1	<i>Parámetros de entrada al modelo</i>	<i>36</i>
4.6	APSIM	37
4.7	OTROS MODELOS.....	39
4.7.1	<i>STICS</i>	<i>39</i>
4.7.2	<i>DNDC</i>	<i>39</i>
4.7.3	<i>VegSyst</i>	<i>39</i>
4.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	40
5	TIPOS DE RIEGO Y SUS AVANCES TECNOLÓGICOS	42
5.1	RIEGO POR SUPERFICIE.....	44
5.1.1	<i>Avances y mejoras en riego por superficie</i>	<i>46</i>
5.2	RIEGO POR ASPERSIÓN	48
5.2.1	<i>Fabricantes.....</i>	<i>50</i>
5.2.2	<i>Paquetes de simulación</i>	<i>51</i>
5.2.3	<i>Nuevas tecnologías.....</i>	<i>53</i>
5.3	RIEGO LOCALIZADO.....	55
5.3.1	<i>Fabricantes.....</i>	<i>56</i>
5.3.2	<i>Paquetes de simulación</i>	<i>57</i>
5.3.3	<i>Nuevas tecnologías.....</i>	<i>57</i>
5.4	LLUVIA SÓLIDA	58
6	MEDICIÓN DE LA HUMEDAD	63
6.1	FORMAS DE MEDIR LA HUMEDAD EN EL SUELO	63
6.2	MEDIDORES DE HUMEDAD	64
6.3	TECNOLOGÍAS DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA PARA ASESORAMIENTO DE RIEGO	67
7	APLICACIÓN PRÁCTICA - INFORMACIÓN DISPONIBLE	69
7.1	LOCALIZACIÓN	69
7.2	CLIMA	71
7.2.1	<i>Clima de Uruguay.....</i>	<i>71</i>
7.2.2	<i>Información climatológica recopilada</i>	<i>73</i>
7.2.3	<i>Cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia.....</i>	<i>74</i>

7.2.4	<i>Selección del año seco</i>	75
7.3	SUELOS	77
7.3.1	<i>Parámetros relevantes para simulación</i>	82
7.4	CULTIVOS.....	85
7.4.1	<i>Información relevante de cultivos simulados</i>	86
8	APLICACIÓN DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CULTIVOS	90
8.1	METODOLOGÍA DESARROLLADA EN LA UNAM.....	90
8.1.1	<i>Soja</i>	90
8.1.2	<i>Maíz</i>	94
8.1.3	<i>Trigo de invierno</i>	95
8.1.4	<i>Cebada de invierno</i>	96
8.1.5	<i>Conclusiones del resultado obtenido con modelo de Flinn</i>	97
8.2	SIMULACIÓN DE CULTIVOS CON AQUACROP	98
8.2.1	<i>Datos de entrada</i>	98
8.2.2	<i>Resultados modelo AquaCrop</i>	99
8.2.3	<i>Conclusiones del resultado obtenido con el modelo AquaCrop</i>	107
8.3	REFLEXIÓN DE LOS MODELOS UTILIZADOS	107
9	ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA	108
9.1	MODELO DE TEMEZ.....	108
9.1.1	<i>Proceso de cálculo</i>	109
9.2	INFORMACIÓN NECESARIA	110
9.3	RESULTADOS DEL MODELO DE TEMEZ.....	112
10	BALANCE HÍDRICO EN EMBALSE	115
10.1	GEOMETRÍA DEL VASO DEL EMBALSE.....	116
10.2	METODOLOGÍA BALANCE HÍDRICO	118
10.2.1	<i>Procedimiento de calculo</i>	121
10.3	RESULTADO DEL BALANCE HÍDRICO.....	121
11	DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO – PIVOTE CENTRAL	124
12	RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	133
12.1	RESUMEN DEL PROYECTO	133
12.2	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	137
13	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141
14	BIBLIOGRAFÍA.....	144
15	ANEXO	147
15.1	ANEXO 1	147
15.2	ANEXO 2	152
15.3	ANEXO 3 – MODELO DE TEMEZ.....	157
15.4	ANEXO 4 – DISEÑO DEL PAQUETE DE ASPERSORES	173

Índice de Tablas

Tabla 1 - Valores de Cj.....	19
Tabla 2 - Parámetros conservativos del cultivo (FAO, 2012)	26
Tabla 3 - Lista de parámetros de cultivo que probablemente requieran ajustes para explicar las características de la variedad y el manejo y el ambiente local (FAO, 2012)	27
Tabla 4 - Factores que favorecen la elección del método de riego (Pereira y Trout, 1999 citado por Santos Pereira, L. et al. 2004).....	43
Tabla 5 - Ventajas y desventajas del riego por superficie (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010)	46
Tabla 6 - Ventajas y desventajas del riego localizado	55
Tabla 7 - Valores de coeficientes de evapotranspiración para Uruguay (Chiara, 1990)	75
Tabla 8 - Valor de percentiles de precipitación anual en período 2000-2015. Estación Mercedes..	76
Tabla 9 - Lámina de agua en mm ("Agua en el suelo", Facultad de Agronomía, 2013).....	83
Tabla 10 - Valores de coeficientes de ecuación de van Genutchen según textura (TULLER, M. & OR, D., 2003).	84
Tabla 11 - Información relevante de cultivos (I)	86
Tabla 12 - Información relevante de cultivos (II)	87
Tabla 13 - Resumen de resultados del modelo para soja con una política igual al 40% de la humedad aprovechable.....	91
Tabla 14 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para soja	93
Tabla 15 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para trigo de invierno	95
Tabla 16 - Demanda mensual de agua bruta según cultivos.....	98
Tabla 17 - Resultados globales para soja con modelo AquaCrop.....	99
Tabla 18 - Resultados de diferentes simulaciones para cultivos de verano, con AquaCrop.....	102
Tabla 19 - Resultados de diferentes simulaciones para cultivos de invierno, con AquaCrop	103
Tabla 20 - Demanda de agua bruta (riego) considerando: política de 40% en verano e invierno; con 50% del agua disponible al inicio; año seco	105
Tabla 21 - Demanda de agua bruta (riego) considerando: política de 40% en verano; sin riego en invierno; con 50% del agua disponible al inicio; año seco.....	106
Tabla 22 - Demanda de agua bruta (riego) considerando: política de 40% en verano; sin riego en invierno; con 50% del agua disponible al inicio; año medio.....	106
Tabla 23 - Estimación agua disponible de los suelos de la cuenca donde se ubicará la presa.....	111
Tabla 24 - Ciclo anual de evapotranspiración (ETPi/ETPm)	111
Tabla 25 - Parámetros de modelo de Temez.....	113
Tabla 26 - Cotas y áreas de curvas de nivel de futuro embalse.....	116
Tabla 27 - Información torres y tuberías de alimentación en pivote central	127
Tabla 28 - Número de aspersores según modelo y tamaño de boquillas	129
Tabla 29 - Grupo hidrológico (según NRCS) de los suelos de Uruguay (Durán, 1996)	148
Tabla 30 - Números de curva del Método NRCS (MVOTMA, DINAGUA e IMFIA, 2011).....	149
Tabla 31 - Agua Disponible de los suelos del Uruguay (Molfino y Califra, 2001).....	151
Tabla 32 - Simulación completa para soja con una política igual al 40% de la humedad aprovechable	157
Tabla 33 - Calculo mensual de modelo de Temez en período 1981-2015.....	172
Tabla 34 - Resultados del diseño del paquete de aspersores, según planilla de cálculo de la USDA	176
Tabla 35 - Resultados escurrimiento de paquetes de aspersores, según hoja de cálculo de USDA	177

Índice de Figuras

Figura 1 – Zona de estudio	13
Figura 2 - Esquema modelo de Flinn (Gracia, UNAM)	17
Figura 3 - Evolución de AquaCrop (http://www.fao.org/)	21
Figura 4 - Diagrama de flujo que indica los principales componentes de la relación suelo-planta-atmósfera (http://www.fao.org/)	21
Figura 5 - Datos de entrada que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo (FAO, 2012)	23
Figura 6 - Incremento del índice de cosecha desde la floración hasta la maduración fisiológica de los cultivos que producen frutos y granos, con la indicación del índice de cosecha de referencia (HIo) (FAO, 2012).....	25
Figura 7 - Zona radicular descrita como un depósito (FAO, 2012).....	28
Figura 8 - AquaCrop. Ventana de simulación	29
Figura 9 – DSSAT. Ventana principal	31
Figura 10 – DSSAT. Componente y estructuras (DSSAT manuals).....	33
Figura 11 - DSSAT. Ejemplo ingreso plan de riego	35
Figura 12 - APSIM. Ventana principal.....	38
Figura 13 - Diferentes opciones de riego por superficie (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010)	45
Figura 14 - Equipo de nivelación por láser y parcela nivelada con dicho equipo (Santos Pereira, L. et al., 2004).....	47
Figura 15 - Pivote central Valley funcionando (www.valleyirrigation.com)	49
Figura 16 - Diferentes tipos de aspersores funcionando (www.senninger.com)	50
Figura 17 - irriExpress (www.irriexpress.com)	52
Figura 18 - Tecnologías Valmont Irrigation (www.valleyirrigation.com).....	54
Figura 19 - Aplicación de agua mediante riego localizado (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010)	56
Figura 20 - Composición Silos de agua (http://www.silosdeagua.cl)	59
Figura 21 - Lluvia sólida (http://www.lluviasolida.mx)	59
Figura 22 - Aplicación de producto a cultivos extensivos (http://www.silosdeagua.cl)	61
Figura 23 – Ejemplos de aplicación de producto a cultivos extensivos (http://www.silosdeagua.cl)	61
Figura 24 - Diviner 2000 (www.seedmech.com)	65
Figura 25 - Sistema de medición de humedad y temperatura del suelo (www.davisnet.com)	66
Figura 26 - Concepto y funcionamiento del Sistema de Asesoramiento de Riego Asistido mediante Satélite (SARAS) (Calera, A. et al. 2003)	68
Figura 27 - Ubicación geográfica de Uruguay y zona de estudio (triángulo rojo).....	69
Figura 28 - Ubicación geográfica de zona de estudio.....	70
Figura 29 - Distribución de temperaturas y precipitaciones. Fuente: D. N. de Meteorología. (Álvarez, W. y De Souza, R., 2010).....	72
Figura 30 - Estaciones cercanas.....	73
Figura 31 - Precipitación anual estación Mercedes. Período 1981-2015.	76
Figura 32 - Percentiles para valores de precipitación anual en período 2000-2015. Estación Mercedes.....	77
Figura 33 - Carta de suelos (MGAP). Escala 1:1.000.000.....	78
Figura 34 - Carta de suelos del Departamento de Soriano (MGAP). Escala 1:200.000	79
Figura 35 - Tipos de suelos en área destinada a riego.....	80
Figura 36 - Tipos de suelo en cuenca donde se ubicará la presa de almacenamiento.....	81
Figura 37 - Curva tensión-humedad para suelo franco limo arcilloso.....	84

<i>Figura 38 - Área mundial cosechada de trigo y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)</i>	<i>87</i>
<i>Figura 39 - Área mundial cosechada de maíz y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)</i>	<i>88</i>
<i>Figura 40 - Área mundial cosechada de soja y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)</i>	<i>88</i>
<i>Figura 41 - Área mundial cosechada de cebada y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)</i>	<i>89</i>
<i>Figura 42 - Humedad en el suelo (W) para cada día de simulación.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 43 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para soja</i>	<i>93</i>
<i>Figura 44 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para maíz.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 45 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para trigo de invierno.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 46 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para cebada de invierno.....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 47 –Agua en el suelo a lo largo del ciclo vegetativo, según la política de riego elegida. Modelo AquaCrop</i>	<i>101</i>
<i>Figura 48 - Gráficas de rendimiento según política y lámina de lluvia.....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 49 - Esquema conceptual del modelo.....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 50 - Isolíneas de evapotranspiración media anual (ETPm, mm/mes). (MVOTMA et al., 2011)</i>	<i>112</i>
<i>Figura 51 - Escurrimientos acumulados mensuales de la cuenca en el período 1981-2015, según el Modelo de Temez.....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 52 - Precipitación y escurrimiento mensual y anual</i>	<i>114</i>
<i>Figura 53 - Zonas de almacenamiento de un embalse, (Ven te Chow, 1988)</i>	<i>115</i>
<i>Figura 54 - Curvas de nivel cada 1m en área donde se ubicará la presa</i>	<i>117</i>
<i>Figura 55 - Curvas elevación-área y elevación-volumen.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 56 - Principales componentes de un vaso (Aparicio, J., 1992).....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 57 - ISD según área y demanda de riego.....</i>	<i>122</i>
<i>Figura 58 - Ubicación pivote central y perfil longitudinal crítico (www.pivotplacer.com)</i>	<i>125</i>
<i>Figura 59 - Ubicación pivote central: posición central y espaciamiento entre torres (www.pivotplacer.com)</i>	<i>126</i>
<i>Figura 60 - Ubicación de las torres en perfil longitudinal (perfil crítico)</i>	<i>127</i>
<i>Figura 61 - Presión en el pivote, según planilla de cálculo de la USDA.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 62 - Esquema general de planta.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 63 - Resumen del proyecto.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 64 - Resumen: Espejo de agua de embalse.....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 65 - Resumen: Pivote central.....</i>	<i>136</i>

1 RESUMEN

Las demandas alimenticias que año a año aumentan en el mundo sumado a la importancia que tiene la agricultura para poder satisfacerlas, hacen que el rendimiento de los cultivos sea un factor clave. Actualmente, con los avances tecnológicos, es posible lograr mejoras sustanciales utilizando el agua de manera adecuada en diferentes tipos de cultivos y con diferentes tipos de clima.

Por ello, el presente trabajo se enfoca brindar al lector algunas de las herramientas existentes en la actualidad, que servirán para la evaluación y el diseño de zonas de riego de diferentes tipos y con diferentes condiciones. A grandes rasgos se presenta: a) uso y disponibilidad del agua para los cultivos y como ésta afecta en los rendimientos, a través de la investigación y aplicación de paquetes de simulación de cultivos; b) análisis de los diferentes tipos de riego y sus avances tecnológicos; c) aplicación práctica a un caso de estudio ubicado dentro de la República Oriental del Uruguay, en donde se determina: rendimientos aproximados con dos paquetes de simulación, volumen del embalse que será fuente de agua del sistema de riego, área a regar utilizando un balance hídrico y estimación de un sistema de riego por aspersión de pivote central.

Palabras clave: riego, simulación numérica de cultivo, rendimiento de cultivo.

2 INTRODUCCIÓN

Aproximadamente el 3% del agua del mundo es agua dulce y de esta, la agricultura consume cerca del 70%. Esto, sumado a las demandas alimenticias que año a año aumentan hace que sea imperativo buscar métodos o tecnologías que permitan disminuir el consumo de agua en la agricultura, pero aumentando la producción por área de cultivo y permitiendo obtener productos con una calidad adecuada para el consumidor.

Teniendo en cuenta la importancia del agua para los cultivos, dado que constituye un gran porcentaje en peso fresco en la mayoría de las plantas, es disolvente de gases y minerales que penetran en las células vegetales, es reactivo de muchos procesos como la fotosíntesis, etc., se debe considerar tanto ahorro como el poder proporcionarle al cultivo las cantidades necesarias de agua en los momentos más oportunos, con el fin de lograr mejores rendimientos.

Es por ello que, en una primera etapa, el presente trabajo se basa en la descripción de los diferentes paquetes de simulación de cultivos que existen en mercado. Según la bibliografía recopilada se describen los más importantes, detallando en algunos de casos las variables que intervienen, así como sus ventajas y/o desventajas de su utilización.

Posteriormente se describen los tipos de riego existentes, con sus ventajas y desventajas, y los avances y mejoras que existen en la actualidad. Además, teniendo en cuenta que las nuevas tecnologías apuntan a un riego inteligente que se pueda manejar de forma remota, se realiza una descripción de la medición de humedad en el suelo, explicando las formas en que es posible determinar este parámetro clave para los cultivos, así como las nuevas herramientas que se están utilizando.

Por último, utilizando todo lo descrito anteriormente, se realiza un diseño de un sistema de riego dentro de la República Oriental del Uruguay, que incluye: la determinación de un área a regar, el dimensionado de un embalse que servirá como fuente de agua para dicho sistema y el diseño de un sistema de riego por aspersión de pivote central.

Para el dimensionado del embalse por un lado se utiliza un modelo de escurrimiento calibrado para Uruguay, *modelo de Temez*, que sirve como entrada para el balance hídrico que permitirá establecer el área que es posible regar. Por otro lado, se utilizan dos modelos de simulación de cultivos, el modelo de *Flinn* y el software *AquaCrop*, con el fin de establecer las demandas requeridas por cada cultivo considerado.

Para el diseño del pivote central se utilizará información de fabricantes y las hojas de cálculos de la *United States Department of Agriculture (USDA)*, de todas maneras, el objetivo es establecer los pasos a seguir y algunos criterios a tener en cuenta, dejando en claro la necesidad de mejor información para su diseño final.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el fin de lograr un mejor rendimiento en los cultivos y aprovechar los recursos hídricos de la zona, surge la posibilidad de instalar un sistema de riego por aspersión en un campo situado al suroeste de la República Oriental del Uruguay.

Para ello se dispone de dos áreas en diferentes campos. En una de ellas se plantea la construcción de una presa de almacenamiento, que será la fuente de agua para el sistema de riego que se pretende instalar en el segundo campo. Dado que ambos terrenos se encuentran “conectados” por dos ríos, la idea es verter el agua necesaria para regar desde la presa a la red fluvial, y que ésta se transporte hacia aguas abajo donde será extraída, a través de un bombeo, para regar el área correspondiente en el segundo campo. En la figura siguiente se aprecia una imagen satelital con la ubicación de las dos áreas y los cursos de agua que intervienen.

El área destinada para riego es de aproximadamente 478 hectáreas, pero se estima que solo se podrán utilizar 200 ha debido a la existencia de otros sistemas de riego y construcciones dentro de la zona. Por otro lado, la cuenca donde se pretende construir la presa de almacenamiento es de 85.57 ha. Finalmente, la longitud de cauce que une ambas áreas es de 30 km.

Para el diseño del sistema de riego se va a utilizar simulación de cultivos a través de dos herramientas diferentes. Es por ello que se realizó una investigación para dar conocimiento de la existencia de diferentes paquetes de simulación, aportando cierta información de cada uno de ellos: parámetros intervinientes, usos, ventajas, etc. De esta manera y según la finalidad del ejercicio, se seleccionaron las siguientes herramientas a ejecutar:

- Método propuesto por la UNAM, basado en el método de Flinn;
- AquaCrop.

Para el diseño del pivote central se utilizarán las recomendaciones y hojas de cálculo de la USDA, las cuales son de acceso gratuito.



Figura 1 – Zona de estudio

Polígono naranja: área destinada a riego; polígono gris: área destinada a presa de almacenamiento

4 ESTADO DEL ARTE EN LA SIMULACIÓN DE CULTIVOS

En los últimos años el crecimiento en los modelos de simulación de cultivos los ha convertido en una herramienta esencial para apoyar la investigación de campo y mejorar la productividad agrícola de países desarrollados y en desarrollo. Los resultados de la simulación, en contraste con las observaciones de campo habituales, se pueden extrapolar a diferentes condiciones, diferentes cultivos o esquemas de cultivos (Miglieta & Bindi, 1993).

Actualmente existen muchas interpretaciones acerca del concepto de modelos de simulación. Los modelos pueden variar desde uno empírico, que utiliza promedios de temperaturas diarias para predecir los rendimientos de los cultivos, a modelos muy sofisticados, que tratan de describir el efecto de diferentes sustancias en el desarrollo de la planta. Por lo tanto, el nivel de detalle de un modelo de simulación de cultivos depende de los objetivos y disponibilidad de información con la que se cuente en cada proyecto.

Un sistema de cultivo está formado por varios procesos con diferente complejidad y, por lo tanto, los modelos deben incluir las interacciones con el medio y procesos internos que permitan simular la producción máxima. Sin embargo, cuantos más procesos se incluyan en el modelo (tanto internos como externos), mayor complejidad va a tener el mismo. Esto lleva a mayores dificultades en las etapas de calibración, simulación y validación y a una mayor necesidad en recursos de hardware. Es por eso que los modelos de cultivos deben ser al mismo tiempo lo bastante complejos y exhaustivos en su concepción, y lo bastante simples y comprensibles en sus estructuras cuantitativa, dinámica y mecánica. El modelo puede ser simple y describir solamente un proceso, o puede ser complejo y representar varios procesos y sus interacciones, la fotosíntesis, la fenología, la distribución de biomasa y el carbono, la disponibilidad de agua en el suelo y el crecimiento y desarrollo de la planta en función del déficit de agua y nitrógeno (Ospina, 2006).

4.1 Tipos de modelos

Según Link, E. [25] los modelos pueden ser clasificados en: empíricos, mecanicistas, funcionales o de procesos.

Los modelos empíricos describen lo que sucede, sin describir la forma en que sucede, lo que resulta en un enfoque de “caja negra”. Las relaciones matemáticas del modelo no corresponden necesariamente a un proceso físico, biológico o químico y, por tanto, no explican el mecanismo en que se relacionan. Tales modelos podrían utilizarse para resumir los datos o para impedir la generalización más allá de los conjuntos de datos y las condiciones específicas para las cuales se ha parametrizado el modelo. Los modelos empíricos examinan o representan datos y, por lo tanto, no se adquiere nueva información. Muchas de las relaciones de crecimiento y rendimiento con el aporte de nutrientes o agua pertenecen a esta categoría (Link, 2005).

Un modelo mecanicista es más complejo que un modelo empírico e intenta describir los posibles mecanismos de los procesos subyacentes y su interacción en la forma más fundamental, la relación causa-efecto. Este tipo de modelos suministran información de los procesos a través de los cuales son gobernados los fenómenos bajo estudio. Los modelos mecanísticos han sido clasificados como modelos determinísticos y estocásticos. En los modelos mecanísticos, los procesos que ocurren en el sistema forman la base del modelo. Por lo tanto, no suministran el comportamiento del sistema como un todo, sino según el detalle de los subprocesos que son analizados y descritos. El crecimiento del cultivo expresado en este sentido entonces está construido sobre la base del conocimiento de los procesos fisiológicos, físicos y químicos inherentes y el efecto de los factores ambientales sobre estos. La principal ventaja de los modelos mecanísticos es que ellos pueden ser transferidos a otro conjunto de condiciones por lo que ofrecen más posibilidades para manipular y mejorar el sistema, lo que lo hace ideal para construir diversos escenarios (Link, 2005).

Los modelos funcionales se definen como modelos que incorporan métodos simplificados para describir procesos más complejos. Esta clase de modelos no dependen de muchos parámetros, y por lo tanto es más factible simplificar el proceso a través de modelo mecanístico. A pesar de la simplificación, los modelos funcionales pueden proporcionar una simulación tan buena como los modelos mecanísticos. Así, los modelos funcionales se utilizan normalmente como herramientas de gestión, mientras que los modelos mecanísticos se utilizan en la investigación (Link, 2005).

Por último, los modelos basados en procesos fueron desarrollados con la finalidad de simular sistemas complejos, como son los sistemas de cultivos donde existen relaciones con el clima, las prácticas agrícolas, las características del suelo, etc. Por lo tanto, este tipo de modelo contiene una combinación de diferentes tipos de modelos (Link, 2005).

A su vez, los modelos de crecimiento de cultivos se pueden agrupar en tres categorías principales, dependiendo de la jerarquía de los procesos y escalas temporales necesarias, estas son: crecimiento a través de la vía del carbono, crecimiento a partir de la radiación solar y crecimiento impulsado por el agua (transpiración) (Steduto, 2006).

Un modelo que use la vía del carbono será un modelo del tipo mecanístico; la vía de la radiación y la del agua generalmente tienen un modelo de acercamiento funcional. Según el tipo de relaciones estudiadas las tres podrán ser parte de un complejo modelo basado en procesos.

Las ecuaciones de crecimiento de todos los modelos de cultivo tienen la radiación solar como fuerza conductora. Sin embargo, la misma radiación solar es la fuerza conductora primaria del proceso transpiratorio. Ambos procesos: la asimilación del carbono y la transpiración, ocurren a través de la misma vía, los estomas (Guarín, 2011).

Según diferentes autores, para modelar la producción de un cultivo se parte de una condición ideal en la que el cultivo se encuentra adaptado a las condiciones climáticas y pueda, por tanto, expresar su máxima producción. El rendimiento máximo equivale al rendimiento cosechado de una determinada variedad de cultivo cuando ésta se encuentra bien adaptada al ambiente vegetativo, en condiciones tales que su rendimiento no esté limitado por agua y nutrientes, y carezca en todo el proceso de plagas y enfermedades.

Una vez que se determina el rendimiento máximo se inicia un proceso de “castigo” para condiciones no ideales, que según la medida en que se presenten condiciones limitantes, ya sea por agua, nutrientes, enfermedades u otras, representará una disminución de ese valor de rendimiento máximo (Guarín, 2011).

Según lo menciona Guarín en su tesis, en el modelamiento de un cultivo lo que más interesa es simular el crecimiento, la producción y la respuesta del cultivo a las diferentes alternativas de manejo. En este sentido se consideran cuatro niveles:

- Producción potencial (Rendimiento máximo).
- Producción limitada por agua.
- Producción limitada por nitrógeno.
- Producción limitada por otros factores de estrés (deficiencia de nutrimentos, plagas, enfermedades, arvenses).

En la actualidad la cantidad de modelos de cultivo reportados en la bibliografía es muy grande y no sorprende que no exista un modelo de cultivo universal que se pueda adaptar a los diferentes sistemas, objetivos, procesos y condiciones ambientales. Por ejemplo, existen modelos de simulación específica para un cultivo (CERES-Wheat, CORNGRO, SIMTAG, etc.), así como otros que son genéricos, y por tanto pueden ser aplicados a varias especies mediante la utilización de parámetros específicos para cada cultivo (DSSAT, CROPSYST, APSIM y STICS, etc.). Cabe destacar que muchos de los modelos de simulación de cultivos son de libre acceso.

A continuación, se describen algunos de los modelos genéricos de cultivos.

4.2 Modelo desarrollado en la UNAM

La siguiente metodología fue extraída del documento desarrollado por el Dr. Jesús Gracia Sánchez (Investigador del Instituto de Ingeniería de la UNAM) denominado *Introducción al Diseño de Zonas de Riego y Drenaje* (2002).

El objetivo fundamental de la simulación de cultivos es la determinación del consumo de agua de un cultivo y de la posible producción del mismo, de acuerdo con la política de riego o con las características de precipitación del lugar.

Con las funciones de producción no es posible tomar en cuenta la manera como ha sido distribuida la lámina de agua durante el ciclo vegetativo, lo cual puede ser muy importante

ya que la carencia o falta de oportunidad del agua en ciertas etapas puede alterar de manera significativa la producción final. Esto sin descontar que en muchos casos no es posible aplicar toda el agua que se necesita por lo cual hay que aplicar el riego en déficit. En resumen, no sólo es importante la cantidad de agua aplicada sino también su oportunidad.

El objetivo fundamental del modelo (*Flinn*) es simular el crecimiento de los cultivos, para conocer sus requerimientos de agua y su productividad final total.

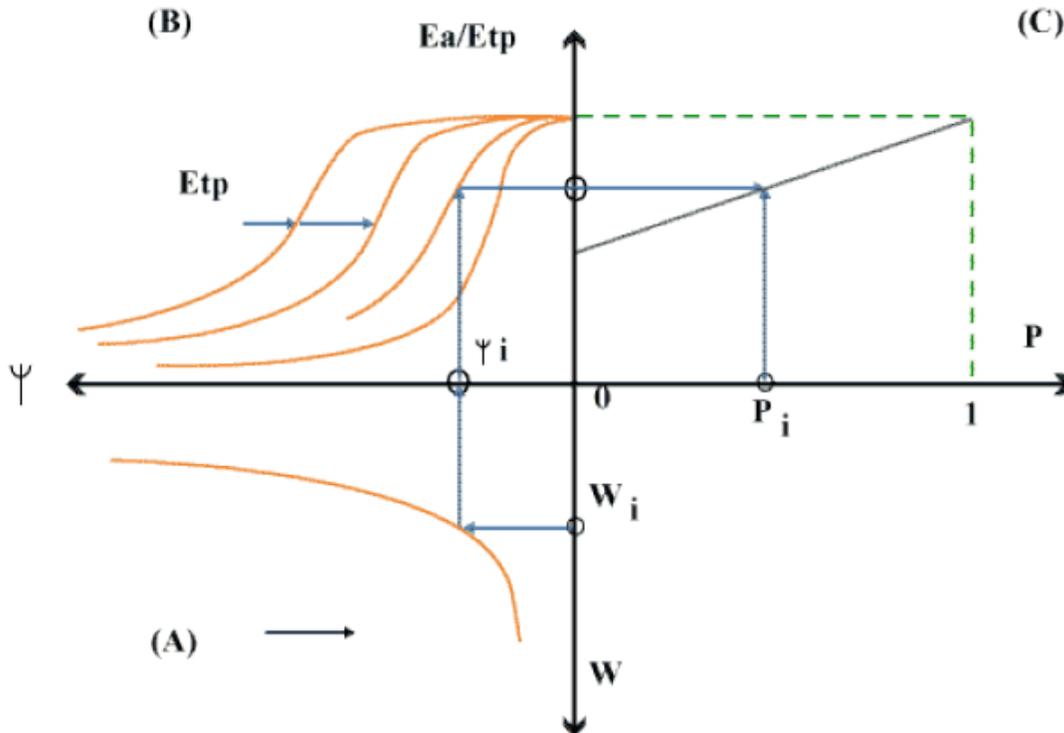


Figura 2 - Esquema modelo de Flinn (Gracia, UNAM)

- Agua-suelo (cuadrante A). El agua en el suelo se toma en cuenta en función de la capacidad de retenerla. Se emplea la ecuación entre el contenido de agua y la tensión.
- Agua-suelo-clima (cuadrante B). Este triple efecto se representa empleando la relación entre la tensión de la humedad en el suelo y la evapotranspiración potencial.

La evapotranspiración potencial se calcula sabiendo que:

$$Etp = Kc \times Eo \quad (4.1)$$

Dónde:

E_o : Evaporación del día, mm

K_c : Factor de cultivo

La relación entre la tensión (ψ) y las evapotranspiraciones está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\frac{E_a}{E_{tp}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{4118 - 1613 \times E_{tp}}\right)^2} \quad \text{si } 0 < E_{tp} < 2 \text{ mm} \quad (4.2)$$

$$\frac{E_a}{E_{tp}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{1386 - 250 \times E_{tp}}\right)^2} \quad \text{si } 2 \leq E_{tp} \leq 4.1 \text{ mm} \quad (4.3)$$

$$\frac{E_a}{E_{tp}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\psi}{888 - 128 \times E_{tp}}\right)^2} \quad \text{si } 4.1 < E_{tp} < 7 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Dónde E_a y E_{tp} están en mm y ψ en J/Kg.

Calculados ψ y E_{tp} , se determina E_a de la ecuación correspondiente para el intervalo en que se encuentre E_{tp} .

- Producción (cuadrante C). La producción se obtiene considerando el desarrollo del cultivo, esto se hace a través de la relación entre las evapotranspiraciones potencial y real, con el factor diario de producción. Posteriormente se emplea este factor para calcular la producción final total.

El desarrollo diario se calcula con la siguiente expresión:

$$P = 2 (E_a/E_{tp}) - 1 \quad (4.5)$$

Donde P representa el desarrollo diario en porciento. Notar que $0 \leq P \leq 1$ en todos los casos.

La producción final total del cultivo se calcula con la expresión:

$$Y = Y' \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{C}{N}\right)_j \sum_{i=1}^{N_j} P_i \right] \quad (4.6)$$

Dónde:

Y : Producción final total, ton/ha

Y' : Producción máxima obtenida en condiciones óptimas de fertilización y humedad, en ton/ha

C_j : Coeficiente de ponderación de la etapa j

N_j : Números de días de la etapa j

j : Índice para las diferentes etapas del ciclo vegetativo

P_i : Desarrollo para el día i en la etapa j , obtenido de la simulación

i : Índice para representar los días de cada etapa del ciclo vegetativo

m : Última etapa del ciclo vegetativo

Etapa	C_j
Germinación	0,05
Crecimiento	0,30
Floración	0,50
Madurez	0,15

Tabla 1 - Valores de C_j

Dada su fácil aplicación y la poca necesidad de información, el presente modelo es una importante herramienta para la modelación de cultivos, permitiendo generar, en poco tiempo, diferentes escenarios.

4.3 AquaCrop

Es un modelo de productividad de cultivos desarrollado por la División de Agua y Tierra de la *Organización de Agricultura y Alimentos de las Naciones Unidas* (FAO). Este simula la respuesta del rendimiento al agua de los cultivos herbáceos, y es adecuado para abordar problemas en los cuales el agua es un factor limitante, clave en la producción de cultivos.

AquaCrop intenta equilibrar tres aspectos: precisión, simplicidad y robustez. En ese sentido, dicho software utiliza un número relativamente pequeño de parámetros y variables de entrada, que son tanto explícitos como intuitivos, y que requieren métodos simples para su determinación.

Según la FAO, *AquaCrop* está destinado tanto a profesionales como a los que trabajan para servicios de extensión, agencias gubernamentales, organizaciones no gubernamentales, y diversos tipos de asociaciones de agricultores. También es de interés para científicos y personas con fines de enseñanza dado que puede ser utilizado como una herramienta de formación y educación, sobretodo en relación con el papel que juega el agua en la determinación de la productividad de los cultivos.

El software resulta de la revisión del documento denominado “El incremento del rendimiento del agua” desarrollado por el sector Riego y Drenaje de la FAO. En él se establece la relación fundamental de estimación de rendimiento en respuesta al agua, y se expresa de la siguiente manera:

$$\left(\frac{Y_x - Y_a}{Y_x}\right) = k_y \left(\frac{ET_x - ET}{ET_x}\right) \quad (4.7)$$

Donde Y_x e Y_a son el rendimiento máximo y actual. ET_x y ET son la evapotranspiración máxima y real, y k_y es el factor de proporcionalidad entra la pérdida relativa de rendimiento y la reducción relativa de evapotranspiración.

AquaCrop evoluciona de la ecuación 4.7 por: (i) divide ET en evaporación del suelo (E_s) y transpiración del cultivo (Tr); (ii) obtiene la biomasa (B) a partir del producto de la productividad del agua (WP) y la transpiración acumulada del cultivo, como se expresa en la ecuación 4.8; (iii) expresa el rendimiento final (Y) como el producto de B y el índice de cosecha (HI); (iv) normaliza Tr con la evapotranspiración de referencia (ET_0); (v) calcula diariamente el uso del agua, el crecimiento y la producción del cultivo en vez de determinar solamente la ET e Y final.

$$B = WP \sum Tr \quad (4.8)$$

La división de ET en E_s y Tr evita el efecto confuso no productivo del uso consuntivo del agua. Esto es importante para los periodos de crecimiento cuando la cobertura del dosel es incompleta. La expresión del rendimiento en términos de B y HI permite la distinción de las relaciones funcionales básicas entre las condiciones ambientales con B y HI . La normalización de Tr permite una relación general Tr - B , aplicable a diferentes regímenes climáticos. La simulación diaria del uso del agua y la producción permite una explicación más realista de la naturaleza dinámica de los efectos de estrés hídrico y la respuesta de los cultivos.

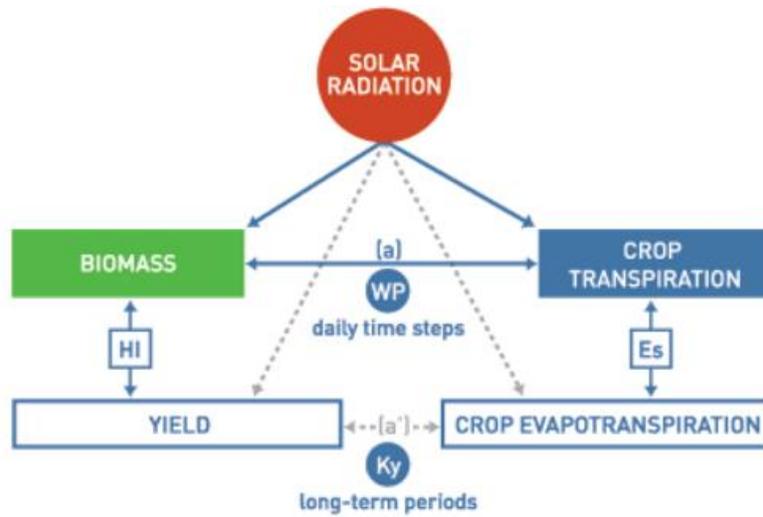


Figura 3 - Evolución de AquaCrop (<http://www.fao.org/>)

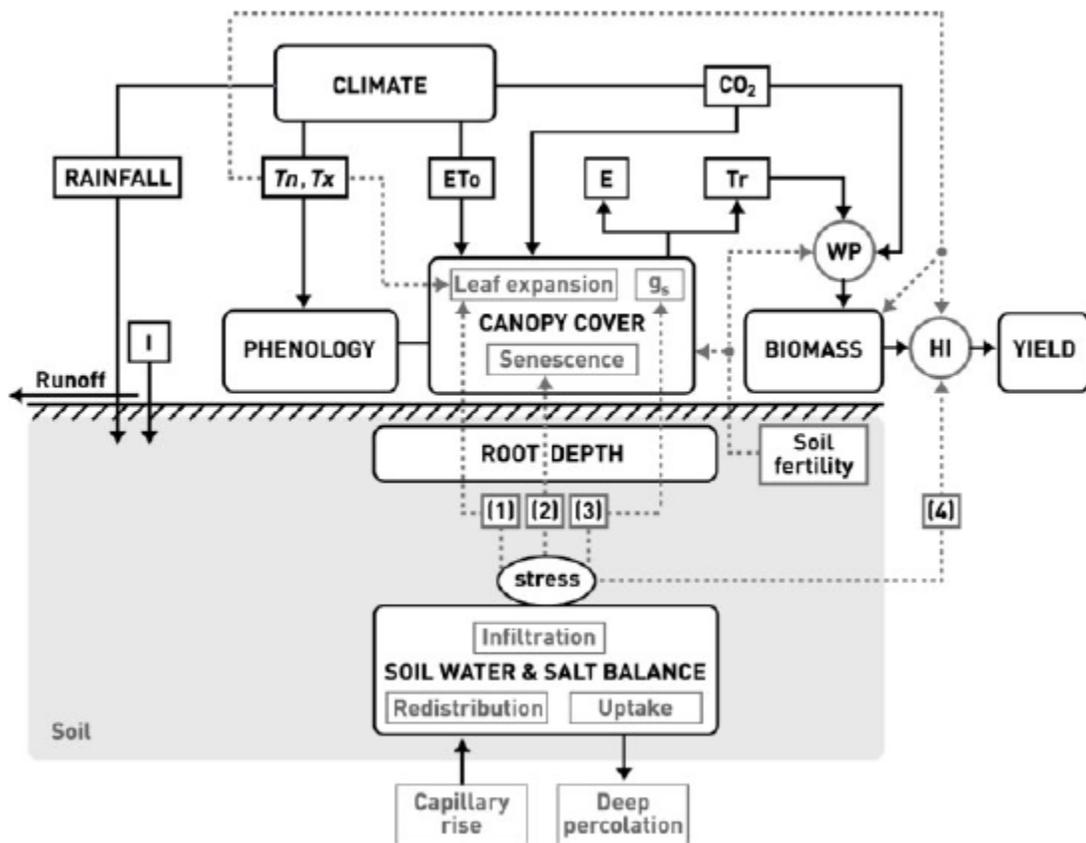


Figura 4 - Diagrama de flujo que indica los principales componentes de la relación suelo-planta-atmósfera (<http://www.fao.org/>)

4.3.1 Parámetros intervinientes

AquaCrop requiere la incorporación de datos en cuatro módulos: **clima, cultivo, suelo y manejo**.

Dentro de la serie de documentos con los que cuenta la FAO, vale la pena mencionar el *No. 66 Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (2012), el cual describe el modelo y los parámetros intervinientes. Además, allí se describen las características agronómicas de los 16 cultivos para los cuales el modelo fue calibrado y validado. Los cultivos incluidos son: trigo, arroz, maíz, soya o soja, cebada, sorgo, algodón, girasol, caña de azúcar, papa o patata, tomate, remolacha azucarera, alfalfa, maní bambara (guandsú), quinua y tef. La descripción de cada cultivo incluye su crecimiento y desarrollo, uso del agua y productividad, respuestas ante el déficit hídrico y rendimientos esperados.

Las diferencias genéticas entre especies requieren la calibración del modelo para cada una de ellas. Aunque es posible que algunas variedades de cultivo requieran ciertos ajustes de parámetros en el modelo calibrado, además de la fenología, la calibración y validación, usando datos de diferentes estudios en varias partes del mundo ha brindado más confianza en que la mayoría de los parámetros fundamentales que se consideran conservativos (prácticamente constantes) se podrán aplicar incluso a diferentes variedades. Los parámetros calibrados disponibles al menos deberán servir como valores iniciales sólidos, los cuales se pueden ajustar si el set de los datos fiables, utilizados para probar los valores, indican claramente tal necesidad. En este sentido, cabe señalar que las calibraciones se deben realizar con datos obtenidos de cultivos que no hayan presentado ninguna limitación de nutrientes minerales durante su desarrollo, dado que las deficiencias de nutrientes principales (N, P y K) alteran, en cierta medida, varios parámetros conservativos en *AquaCrop* (FAO, 2012).



Figura 5 - Datos de entrada que definen el ambiente en el cual se desarrolla el cultivo (FAO, 2012)

Clima

Como se observa en la Figura 5, el primer paso es crear un archivo de clima. Para ello, la FAO cuenta con un software denominado *ETo calculator* que nos permite de forma sencilla obtener los elementos de entrada para crear dicho archivo, el cual se genera dentro del primer módulo de *AquaCrop*.

Cultivo

El segundo paso corresponde al cultivo. El módulo de cultivo te permite seleccionar dos opciones de paquetes de parámetros, uno limitado y uno completo. La diferencia entre ambos es clara, en el limitado se solicita un conjunto más reducido de parámetros que en el completo. Por ejemplo el modelo completo solicita, además de los datos a introducir en el conjunto limitado, información del estrés de la planta frente al agua, la temperatura y la salinidad del suelo, además de parámetros para determinar la transpiración del cultivo.

Una de las características más importantes en el modelo es la cobertura del dosel o canopia (CC) -cubierta aérea con que un cultivo resguarda el suelo-, dado que su expansión, envejecimiento y senescencia, junto con su conductancia, determinan la cantidad de agua transpirada, lo que a su vez determina la cantidad de biomasa producida (FAO, 2012).

Según la FAO (2012) la cobertura del dosel se calcula como:

$$CC = CC_0 \cdot e^{CGC \cdot t} \quad (4.9)$$

Donde:

CC_0 : es la CC inicial y se define como la densidad de la plantación por la media del tamaño del dosel por planta (cc_0).

CGC : es el coeficiente de crecimiento del dosel en fracción o porcentaje de la CC existente cuando el tiempo es igual a t.

Además, mencionan que tanto cc_0 como CGC son parámetros conservativos, es decir, los valores que fueron calibrados para los diferentes tipos de cultivos son valores aceptables para la modelación de dichos cultivos en otra región.

Sin embargo, cuando el dosel sigue creciendo y abarca más de la mitad del suelo, la captación de radiación solar y la fotosíntesis empiezan a aumentar menos en proporción con el incremento de la cobertura del dosel (CC), a causa de la sombra que las plantas se proporcionan mutuamente. Por tanto, la ecuación 4.9 pierde su validez y, para la segunda mitad del desarrollo del dosel, la cobertura (CC) adopta una ecuación exponencial de descomposición (FAO, 2012):

$$CC = CC_x - 0.25(CC_x^2/CC_0) \cdot e^{-CGC \cdot t} \quad (4.10)$$

Donde:

CC_x : es la cobertura máxima del dosel bajo óptimas condiciones

Otro parámetro importante es la senescencia del dosel debido a que determina la duración de la cobertura en el momento en que es más efectivo en cuanto a la fotosíntesis. A medida que inicia la senescencia, tanto la transpiración como la fotosíntesis disminuyen y la acumulación de biomasa se reducen. Según la FAO, éste parámetro requiere de una calibración precisa a través de la observación de datos de campo.

También se tiene en cuenta en el modelo la profundización de las raíces (Z_e) y el patrón de extracción de agua, debido a que a partir de estos el modelo simula la absorción de agua por las raíces.

AquaCrop calcula además la transpiración del cultivo utilizando los valores de ETo y el coeficiente de transpiración del cultivo. Sin embargo, para modificar dicho coeficiente, se debe seleccionar el paquete completo de datos.

Para determinar la producción de biomasa, *AquaCrop* incorpora el parámetro WP denominado productividad de agua para biomasa, el cual mostro un carácter conservativo cuando se normalizó para diferentes demandas evaporativas. Por lo tanto, se podría decir que dicho parámetro permanece constante para cada cultivo, pero difiere entre ellos (FAO, 2012).

Para el cálculo del rendimiento (Y) es necesario la introducción del índice de cosecha (HI). Dicho parámetro varía según el ciclo del cultivo, según se observa en la siguiente figura.

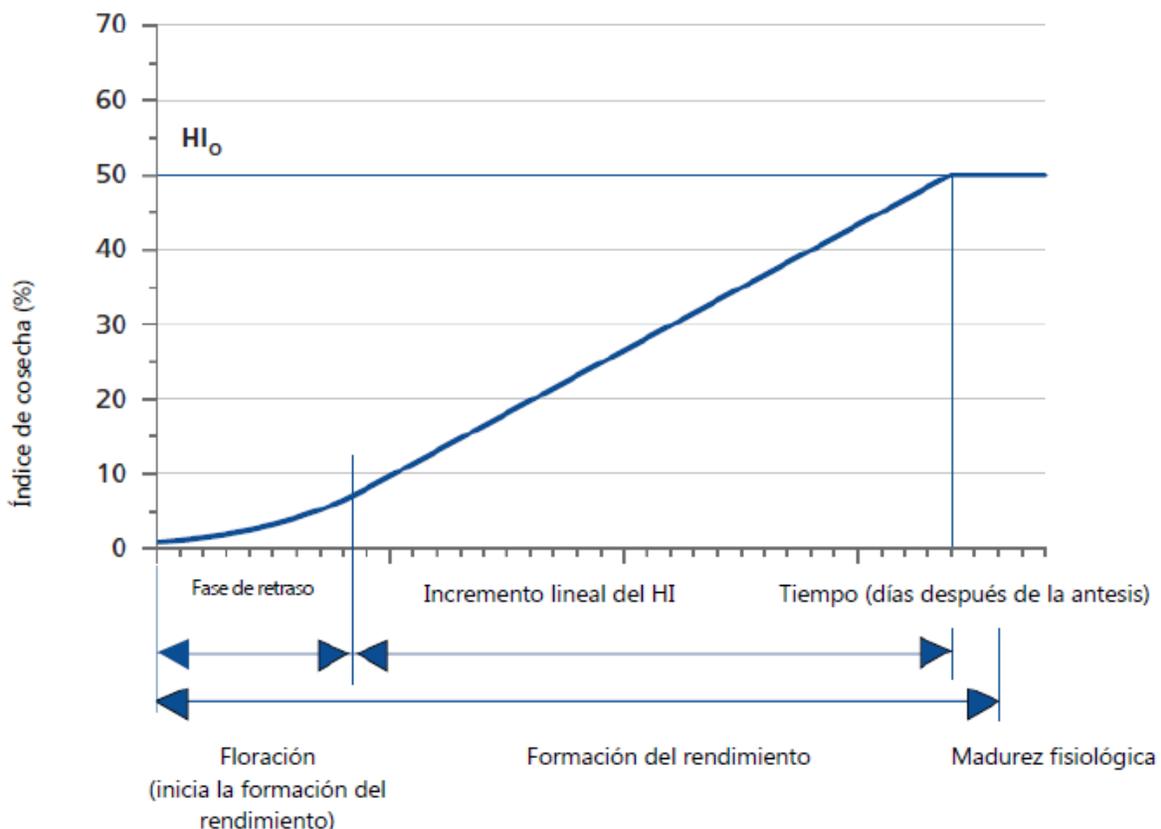


Figura 6 - Incremento del índice de cosecha desde la floración hasta la maduración fisiológica de los cultivos que producen frutos y granos, con la indicación del índice de cosecha de referencia (HI_0) (FAO, 2012)

Los parámetros antes mencionados son algunos de los más importantes a la hora de crear el archivo de cultivo. Vale la pena mencionar que muchos de los ya descritos son parámetros conservativos, por lo que resulta pertinente utilizar los valores calibrados para el cultivo que se desea simular. En las siguientes tablas se detallan los parámetros que son conservativos, varietales y dependiente de las condiciones, según la FAO (2012).

Desarrollo y crecimiento del cultivo
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura base y temperatura superior para grados día en aumento • Cobertura del dosel del promedio de las plántulas al 90% de emergencia (cco) • Coeficiente de crecimiento (CGC); Coeficiente de disminución del dosel (CDC) • Grado de determinación del cultivo vinculado/no vinculado con la floración; Exceso de frutos potenciales (%)
Transpiración del cultivo
<ul style="list-style-type: none"> • Disminución del coeficiente de cultivo como resultado del envejecimiento
Producción de biomasa y formación de fruto
<ul style="list-style-type: none"> • Productividad del agua normalizada por Eto y CO2 (WP*) • Coeficiente de reducción que describe el efecto de los productos sintetizados durante la formación del fruto en la productividad del agua normalizada • Índice de cosecha de referencia (HIo)
Estreses
<p>Estreses hídricos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umbrales superior e inferior de agotamiento de humedad del suelo para expansión del dosel y forma de la curva de estrés • Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para cierre estomático y forma de la curva de estrés • Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para senescencia temprana y forma de la curva de estrés • Umbral superior del agotamiento de humedad del suelo para fallo de la polinización y forma de la curva de estrés • Posible incremento de HI a causa del estrés hídrico antes de la floración • Coeficiente que describe el impacto positivo sobre el HI del crecimiento vegetativo restringido durante la formación del fruto • Coeficiente que describe el impacto negativo sobre el HI del cierre estomático durante la formación del fruto • Incremento máximo permisible del HI especificado • Punto anaerobiótico (para los efectos del encharcamiento sobre la Tr) <p>Estrés por temperatura</p> <ul style="list-style-type: none"> • Temperaturas mínima y máxima del aire por debajo de las cuales la polinización empieza a fallar • Grados día mínimos requeridos para la producción completa de biomasa

Tabla 2 - Parámetros conservativos del cultivo (FAO, 2012)

Fenología (específica de la variedad)
<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo para la floración o el comienzo de la formación del fruto • Duración de la etapa de floración • Tiempo para empezar la senescencia del dosel • Tiempo para madurez (es decir, duración del ciclo del cultivo)
Dependientes del manejo
<ul style="list-style-type: none"> • Densidad de plantas • Tiempo para el 90% de emergencia • Cobertura del dosel máxima (depende de la densidad de plantas y variedad)
Dependientes del suelo
<ul style="list-style-type: none"> • Profundidad máxima de raíces • Tiempo para alcanzar la profundidad máxima de raíces
Dependientes del suelo y del manejo
<ul style="list-style-type: none"> • Respuesta a la fertilidad del suelo • Estrés por salinidad del suelo

Tabla 3 - Lista de parámetros de cultivo que probablemente requieran ajustes para explicar las características de la variedad y el manejo y el ambiente local (FAO, 2012)

Suelo

En *AquaCrop*, el suelo se describe mediante un perfil de suelo y las características de la capa freática (si la hubiere). El suelo se puede subdividir en dirección vertical hasta en cinco capas de profundidad variable, en donde cada capa (u horizonte) se ajusta a diferentes características físicas del suelo: el contenido de humedad del suelo en el punto de saturación, el límite superior de contenido de agua por gravedad (comúnmente denominado capacidad de campo), el límite inferior de contenido de agua donde un cultivo puede alcanzar el punto de marchitez permanente, y la conductividad hidráulica en el punto de saturación (K_{sat}). Con base en estas características, *AquaCrop* deriva otros parámetros que rigen la evaporación del suelo, el drenaje interno y la percolación profunda, la escorrentía superficial y el ascenso capilar. Las características de la capa freática que se tienen en cuenta son su profundidad debajo de la superficie del suelo y su salinidad. Éstas pueden permanecer constantes durante la estación o variar a lo largo del período de simulación (FAO, 2012).

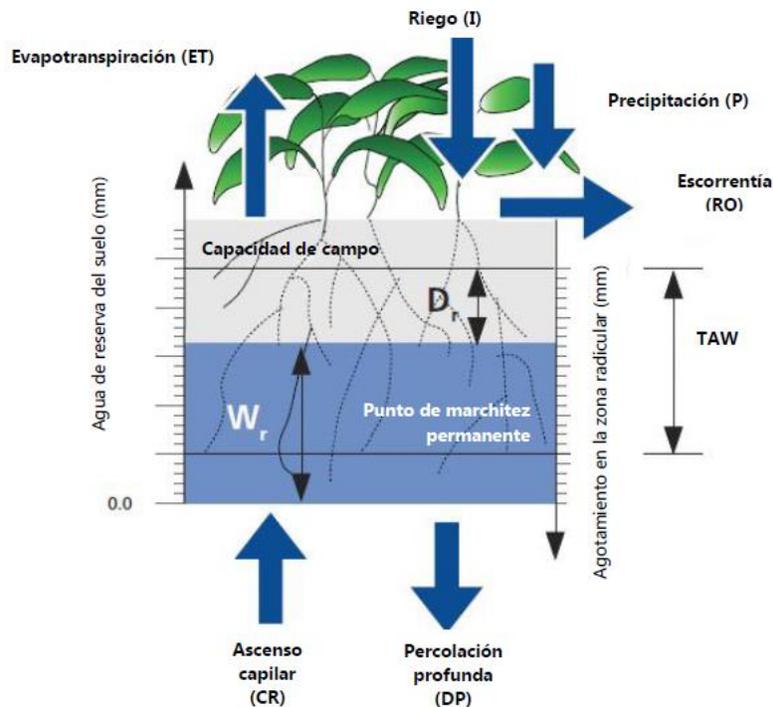


Figura 7 - Zona radicular descrita como un depósito (FAO, 2012)

Manejo

AquaCrop cuenta con dos paquetes dentro del módulo de manejo:

- Manejo de riego: aquí se proporcionan opciones para evaluar y analizar la producción del cultivo y el manejo y uso del agua bajo dos condiciones: secano o riego. Las opciones de manejo incluyen la selección de los métodos de aplicación del agua (aspersión, superficial o por goteo, ya sea superficial o subterráneo) definiendo el calendario en términos de tiempo, profundidad y calidad del agua de riego para cada aplicación, o permitiendo que el modelo genere automáticamente el calendario basado en un intervalo de tiempo fijo, profundidad fija por aplicación, o porcentaje fijo de agotamiento de agua permisible. Una característica adicional es la estimación de los requerimientos hídricos completos de un cultivo en un clima determinado (FAO, 2012).
- Manejo de campo: se consideran tres aspectos: fertilidad del suelo para el crecimiento del cultivo; acolchado del suelo para reducir evaporación; y uso de caballones para estancar el agua o controlar la escorrentía superficial y mejorar la infiltración (FAO, 2012).

Luego de realizar la simulación **AquaCrop** te permite observar diferentes resultados, entre los que se destacan: **rendimiento seco, lámina de riego aplicada, días en que se rego**. Estos dos últimos parámetros son muy importantes a los efectos de tener en cuenta la oportunidad de riego.

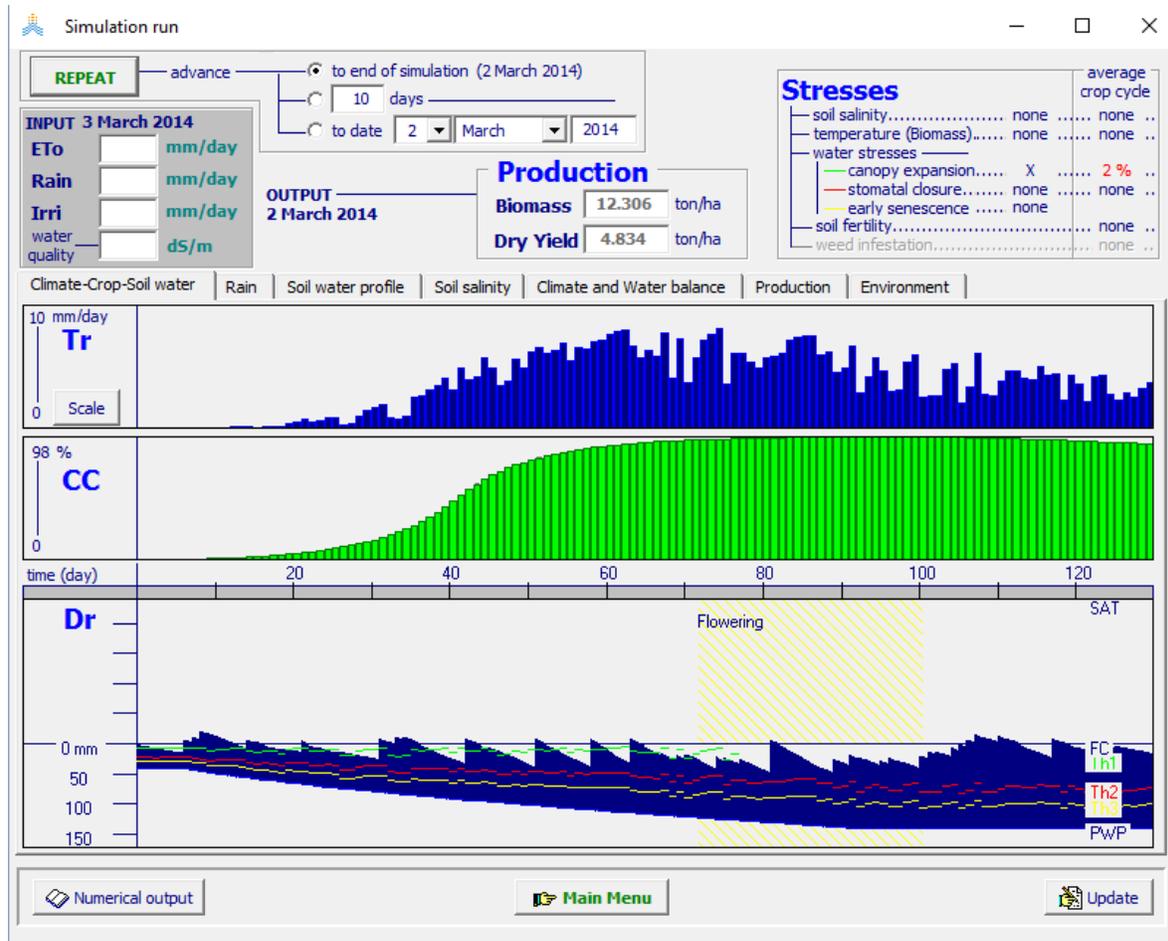


Figura 8 - AquaCrop. Ventana de simulación

4.3.2 Usos y ventajas del modelo

Dicho software es de utilidad tanto para proyectos de planificación como para la asistencia en la toma de decisiones agrícolas de riego o lluvia. Según lo menciona Fernández Esperanza, M. (2013) el modelo es útil en los siguientes aspectos:

- Para el desarrollo de estrategias de irrigación bajo condiciones de déficit hídrico.
- Para estudiar el efecto del rendimiento del cultivo en un lugar, el tipo de suelo, la fecha de siembra.
- Para estudiar el efecto del rendimiento del cultivo de varias técnicas de manejo de tierras.

- Para comparar la disponibilidad contra los rendimientos actuales en un campo, granja o una región, identificar las restricciones que limitan la producción del cultivo y la productividad del agua.
- Para predecir impacto del cambio climático en la producción de un cultivo.
- Para escenarios de simulación y propósitos de planificación de los economistas, administradores y gerentes del sector hídrico.

Además, según diferentes autores, el modelo tiene las siguientes ventajas:

- Es un modelo fácil de calibrar y validar.
- Facilita el análisis del rendimiento frente a diferentes condiciones.
- Permite comparar rendimientos reales con los esperados frente a condiciones óptimas de humedad en el suelo.
- Permite tanto el diseño como la optimización de sistemas de riego dado que se puede obtener el rendimiento frente a un incremento de agua.

4.4 DSSAT

El sistema de ayuda a la decisión en la transferencia de la agrotecnología (*DSSAT*) es un paquete informático que integra los efectos de suelo, el fenotipo del cultivo, el clima y el manejo y permite realizar preguntas del tipo "¿Qué pasaría sí?" y simular escenarios con sus resultados, que en caso de tener que realizarlos a partir de observación en campo se tardarían años.

Dicho software combina bases de datos de cultivos, suelos y clima en formatos estándares. El usuario es capaz de realizar simulaciones multianuales para diferentes estrategias de manejo de cultivo para muchos cultivos de cualquier parte del mundo. Dicho paquete también proporciona una herramienta que facilita la validación de los resultados comparándolos con resultados observados. Actualmente, *DSSAT* se encuentra en su versión v4.6, la cual incorpora datos de 28 cultivos y nuevas herramientas que facilitan la creación de archivos que simulan diferentes escenarios en cuanto a manejo de cultivo, suelo y clima.

Al momento de crear un modelo de cultivo se requieren datos de entrada como: información meteorológica diaria, superficie del suelo e información del perfil, y manejo de cultivos. La información genética de los cultivos se define en un archivo de especies de cultivos que lo provee *DSSAT* y la información del cultivo o variedad que debe ser proporcionada por el usuario. Las simulaciones son iniciadas o en la siembra o antes de la siembra, a través de la simulación de un período de barbecho desnudo. Estas simulaciones se llevan a cabo de forma diaria y en algunos casos horaria, según el proceso y modelo de cultivo. Al final del día se actualizan los balances de la planta y el agua del suelo, además del balance de nitrógeno y carbono, así como la etapa de desarrollo y estado vegetativo del cultivo (Fernández Esperanza, M., 2013).

Los componentes centrales del programa son los modelos de simulación y programas para facilitar su aplicación en diferentes regiones del mundo, las principales características que permite usarlo son: (1) entradas, organización, almacenes de datos de cultivo, suelo y agua; (2) recuperación, análisis y despliegue de datos; (3) calibración del modelo de crecimiento de cultivo; (4) simular diferentes prácticas de manejo del cultivo y (5) evaluar los riesgos económicos asociados con las diferentes opciones (Jones et al., 2001 citado por Rodríguez Arvizu, M., 2008).

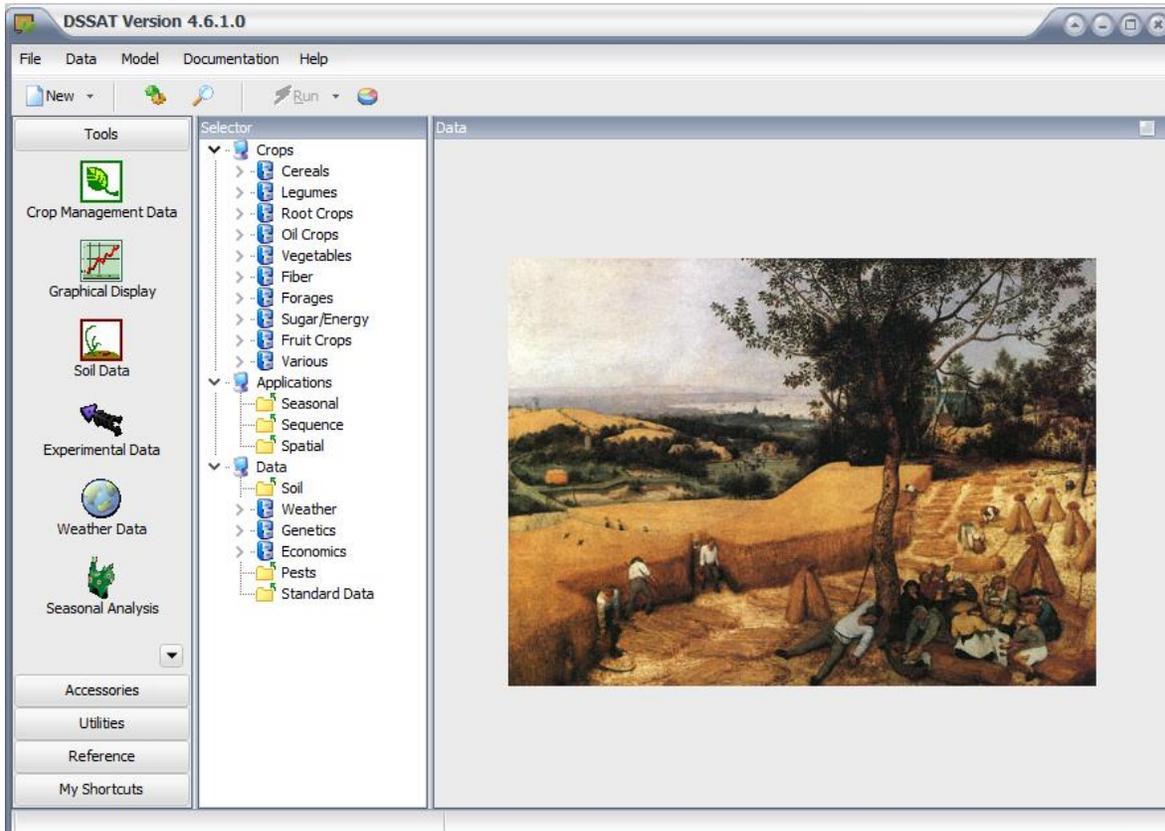


Figura 9 – DSSAT. Ventana principal

4.4.1 Modelos de cultivo

DSSAT incorpora diferentes modelos de cultivos y los ejecuta según el cultivo que se desea modelar. En la Figura 10 se aprecian los principales componentes y estructuras del software.

Cada módulo tiene seis fases, (iniciación de la ejecución, inicialización de la temporada, cálculos de tasas, integración, la producción diaria, y resumen de salida). El programa principal controla la sincronización de eventos: el inicio y parada de la simulación, principio y fin de la temporada de cosecha, así como los bucles de tiempo diario. Esta característica permite que cada módulo lea sus propias entradas (inputs), se inicie, calcule

tasas, integre sus propias variables de estado, y escriba las salidas con total independencia del funcionamiento de otros módulos.

Sólo unas pocas variables de "interfaz" se comunican hacia y desde cada módulo. Esto le permite a uno "desconectar" un módulo y sustituir por otro diferente, siempre que se comuniquen las mismas variables con el resto de los módulos, incluso si los parámetros, variables de estado, y los archivos de entrada del módulo son diferentes. El concepto de "variables de la interfaz" es fundamental para el enfoque modular utilizado en *DSSAT-CSM*.

Los modelos de cultivos de cereales fueron básicamente integrados en un programa conocido como el modelo genérico *CERES*, que incluye maíz, trigo, sorgo, mijo y cebada. El modelo de arroz es un modelo autónomo denominado *CERES-Rice*. Los modelos de leguminosas de grano (*SOYGRO*, *PNUTGRO*, y *BEANGRO*) funcionan con una estructura genérica de leguminosa, llamado *CROPGRO*. De todas maneras, se pueden añadir cultivos adicionales mediante el ingreso de la estructura modular e ingresando debidamente las variables que los modelos solicitan, las cuales se pueden apreciar en los manuales del software.

Resumiendo, se tiene:

- *CERES*: Maíz, arroz, trigo, sorgo
- *IXIM*: Maíz
- *SBUSTOR*: Modulo de crecimiento de papa
- *AROID*: Modulo de crecimiento de plantas de tubérculo
- *CROPSIM*: Módulos de crecimiento de la planta de cassava y trigo
- *CANEGRO*: Modulo de crecimiento para caña de azúcar.
- *CASUPRO*: Modulo de crecimiento para caña de azúcar.
- *CROPGRO*: Vegetales, legumbres, algodón.

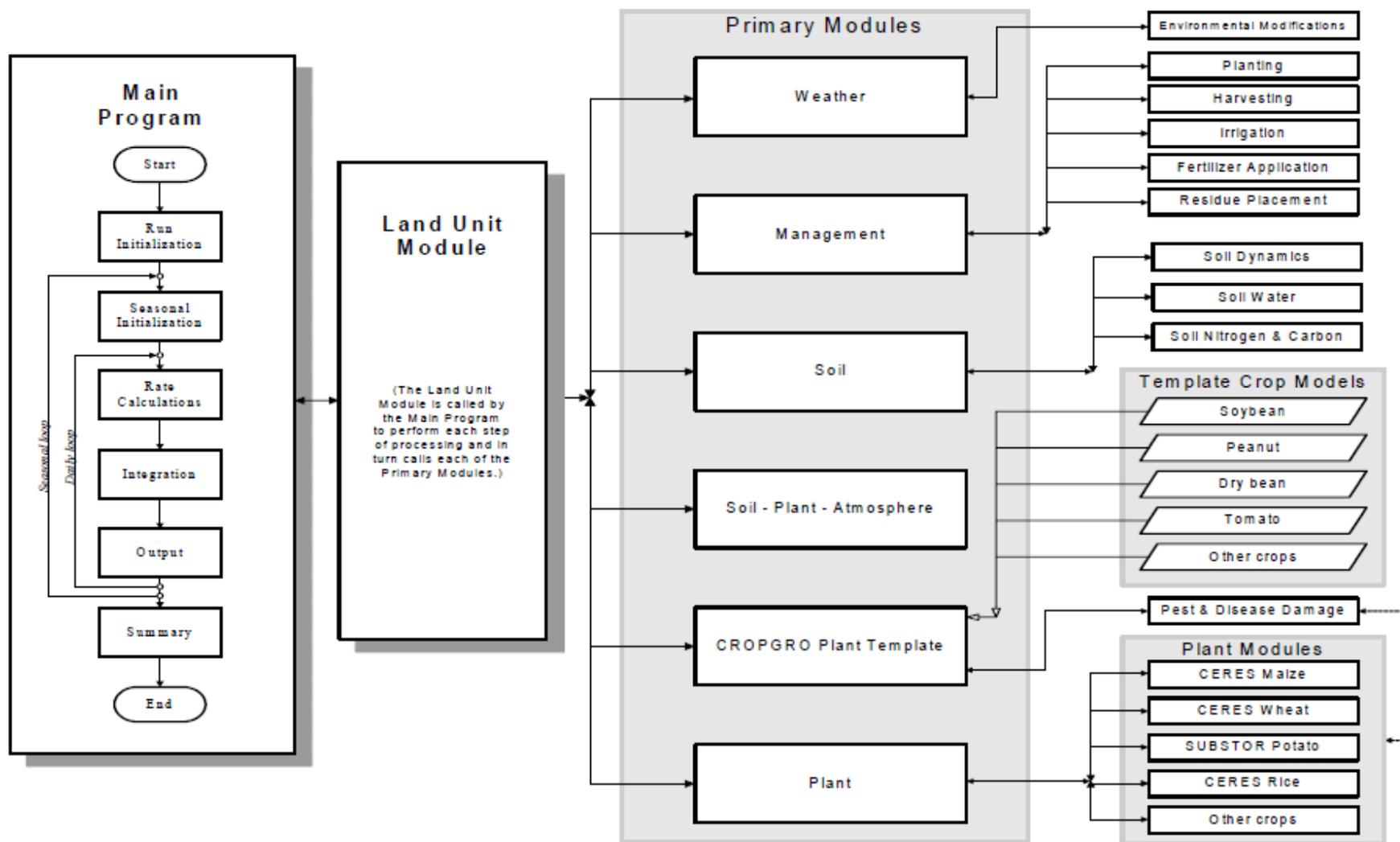


Figura 10 – DSSAT. Componente y estructuras (DSSAT manuals)

4.4.2 Parámetros de entrada

Es necesario ingresar información de cultivo, suelo y clima. Se debe contar con un conjunto mínimo de datos que permita ejecutar los modelos de cultivo y evaluar los resultados.

Los datos de clima se introducen a través de un ejecutable denominado *WeatherMan*, el cual solicita la siguiente información:

- Latitud y longitud de la estación climática.
- Radiación solar.
- Temperaturas (máxima y mínima).
- Humedad.
- Velocidad del viento.
- Horas del día.
- CO₂.

Se debe tener en cuenta que la información necesaria debe cubrir, como mínimo, el tiempo que se desea simular. De todas maneras, diferentes autores recomiendan iniciar la simulación unas semanas antes de la siembra y finalizar unas semanas después de la cosecha.

Respecto a los datos de suelo, que se ingresan en un ejecutable denominado *SBuild*, los parámetros más importantes son:

- Clasificación.
- Pendiente.
- Color.
- Permeabilidad y clase de drenaje.
- Profundidad de los horizontes
- Porcentaje de limo, arcilla y arena
- Densidad aparente
- pH
- Información de la raíz

Para el manejo de los datos, *DSSAT* cuenta con un ejecutable denominado *XBuild* en donde se debe incluir información sobre la fecha de siembra y cosecha, densidad de la siembra, distancia entre líneas, variedad de cultivo, tipo y características del drenaje, prácticas de fertilización, etc. A su vez, es necesario introducir datos de crecimiento del cultivo y agua del suelo. Es importante la inclusión de esta información dado que es necesaria para la evaluación del modelo.

Además, el software permite incorporar un plan de riego para estimar el rendimiento en función del agua aplicada, objeto del presente trabajo.

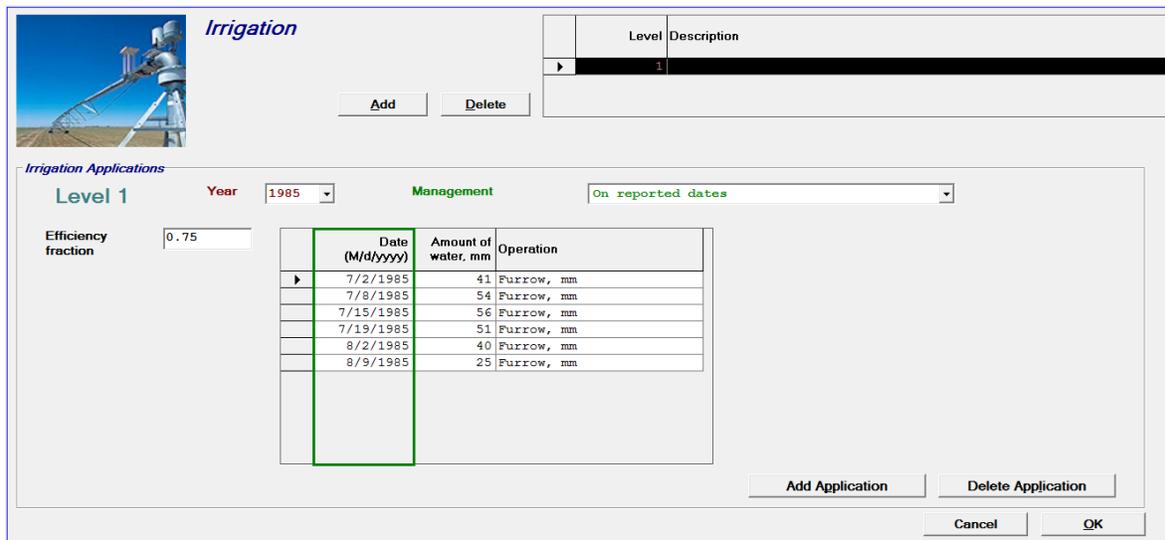


Figura 11 - DSSAT. Ejemplo ingreso plan de riego

Solo es posible establecer un plan de riego definiendo las fechas específicas en las que se desea regar o estableciendo en que días posteriores a la plantación se desea aplicar una lámina de agua. Lo anterior difiere un poco en relación al modelo de *Flinn* y *AquaCrop*, en donde se puede establecer la aplicación de una lámina de agua en función del descenso de la humedad en el suelo.

Para finalizar, una vez introducida la información necesaria, se procede a la simulación y posterior visualización de los resultados, a través del ejecutable denominado *GBuild*.

4.4.3 Usos, ventajas y desventajas

Según la revisión bibliográfica realizada, la presente herramienta es muy utilizada en diferentes partes del mundo debido a que es posible la modelación de muchos tipos de cultivos. Se entiende una de las más completas que existen actualmente en el mercado.

Por lo anterior se podría decir que dicha herramienta se puede utilizar en diferentes aspectos, tanto en la toma de decisiones como desde un punto de vista educativo e investigativo. Es por ello que actualmente existen muchos cursos en diferentes universidades orientados al comprender el software y poder utilizarlo de manera adecuada.

Una gran ventaja que tiene el software es que cuenta con una base de datos, generada a partir de datos experimentales, que permite obtener valores de parámetros que la mayoría de las veces son difíciles de adquirir o encontrar en bibliografía. Además, cuenta con una comunidad online que le permite a cualquier usuario evacuar diferentes dudas al respecto.

La gran desventaja que tiene *DSSAT* es que el modelo construido debe ser calibrado y modelado para un cultivo y región específica. Esto implicaría la necesidad de contar con datos experimentales.

Si bien todos los modelos de simulación deberían ser calibrados, desde el punto de vista ingenieril, resulta más conveniente la utilización de modelos que requiera la menor cantidad de parámetros de entrada, con el fin de obtener de manera más sencilla una estimación de los resultados.

4.5 CropSyst

CropSyst es un modelo de fácil manejo, conceptualmente simple y capaz de realizar simulaciones multianuales, multicultivo con una desratización temporal diaria. Este modelo se ha desarrollado con el fin de estudiar el efecto de los manejos del cultivo en la productividad y el medio ambiente. *CropSyst* simula el balance de agua, el balance del nitrógeno, el desarrollo de la cobertura del cultivo, el desarrollo radicular, la producción de la materia seca, la producción de residuos su descomposición y la erosión del suelo. Las principales opciones de manejo del modelo incluyen: selección del cultivo, rotación del cultivo, riego, fertilización nitrogenada, laboreo (hasta 80 tipos), y manejo del residuo.

CropSyst contiene dos módulos de nitrógeno y de agua. El módulo de agua incluye parámetros de precipitación, irrigación, escorrentía, intercepción, infiltración del agua, redistribución del agua en el perfil del suelo, transpiración del cultivo y evaporación. Los usuarios pueden seleccionar diferentes métodos para calcular la redistribución del agua en el suelo y la evapotranspiración de referencia. La primera es manejada por una aproximación de cascada simple o por aproximación de diferencia finita para determinar el flujo de agua en el suelo. Además, *CropSyst* ofrece tres opciones para calcular la ETo, los cuales son: el modelo de Penman-Monteith, el modelo de Priestley-Taylor y una simple implementación del modelo de Priestley-Taylor el cual solo requiere temperatura del aire. La evapotranspiración del cultivo es determinada del coeficiente del cultivo en un dosel lleno y la superficie del terreno determinado por el índice de área foliar del dosel (Stockle, 1996 citado por Fernández Esperanza, M., 2013).

4.5.1 Parámetros de entrada al modelo

CropSyst cuenta con cuatro componentes o archivos de entrada que se necesitan crear previo a la simulación, ellos son: datos meteorológicos, suelo, cultivo y manejo.

- Datos meteorológicos: es necesaria la inclusión de parámetros como temperatura máxima y mínima, lluvia, radiación solar, humedad y viento. Todos ellos se deben ingresar en forma diaria y algunos de ellos el software los puede estimar según la localización geográfica del proyecto.
- Datos de suelo: dentro de los más destacados se encuentra la textura, carbono orgánico, densidad aparente, capacidad de campo, punto de marchitamiento permanente y pH.

- Datos de cultivo: se requiere ingresar datos fenológicos, morfológicos, de crecimiento y residuales. Además, solicita parámetros de nitrógeno, índice de cosecha y tolerancia a la sal.
- Manejo: se pueden incluir datos de manejo programado o automático. Dentro de ellos se encuentra la irrigación, fertilización, labranza y manejo de residuos.

Cabe destacar que no todos los parámetros son necesarios a la hora de realizar la simulación, sino que existen algunos de carácter opcional que pueden evitarse de no contarse con un valor aproximado de ellos.

4.6 APSIM

El software *APSIM* (Agricultural Production Systems Simulator) es un marco de modelación modular desarrollado por la Iniciativa *APSIM* y su predecesora, la Universidad de Investigación de Producción Agrícola (*APSRU*) en Australia.

APSIM fue desarrollado para simular procesos biofísicos en sistemas agrícolas, en particular en lo que se refiere a los resultados económicos y ecológicos de las prácticas de gestión en la cara de los riesgos climáticos.

APSIM se estructura en torno a módulos de plantas, suelo y gestión. Estos módulos incluyen una amplia gama de cultivos, pastos y árboles, procesos del suelo incluyendo balance de agua, N y P, pH del suelo, erosión, y diferentes controles de gestión. *APSIM* resulta de una necesidad de herramientas que proporcionen predicciones exactas de producción agrícola en relación con el clima, el genotipo, el suelo y el factor de gestión.

El marco de modelación de *APSIM* se compone de los siguientes elementos:

- Un conjunto de módulos biofísicos que simulan procesos biológicos y físicos en sistemas agrícolas.
- Un conjunto de módulos de gestión que permiten al usuario especificar las normas de gestión que caracterizan el escenario que se está simulando y controlan la simulación.
- Varios módulos para facilitar la entrada y salida de datos hacia y desde la simulación.
- Un motor de simulación que impulsa el proceso de simulación y facilita la comunicación entre los módulos independientes.

Además de los elementos de infraestructura y ciencia, *APSIM* incluye:

- Varias interfaces de usuario para la construcción de modelos, pruebas y aplicaciones.
- Varias interfaces y bases de datos asociadas que permiten la visualización y el análisis más detallado de la producción.

- Varios modelos de desarrollo, pruebas y herramientas de documentación.
- Una web de fácil uso que proporciona documentación, distribución y solicitud de cambios.

APSIM se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo:

- Apoyo a la toma de decisiones a nivel de finca.
- Diseño de sistemas de cultivo para producción o gestión de recursos.
- Evaluación del valor de predicción climático estacional.
- Análisis de problemas de cadenas de suministro agroindustriales.
- Elaboración de directrices de gestión de residuos.
- Evaluación de los riesgos para la formulación de políticas.
- Como una guía para la investigación y actividades educativas.

Uno de los principales beneficios de *APSIM* es la capacidad de integrar modelos derivados de actividades de investigación fragmentadas. Esto permite la investigación de una disciplina o dominio para ser transportado en beneficio de alguna otra disciplina o dominio. También facilita la comparación de modelos o sub-modelos en una plataforma común.

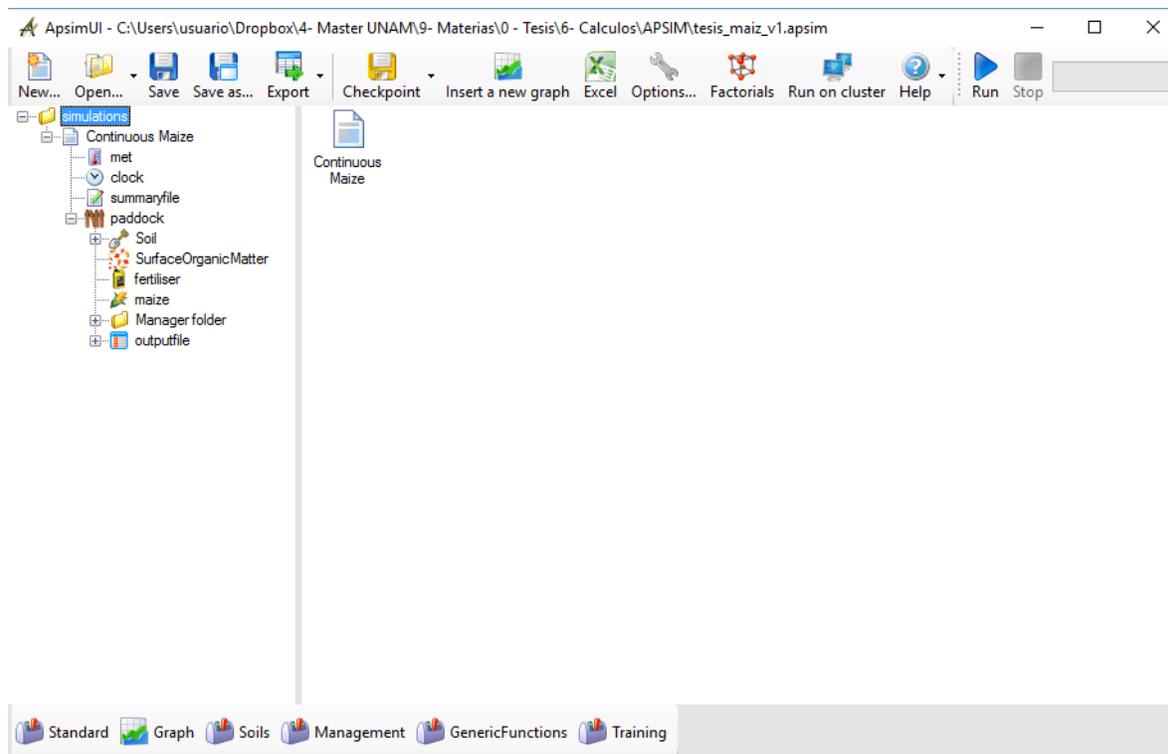


Figura 12 - APSIM. Ventana principal

De la misma manera que la mayoría de los paquetes de simulación mencionados, *APSIM* cuenta con una base de datos dentro de la cual existen diferentes tipos de simulaciones. La página web del software cuenta con una guía para aprender a utilizar el mismo, y

dentro de la cual recomienda cargar la simulación más parecida que este guardada en la base de datos, para luego si adaptarla al caso particular que se quiera simular.

4.7 Otros modelos

4.7.1 STICS

STICS es un modelo de cultivo con una desratización espacial diaria, el cual ha sido desarrollado desde el año 1996 en el *INRA* (Francia). Su principal objetivo es simular el efecto, tanto del medio físico como de las variaciones en el manejo del cultivo, en la producción y el medio ambiente a escala de campo. A partir de la caracterización del clima, el suelo, las variedades de cultivo y el manejo, calcula las variables de salida del modelo relacionadas con la producción (cantidad y calidad), con el medio ambiente como el drenaje y la lixiviación del nitrato y la evolución de las propiedades del suelo bajo cultivo.

4.7.2 DNDC

El modelo fue desarrollado por el Instituto de Estudios de la Tierra, los Océanos y el Espacio de la Universidad de New Hampshire – Estados Unidos. Como todo modelo, requiere el ingreso de diversos parámetros y variables para su funcionamiento, como información de clima, información sobre el suelo, e información de la gestión agrícola.

Dependiendo del propósito y objetivos del modelo de cultivo se puede distinguir dos grandes enfoques científico o explicativo, Ingenieril o descriptivo. El modelo de Desnitrificación - Descomposición (Denitrification - Decomposition / *DNDC*) es un modelo de simulación basado en los procesos de la bioquímica de carbono y nitrógeno en diversos agro-ecosistemas. El modelo puede ser utilizado para predecir el crecimiento del cultivo, la temperatura del suelo y los regímenes de la humedad, la dinámica del carbono del suelo, la lixiviación de nitrógeno y las emisiones de gases como el óxido nitroso (N_2O), el óxido nítrico (NO), nitrógeno (N_2), amoníaco (NH_3), el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) (Fernández Esperanza, M., 2013).

4.7.3 VegSyst

VegSyst-DSS es un software desarrollado en la Universidad de Almería por la Dra. M. Gallardo et al. y se encuentra disponible de manera gratuita en la página de dicha universidad (<http://www.ual.es/GruposInv/nitrogeno/VegSyst-DSS.shtml>). Actualmente se cuenta con la primera versión.

Según lo menciona el manual respectivo, el software fue desarrollado para calcular los requerimientos diarios de agua (riego) y fertilizante, y la concentración de solución de nutrientes (N) aplicada en cultivos de hortalizas fertirrigados, cultivados en invernaderos. También puede ser utilizados para cultivos en suelos o sustratos. Las necesidades de fertilizantes se basan en la absorción diaria de los cultivos y consideran el suelo mineral en la plantación. Los requerimientos de riego se basan en la evapotranspiración estimada

(ETc), y consideran una aplicación eficiente del riego y la salinidad del agua a utilizar. La ETc puede ser calculada utilizando la ecuación de Penman-Monteith.

VegSyst-DSS requiere muy pocos datos de entrada, los cuales son:

- Parámetros climáticos: temperatura del aire máxima y mínima diaria, humedad relativa (RH) y radiación solar.
- La cantidad de suelo mineral en la zona de la raíz.
- Detalles de la aplicación de estiércol más reciente.
- Diseño del riego.
- Características del suelo.

VegSyst-DSS se basa en el modelo de simulación de crecimiento *VegSyst*, el cual calcula la producción diaria de biomasa de los cultivos, la captación crítica N y la ETc para cultivos de hortalizas. El modelo de simulación corre para un tiempo determinado y se adapta a las variaciones en las condiciones climáticas proporcionando con ello las recomendaciones específicas de riego según las condiciones de cultivo dadas, como: época, momento de siembra, diseño del invernadero y materiales colocados. *VegSyst-DSS* asume que los cultivos no tienen limitaciones de agua y nutrientes, lo que generalmente sucede en la producción de hortalizas en invernaderos comerciales.

Cabe destacar que el paquete de simulación se encuentra disponible en la web hace muy poco tiempo y que, como se mencionó, se enfoca solamente en simulación dentro de invernaderos. De todas maneras, actualmente se encuentra en proceso la adaptación del modelo para cultivos en extensión.

4.8 Conclusiones del capítulo

Como se puede apreciar a lo largo del capítulo, existen diferentes modelos de simulación de cultivos, cada uno enfocado hacia algún objetivo, pero de acceso gratuito. Esto es importante porque le permite al usuario contar con diferentes herramientas en el mercado, dando la oportunidad de escoger la más acorde para ejecutar su proyecto y así obtener los resultados más adecuados para cada caso.

Sin embargo, vale la pena mencionar la importancia de comprender el fin de cada proyecto que se requiera evaluar, es decir, si es con fines ingenieriles o investigativos. Esto se refleja en la cantidad y diversidad de variables que los modelos requieren, que muchas veces son difíciles de obtener y en esos casos, no contar con datos para calibrar los modelos, puede resultar en estimaciones erróneas de los resultados.

Por ejemplo, el enfoque de la presente tesis en ingenieril, es decir, se requiere determinar las necesidades de agua de los cultivos en función del rendimiento final. Es por ello que se eligen dos modelos para las simulaciones, el modelo de *Flinn* desarrollado por la UNAM y el paquete de simulación *AquaCrop*, cuya elección se basa principalmente en la cantidad de variables necesarias y la falta de información para calibrar los modelos.

Por otro lado, si los objetivos fueran investigativos y se contara con datos experimentales, se podría utilizar el modelo *DSSAT*, el cual requiere un mayor número de variables y, según lo ya descrito, es uno de los más utilizados para este fin.

A grandes rasgos, se observa que en todos los modelos se necesita información de clima, suelo, planta y manejo del cultivo. La información de clima se podría obtener de una estación meteorológica (o pluviométrica) cercana al área de estudio, mientras que los datos de suelo y planta se podrían obtener de información experimental (ensayos, mediciones, etc.) o bibliográfica, dado que existen diferentes publicaciones al respecto. Por último, la información del manejo del cultivo es creada por el usuario, según el plan de manejo que se tenga en cada caso, por ejemplo, plan de riego o fertilización.

No obstante, cabe aclarar que existen más modelos que los mencionados en el capítulo y cuya información se encuentra disponible en la web.

5 TIPOS DE RIEGO Y SUS AVANCES TECNOLÓGICOS

Si bien se debe tener cuidado en la selección del modelo de simulación de cultivos, también es preciso detenerse en determinar qué tipo de riego es el más adecuado para cada situación particular.

El contar con información técnica, la cual se apoya en experimentos de campo, permitirá elegir adecuadamente el tipo de riego acorde a cada situación. Ello, sumado a la formación continua del agricultor y la utilización del equipamiento correcto permitirán aumentar la producción en las tierras de regadío, dado que se estará aprovechando de manera eficiente el agua que es factor limitante en la mayoría de los casos.

Los métodos de riego pueden clasificarse del siguiente modo:

- **Riego de superficie:** consiste en aplicar el agua al suelo por gravedad y engloba una gran cantidad de sistemas diferentes en los que el agua se aporta a la parcela y el suelo la distribuye a lo largo y ancho, cubriendo la totalidad o parte de la superficie. Es el tipo de riego más utilizado en el mundo debido a que se puede aplicar a prácticamente todo tipo de cultivos y es poco costoso en instalación y mantenimiento. Sin embargo, la mayoría de las veces no se consiguen buenas eficiencias, aunque se tenga un diseño adecuado del sistema.
- **Riego por aspersión:** consiste en aplicar el agua sobre la superficie en forma de lluvia, utilizando una red de riego que conduce el agua a una determinada presión hasta los elementos encargados de aplicarla, denominados aspersores. El agua que emiten los aspersores cae en forma de lluvia sobre el terreno y se infiltra, pasando por las diferentes capas de suelo y quedando así disponible para el cultivo. En dicho sistema es importante evitar la escorrentía superficial, dado que podría provocar la erosión del suelo. En comparación con el riego de superficie, se tienen eficiencias mayores, aunque los costos también aumentan.
- **Riego localizado:** consiste en aplicar el agua sobre (o bajo) la superficie del suelo utilizando tuberías a presión y emisores, de manera que solo se moja una parte del suelo, la más cercana a la planta. En este tipo de riego se recomienda se aplique el agua en cantidades pequeñas, pero con alta frecuencia, de manera que el contenido de agua en el suelo se mantenga en niveles casi constantes evitando así grandes cambios en la humedad del suelo, algo que sucede en los tipos de riego mencionados anteriormente. Un caso típico de riego localizado es el riego por goteo.

Además de los tipos de riego mencionados existe otro denominado riego subterráneo, el cual se realiza por control de la capa freática, pero que es poco utilizado mundialmente.

Con el transcurso del tiempo ha sido enorme el desarrollo de los equipamientos de riego. En el riego por gravedad, la tendencia es al abandono de los métodos tradicionales, en los que el agua es conducida “a punta de azada” por el regante. Merece ser destacado el desarrollo conseguido a través de la nivelación de precisión con el control por láser, en

particular el riego por canteros con nivelado de precisión y alimentación semiautomática, así como las innovaciones debidas a la adopción de diversos equipamientos para el suministro de agua a surcos y canteros, principalmente, con automatización (Santos Pereira, L. et al., 2004).

Los avances en términos de equipamiento son principalmente importantes en los sistemas a presión, aspersión y riego localizado, y se concentran tanto en aspersores y emisores como en sistemas de tuberías y rampas, equipamientos para la aplicación de fertilizantes y otros agroquímicos, o a equipamientos de control y automatización. Son tantas las innovaciones que la industria afirma, que es difícil que alguien se mantenga actualizado (Santos Pereira, L. et al., 2004).

Para elegir el tipo de riego adecuado se deben considerar diferentes factores. En la tabla siguiente se presenta un resumen de ellos, el cual fue desarrollado por Pereira y Trout (1999) y citado por Santos Pereira, L. et al., (2004).

Factores	Riego de superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Tabla 4 - Factores que favorecen la elección del método de riego (Pereira y Trout, 1999 citado por Santos Pereira, L. et al. 2004)

Luego de puesto en marcha el sistema de riego más adecuado, vale la pena analizar el funcionamiento del mismo. Para ello se utilizan los “indicadores de funcionamiento” los cuales inicialmente se utilizaban para determinar la calidad o gestión del proyecto, pero actualmente también se consideran como indicadores de la calidad del servicio o funcionamiento, así como indicadores ambientales. En la actualidad, la existencia de modelos computarizados para simular el funcionamiento de los sistemas, permite utilizar dichos indicadores para establecer criterios a los que los sistemas deben ser capaces de responder (Santos Pereira, L. et al., 2004).

Dado que estos indicadores se detallan en diversas bibliografías sobre riego, solo se va a realizar una breve descripción de los más importantes:

- Uniformidad: los indicadores más utilizados son la uniformidad de distribución (utilizado en riego por superficie), coeficiente de uniformidad (utilizado en riego por aspersión) y uniformidad estadística. Las bajas uniformidades se traducen en condiciones de exceso o déficit de infiltración en el suelo, provocando pérdidas de producción, de agua y fertilizantes.
- Eficiencia: las bajas eficiencias indican que parte del agua aplicada no es utilizada para la producción y, por lo tanto, se pierde.

En los siguientes subcapítulos se mencionarán aspectos de los diferentes tipos de riego, pero sin entrar en demasiado detalle en la descripción y el diseño, sino que se hará hincapié en los avances que han tenido hasta el momento. Sin embargo, para más detalle se recomienda leer los siguientes documentos: *Manual de riego para agricultores* (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010); *El riego y sus tecnologías* (Santos Pereira, L. et al., 2004); *National Engineering Handbook. Part 623. Irrigation* (United States Department of Agriculture, 1991); *Irrigation Guide* (United States Department of Agriculture, 1997).

5.1 Riego por superficie

El riego por superficie es un método que ha ido variando según las necesidades y recursos de cada región. Se pueden realizar en múltiples condiciones de topografía y distintas disponibilidades de agua gracias a los diferentes tipos de riego y sus variantes. Los tipos de riego por superficie más comunes son:

- Riego por inundación: en este sistema el terreno se divide en compartimientos cerrados separados por medio de diques, se aplica cierto volumen de agua que inunda el compartimiento y luego se infiltra en el terreno.
- Riego por melgas: en este caso el terreno se divide en fajas rectangulares estrechas, llamadas melgas, separadas unas de otras mediante caballones dispuestos longitudinalmente. El agua ingresa a la melga por medio de un canal o tubería de abastecimiento, discurre a lo largo de las fajas infiltrando parte en el terreno, y el exceso se capta en un canal de desagüe.
- Riego por surcos: existen dos tipos, con pendiente o a nivel. En este caso el surco se distribuye por surcos paralelos, de forma que se infiltra por el fondo y costados de los mismos.

Para resolver el riego por superficie básicamente se tienen en cuenta dos ecuaciones: continuidad (5.1) y cantidad de movimiento (5.2). Para la resolución del problema, actualmente se utilizan modelos de simulación, entre los que se destacan el *SRFR* y *SIRMOD*, aunque existen otros como *EDRIS* y *REGRAV*.

$$\frac{dA}{dt} + \frac{dQ}{dx} + I = 0 \quad (5.1)$$

Donde t es el tiempo (s), Q es el gasto (m^3/s), x es la distancia según la dirección del escurrimiento, A es el área de la sección de escurrimiento (m^2), e I es la tasa de infiltración por unidad de longitud ($m^3/s/m$).

$$\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{v}{gA} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = s_0 - s_f - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (5.2)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad (m/s^2), S_0 es la pendiente del surco, canchero o melga, S_f es la pendiente de la línea de energía (m/m), v es la velocidad de escurrimiento (m/s), e y es el calado de escurrimiento (m).

De la misma manera que con los modelos de simulación de cultivos, éstos modelos de simulación son de uso limitado, dado que en muchas zonas no se dispone de datos necesarios para parametrizar los modelos. Además, dado que este tipo de riego depende en gran medida de la calidad de la nivelación del terreno y prácticas de manejo del suelo, se genera dificultad en la capacidad de predicción de los modelos. Sin embargo, manejar con cuidado estos modelos permite tomar decisiones tanto en diseño como en búsqueda de soluciones para mejorar el funcionamiento de sistemas existentes.



Figura 13 - Diferentes opciones de riego por superficie (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010)

Ventajas	Desventajas
No se requiere energía para aplicar el agua	Variabilidad en la infiltración de agua
Bajo coste de inversión y mantenimiento	Precisa una pendiente reducida y uniforme
Son aptos para lavado de sales	Menor eficiencia si el manejo es incorrecto
Estructuras de control, facilidad y economía	No es bueno para riegos someros en suelo ligeros
Se pueden usar aguas de mala calidad, aunque no salinas	Requieren una explanación precisa
No afectados por las condiciones del clima	Los riegos has de programarse teniendo en cuenta otras prácticas

Tabla 5 - Ventajas y desventajas del riego por superficie (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010)

5.1.1 Avances y mejoras en riego por superficie

Los métodos y procesos de riego existentes pueden ser mejorados en sus eficiencias y uniformidades de distribución cuando se puedan adoptar determinados equipamientos y técnicas operacionales recientes. No obstante, es condición previa que los sistemas de riego se adecúen a los criterios de proyecto de explotación propios del método de riego. En caso contrario, las mejoras no pueden alcanzarse debido a la inadecuación del proceso de riego a las condiciones de aplicación (Santos Pereira, L. et al., 2004).

Precisión en la nivelación de los terrenos

Según diferentes autores, el poder contar con una adecuada precisión en la nivelación es fundamental para el correcto funcionamiento del riego por superficie. Esto se debe a que las características que definen el sistema dependen de la pendiente longitudinal, es decir, con pendientes excesivas se tienen velocidades elevadas de escurrimiento, y con irregularidades en superficie se puede generar escurrimiento lento o encharcamiento excesivo y, por lo tanto, baja uniformidad de distribución.

El contar con una buena nivelación del terreno se obtiene: ahorros en consumo de agua, control en pérdidas de fertilizantes e impactos económicos favorables, debido a que el cultivo se desarrolla de manera más uniforme

En ese sentido, se puede utilizar equipamiento láser para el nivelado de precisión. Con éste equipo resulta fácil dar a la parcela las inclinaciones longitudinal y transversal requeridas, con gran precisión, haciendo que más del 80% del área nivelada se sitúe en el intervalo de $\pm 1.5\text{cm}$ respecto a la cota media de la parcela (Santos Pereira, L. et al., 2004).



Figura 14 - Equipo de nivelación por láser y parcela nivelada con dicho equipo (Santos Pereira, L. et al., 2004)

Reutilización de caudales drenados

Otra opción en mejoramiento de eficiencias en riego por superficie es la reutilización de los gastos excedentes. Diferentes autores han realizado investigaciones al respecto y actualmente lo mencionan como una alternativa para el ahorro del agua, algo bien visto desde el punto de vista ambiental. De todas maneras, dado que el agua excedente se recolecta en las zonas bajas sería necesario almacenar dicho excedente y bombearlo para transportarlo al inicio del canal de distribución, lo que implica un aumento en los costos.

Automatización en distribución de agua en surcos

Según Santos Pereira, L. et al., 2004, la automatización de los mecanismos de distribución de agua comienza con la utilización de tubos perforados de dimensión regulable a través de válvulas distribuidas para el control de caudales derivados por los orificios. Por tanto, el uso de válvulas de baja presión permite regular los caudales de manera manual o por comando automatizado.

Para automatizar el sistema se ha buscado recurrir a componentes neumáticos en las válvulas de baja presión, utilizando aire comprimido, o recurriendo a mecanismos de relojería o, más recientemente, a sistemas computarizados, regulando tiempo y volumen. Sin embargo, dicho autor aclara que el control a distancia se ha intentado recurriendo a sistemas de emisor-receptor de radio, pero sin éxito comercial.

De manera similar que la utilización de válvulas, se pueden automatizar los riegos por melgas utilizando compuertas verticales que abran o cierren por medio de sistemas automáticos.

Variantes en la forma de aplicar el agua

Para lograr una mejoría en uniformidad de distribución y eficiencia existen diferentes formas de aplicar el agua, como los son:

- Riego por recorte
- Riego intermitente o por oleadas
- Riego con caudales decrecientes

Resumiendo, como el riego por superficie se caracteriza por ser un riego por gravedad (no requiere gastos energéticos) y de bajo costo, resulta interesante contar con una buena nivelación del terreno y realizar prácticas adecuadas de manejo de suelo y agua para lograr eficiencias aceptables y, por lo tanto, mejorar los rendimientos.

5.2 Riego por aspersión

El elemento clave en este tipo de riego son los aspersores, los cuales actualmente se encuentran en una gran variedad en el mercado y, según su colocación y movimiento en el sistema, se pueden tener diferentes variantes:

- **Sistema de aspersión móvil:** en este caso tanto las tuberías como los aspersores se cambian de posición manualmente. En comparación con el resto de los sistemas de aspersión, éstos requieren una menor inversión inicial pero su coste de manejo es muy alto al necesitar elevada mano de obra para los cambios de posición. Si bien se adapta a cualquier forma de parcela, este tipo de riego no se puede automatizar y la flexibilidad para aplicar los riegos frecuentes es limitada.
- **Sistemas de aspersión fijo:** todas las tuberías están enterradas y el terreno queda bajo la cobertura de aspersores instalados de forma permanente. Al contrario que el sistema anterior, estos tienen un coste inicial más elevado, pero disminuyen los costos de operación dado que no es necesario trasladar los equipos. Es posible adaptarlos a la forma de la parcela y permiten realizar un manejo flexible del riego.
- **Sistema de aspersión autopropulsado:** los aspersores están instalados en una estructura que se mueve progresivamente, a medida que se va regando. A esta categoría pertenecen los cañones de largo alcance y los pivotes centrales. Los pivotes centrales tienen un coste de inversión intermedio y de operación muy bajo. Al igual que el caso anterior se puede automatizar, pero no se adapta a todas las formas de parcela y el manejo del riego queda condicionado con la velocidad de giro del pivote. Se debe tener especial cuidado a la hora del diseño dado que los altos caudales de los aspersores pueden provocar escorrentías en terrenos poco permeables.

Todos los tipos de riego por aspersión pueden lograr eficiencias y uniformidades elevadas siempre que se tenga un buen diseño y un manejo adecuado de los equipos.

Respecto a los aspersores se pueden encontrar muchas variantes en mercado y se clasifican de diferentes maneras:

- Según el mecanismo de giro:
 - Aspersores de impacto: el giro se consigue mediante el impulso del chorro del agua sobre un brazo oscilante que se desplaza y vuelve a su posición inicial gracias a un muelle recuperador.
 - Aspersores de turbina: su giro es continuo empleando la presión del agua a su paso por un mecanismo de engranajes que va unido al cuerpo del aspersor.
 - Aspersores rotativos: poseen una o varias boquillas orientadas de forma que la reacción al cambio de dirección del movimiento del agua produce la rotación del aspersor,
- Según el área mojada:
 - Aspersores circulares: aquellos que mojan una superficie de terreno en forma circular.
 - Aspersores sectoriales: aquellos que tienen la opción de girar sólo en un sector circular.
- Según la presión de trabajo:
 - De baja presión: suelen trabajar a presiones menores a 2.4 kg/cm^2 . Por lo general generan un caudal menor a 1000 L/h.
 - De media presión: trabajan a una presión entre 2.5 y 4 kg/cm^2 pudiendo suministrar caudales entre 1000 y 6000 L/h.
 - De alta presión: trabajan con presiones mayores a los 4 kg/cm^2 y suministrar caudales entre 6000 y 40000 L/h.



Figura 15 - Pivote central Valley funcionando (www.valleyirrigation.com)



Figura 16 - Diferentes tipos de aspersores funcionando (www.senninger.com)

Con el paso del tiempo, las grandes mejoras que están teniendo los sistemas de riego por aspersión provocan que la modernización de los regadíos para cultivos herbáceos extensivos sea por medio de estos sistemas, en especial, instalando pivotes centrales.

5.2.1 Fabricantes

La gran inversión inicial que requieren estos tipos de sistemas y el costo adicional que implica su funcionamiento lleva al productor a una selección adecuada del equipo, con el fin de lograr la mayor eficiencia posible y con ello aumentar los rendimientos. En base a ello, los fabricantes están en un continuo intento de lograr mejorías en los equipos existentes o innovar en nuevos equipos que permitan satisfacer las necesidades de los agricultores. Hoy en día existen diferentes empresas que se destacan en el rubro, algunas de las cuales vale la pena mencionar:

- *Valmont Irrigation*: Por más de 60 años, la empresa ha liderado la industria del pivote central y el riego lineal, proporcionando equipos de riego de precisión acompañados de avances tecnológicos constantes. La marca *Valley* ofrece soluciones hacia cubrir la creciente demanda mundial de alimentos a través de equipos capaces de proporcionar aplicaciones de agua, productos químicos y fertilizantes con mucha precisión, lo que resulta en el mejoramiento del

rendimiento del cultivo, menor costo de mano de obra, consumo de energía más eficiente y ahorro de agua.

- *Reinke*: es una empresa americana creada en 1954 y que en 1968 puso en uso el primer sistema en el mundo de pivote central reversible eléctrico, siendo actualmente una de las empresas más experimentadas y grandes del mundo en el sector de riego.
- *TL Irrigation Company*: cuenta con más de 55 años de dedicación en la industria del riego que la hace un fabricante de clase mundial en sistemas de pivote hidrostático dirigido. Ha introducido un equipo útil en el sistema de estructura, de fácil instalación y que permite superar obstáculos de campo, tales como estanques arroyos, etc.
- *Lindsey Corporation*: empresa americana fundada en la década del 50. Actualmente ofrece soluciones a medida para cada campo. Desde sistemas de bombeo a sensores de humedad y controles avanzados de posicionamiento GPS, la empresa tiene un producto para cada agricultor.
- *Briggs Irrigation*: empresa creada en 1985, ha desarrollado una creciente gama de sistemas de riego eficiente y sistemas de dispersión de agua sucia. La empresa se ha concentrado en el riego tanto de agricultores como de granjeros o cultivadores. Actualmente fabrica y comercializa una gama de equipos de riego avanzado que son utilizados exitosamente en el Reino Unido y en diferentes partes del mundo.
- *Senninger*: es un líder fabricante y diseñador de productos de riego patentados, Desde 1963, han desarrollado aspersores, boquillas de aspersión, reguladores de presión y otras herramientas de riego de bajos consumos hidráulicos y energéticos para la agricultura, la minería, la aplicación de efluentes, e incluso la industria láctea.
- *Nelson*: situada en Washington, Estados Unidos, se especializa en el diseño, el desarrollo, la fabricación y la venta de productos patentados para el mercado del equipo de riego agrícola. Se dedica a mejorar las técnicas de riego agrícola de punta y actualmente cuenta con una gama completa de productos que permiten satisfacer diferentes necesidades en el área.

5.2.2 Paquetes de simulación

Dadas las variables que juegan un papel importante en este tipo de riego, como los son el tipo de suelo, de cultivo, el viento, la pendiente del terreno, etc, los fabricantes cuentan con paquetes de aspersores que se ajustan a las necesidades. Para determinar cuál de ellos es el conveniente, cada proveedor cuenta con modelos de simulación que permiten evaluar cómo sería el funcionamiento del equipo bajo ciertas condiciones. Además, muchos de estos modelos permiten diseñar y evaluar diferentes tipos de riego a presión, determinando diámetros de tuberías, dimensionado del equipo de bombeo, tiempos de funcionamiento, etc.

Por ejemplo, el software denominado *irriExpress* (Quick and Simple Irrigation Design Software) cuyo sponsor es la empresa *Senninger*, es un software que combina datos

relevados, CAD y funciones de cálculo de riego para realizar diseño o evaluar sistemas existentes. Este paquete permite:

- Analizar y comprender rápidamente la hidráulica del sistema, permitiendo ver las presiones en las válvulas, velocidades en tuberías, etc., de manera de poder actualizar la presión en la bomba.
- Es posible asignar turnos en el diseño de riego para ahorrar energía.
- Permite ver gráficamente los resultados y detectar cualquier problema que surja durante el diseño.
- Tiene la capacidad de adaptar el proyecto de riego a los mapas de Google, determinando alturas en el terreno considerado.
- Es posible diseñar diferentes tipos de sistemas: pivotes, aspersión por movimiento frontal, riego por goteo, etc.
- Luego del diseño es posible crear informes en formato PDF, extraer imágenes en dos o tres dimensiones, etc.

El software no es gratuito, pero es posible descargar una versión demo para probarlo durante unos pocos días. No obstante, según su página web, más de 2000 compañías alrededor del mundo utilizan el software.

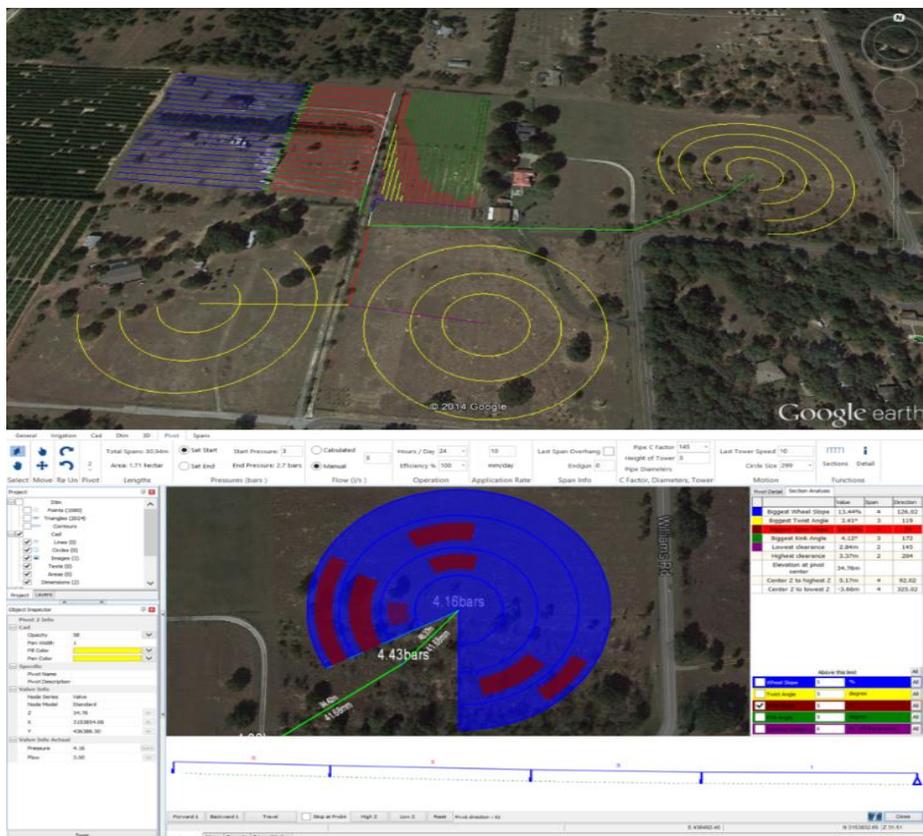


Figura 17 - irriExpress (www.irriexpress.com)

Existen también algunas herramientas de cálculo que son gratuitas como las desarrolladas por *United States Department of Agriculture (USDA)*, que se encuentran disponibles en su página web o se pueden solicitar vía correo electrónico. Una de ellas es una hoja de cálculo denominada *CPED (Central Pivots Evaluation and Design)* que permite evaluar el rendimiento de un pivote central. El modelo simula la distribución de agua en virtud de varias boquillas comerciales, así como lleva a cabo una evaluación por medio de captura de datos. Otra de las herramientas de diseño es *Pivot Design*, también es una hoja de cálculo que permite tanto el diseño como la evaluación de pivotes centrales, a través del cálculo de requerimientos de caudal y presión, superficie, tamaño de tubería, tamaño de la bomba, etc. Por último, la USDA cuenta con una hoja de cálculo que permite determinar si hay escurrimiento superficial en un pivote central a través de la selección de un paquete de aspersores.

En la actualidad existen diferentes paquetes de simulación de riego por aspersión, gratuitos o no, pero que permiten realizar un diseño del sistema de manera correcta. Además, los proveedores de los equipos cuentan con personal capacitado para guiar a los diseñadores o agricultores a adquirir los equipos más adecuados a cada situación.

5.2.3 Nuevas tecnologías

Ya se mencionó que los fabricantes se encuentran en un continuo intento de mejorar los equipos y diseñar nuevas herramientas que mejoren los rendimientos y ahorren energía, agua y tiempo. En la actualidad es posible manejar los equipos a distancia de manera eficiente, sin tener que estar en el terreno al momento de encender o apagar los sistemas de riego.

Por ejemplo, la empresa *Valmont Irrigation* ofrece pivotes centrales, sistemas lineales, sistemas para esquinas, dobladores y *Drop Span* que cuentan con un control tecnológico elevado. Ofrecen paneles de control, herramientas de GPS, aplicación para celular y computadoras, y una nueva tecnología denominada *Variable Rate Irrigation (VRI)*. Con todas estas herramientas el productor es capaz de controlar, a distancia o en el campo, todas las funciones de los equipos instalados, además de que puede observar en qué posición se encuentra su sistema.

La tecnología VRI es lo último en lo que a precisión se refiere. Con ella es posible variar la velocidad de los equipos en cualquier tramo y determinar que aspersores y en qué momento deben estar encendidos o apagados. Esto es importante dada la variedad topográfica que se tiene en los campos de manera que, si el equipo debe pasar por una zona baja donde no sería necesario aplicar riego, con la tecnología VRI es posible que en esa zona los aspersores se apaguen y el sistema aumente su velocidad, de manera de ahorrar tiempo, agua y energía. Una vez estudiada el área que se desea regar, es posible establecer una "receta" VRI y cargarla al equipo para que éste trabaje sin necesidad de un control constante.



Figura 18 - Tecnologías Valmont Irrigation (www.valleyirrigation.com)

Para los aspersores, las nuevas tecnologías apuntan a que funcionen a baja presión, dado que esa tecnología proporciona soluciones que reducen el consumo de energía. Pueden operar a 10-20 PSI, que es significativamente menor y más eficiente que las generaciones anteriores de rociadores.

Por lo tanto, se podría decir que los fabricantes apuntan a tecnologías que permitan a los agricultores definir las zonas donde se debe regar y en qué cantidad, variar las velocidades de funcionamiento de los equipos, proporcionar aspersores que trabajen a presiones bajas y realizar un seguimiento total de su sistema tanto local como remoto. Todo lo anterior se reduce a un mejoramiento de las diferentes herramientas con el fin de utilizar de manera correcta el agua, reducir costos energéticos y aumentar los rendimientos.

5.3 Riego localizado

El riego localizado consiste en aplicar agua sobre la superficie del suelo, o bajo éste, utilizando tuberías a presión y emisores de diversas formas, de manera que sólo se moja una parte del suelo, la más próxima a la planta. El agua aplicada por cada emisor moja un volumen de suelo que se denomina bulbo húmedo.

A diferencia de los tipos de riego anteriores, en el riego localizado la importancia del suelo como reserva de humedad para las plantas es muy pequeña. Su función principal es ser soporte físico de las plantas, así como proporcionar el agua y los nutrientes, pero en volumen reducido (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010).

Dada la conveniencia de aplicar agua y fertilizantes en cantidades pequeñas y con alta frecuencia, en este tipo de irrigación el número de riegos por campaña es elevado. De esta manera se intenta que el contenido de agua en el suelo se mantenga en niveles casi contantes, evitándose así grandes fluctuaciones de humedad en el suelo.

Los riegos localizados se pueden agrupar según el caudal que proporcionan los emisores. Suele englobarse con el término “riego por goteo” a todos los riegos localizados en los que se aplica bajo caudal, utilizando los emisores demonizados goteros, tuberías goteadoras, o tuberías exudantes. Los riegos localizados de alto caudal pulverizan el agua, que se distribuye a través del aire hasta el suelo y suelen aplicarse con los emisores denominados micro aspersores y difusores (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010).

Ventajas	Desventajas
Posibilidad de automatización total	Alto valor de la inversión inicial
Permite la aplicación de abonos en el agua de riego adaptándose a las necesidades del cultivo	La red de tuberías en superficie hace prácticamente inviable su adopción en cultivos anuales extensivos y grandes superficies
Posibilita el control total sobre el suministro hídrico de las plantas. Esto permite provocar estrés o garantizar una humedad óptima en los momentos del ciclo del cultivo que se desea	Sensibilidad de los goteros a las obstrucciones, lo que obliga a un equipo de filtrado y cuidados minuciosos
Ahorra agua respecto a otros tipos de riego, eliminando pérdidas durante el transporte y reduciendo la evaporación directa del suelo al mojarse solo una parte del terreno	

Tabla 6 - Ventajas y desventajas del riego localizado



Figura 19 - Aplicación de agua mediante riego localizado (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2010)

De la misma manera que el riego por aspersión el riego localizado ha tenido avances tecnológicos importantes en los últimos años, siempre siguiendo la línea de automatización del sistema, ahorro de agua y energía, y mejorando la producción final del cultivo.

5.3.1 Fabricantes

Hoy en día existen muchas compañías en el mercado que ofrecen equipamiento y soluciones dentro del riego localizado, algunas de las más importantes son:

- *Toro Company*: empresa fundada en 1914 y cuyo propósito es ayudar a los clientes a potenciar la belleza, la productividad y la sostenibilidad de la tierra. Además, su misión es ofrecer un nivel superior de innovación y asistencia al cliente.
- *Jain Irrigatio Systems Ltd.*: empresa de origen indio fundada en 1963 y que actualmente cuenta con más de 10000 empleados en todo el mundo, lo que estableció su liderazgo en diversos productos de micro-riego y riego con emisores.
- *Netafim*: empresa israelí creada en 1965 y cuya decisión era crear un nuevo invento en riego por goteo, teniendo en cuenta que su economía se basaba en la

agricultura y que se ubicaban en una zona árida. Hoy en día son líderes mundiales en sistemas de riego por goteo y proyectos agrícolas.

5.3.2 Paquetes de simulación

Existen, al igual que en aspersión, software para diseñar proyectos de riego localizado. Además, los fabricantes brindan ayuda a los diseñadores en la selección de los equipos más adecuados para cada caso en particular.

Una de las herramientas computacionales para el diseño de riego por goteo es *AquaFlow* de la empresa *Toro*. Este software es de acceso gratuito y permite diseñar un sistema de riego por goteo a través de una interfaz gráfica amigable, en donde los resultados se revelan al instante, así como un diagrama de uniformidad de riego codificado a color. Incluye funciones de diseño de líneas laterales, secundarias, de lavado y principales. Permite ejecutarse tanto en inglés como en español y da la posibilidad de manejar el cálculo en sistema métrico o estándar inglés.

Esta herramienta permite diseñar el riego por goteo de manera fácil y precisa, utilizando la tecnología en diseño computarizado, técnicas de programación y formatos de pantalla para optimizar el diseño del sistema. Los diseñadores pueden evaluar más opciones rápida y eficazmente, mejorando la selección de componentes de un sistema de riego por goteo. Como resultado se obtiene un sistema de riego preciso, eficiente y de mayor rendimiento para el agricultor (Toro, 2014).

Netafim ofrece *HydroCalc PRO*, software de diseño de sistemas de riego. Es una herramienta fácil de usar y que permite realizar cálculos hidráulicos básicos, *HydroCalc PRO* permite a los diseñadores, distribuidores y usuarios finales evaluar el desempeño de componentes de micro-riego en el campo, tales como: laterales de goteo y micro aspersión; redes secundarias y líneas principales (por ejemplo, PVC, PE); válvulas; cálculos energéticos.

5.3.3 Nuevas tecnologías

Unos de los pioneros en el riego localizado son los israelitas, los cuales quizás no hayan logrado ningún otro avance tan significativo en el agro como el que hicieron en el riego por goteo. Un ejemplo de cómo este método ha tenido impacto en la provisión de alimentos es *Tipa*, un kit desarrollado en Israel que ha permitido a familias agricultoras de Senegal recoger cosechas tres veces al año en lugar de una sola, incluso en tierra infértil.

Hoy en día, con los avances logrados, los modelos nuevos se limpian solos y mantienen una velocidad de flujo uniforme, independientemente de la calidad y presión del agua. Los sistemas de riego actuales pueden evitar un 20% la evaporación de agua y ahorrar hasta el 80% el consumo de agua.

Cada elemento que compone el sistema de riego localizado mejora día a día. Los aspersores, al igual que con el riego por aspersión, mejoran en su eficiencia de aplicación de agua utilizando menores presiones de trabajo. Respecto a las tuberías, aparecen nuevos materiales que son eficientes y reducen costos. Los sistemas de bombeo y filtros

también logran mejorías, que llevan a mejorar eficiencias y mantener al sistema funcionando adecuadamente.

Hoy en día es posible automatizar todo el sistema e incorporar la energía solar como la fuente de abastecimiento energético a este tipo de proyectos, tanto en invernaderos como en riego localizado en mayores extensiones.

5.4 Lluvia Sólida

“Lluvia Sólida” o “Silos de agua” es un retenedor de agua que se incorpora al suelo con el fin de absorber y mantener grandes cantidades de agua y nutrientes. Este producto es un polvo granulado de potasio biodegradable, no tóxico, capaz de absorber hasta 200 veces su peso en agua. Actúa como un reservorio de agua que permite que entre el 65% y 80% del agua almacenada sea tomada por el sistema radicular de las plantas de acuerdo con sus necesidades, lo que asegura un crecimiento estable y saludable de los cultivos (<http://www.lluviasolida.mx>).

Si bien existen en el mercado productos similares utilizado para este fin, “Lluvia Sólida” es un invento mexicano creado por el Ing. químico Sergio Rico Velasco, el cual cuenta con una amplia trayectoria en tratamiento de aguas residuales industriales. A través de sus investigaciones descubrió la gran cualidad de adsorción del acrilato de potasio siendo un polímero que, por su estructura molecular, atrae magnéticamente las moléculas de agua. Esta invención da como resultado importantes beneficios como la reducción de los costos de producción hasta en un 90% (<http://www.silosdeagua.cl>).

Según la documentación publicada en una de las páginas web del producto (<http://www.silosdeagua.cl>), la aplicación de silos de agua otorga los siguientes beneficios:

- Es posible iniciar la siembra sin esperar la temporada de lluvias;
- Su composición química lo hace un producto biodegradable, esto significa que su vida útil no produce ningún daño al medio ambiente;
- Las plantas no sufren de estrés hídrico por falta de lluvia durante su crecimiento;
- Las cosechas no se perderán si las lluvias han terminado;
- Se incrementa la productividad de las áreas de cultivo;
- Se reducen los costos en los sistemas de riego;
- Se reduce el uso de fertilizantes y plaguicidas, lo que propicia obtener cultivos de mejor calidad.

Según las páginas web del producto, dicha tecnología ha sido aplicada en diversos estados de México arrojando resultados significativos. No obstante, no presentan detalles acerca de las mejoras o inconvenientes que pudieron haber tenido en los experimentos.

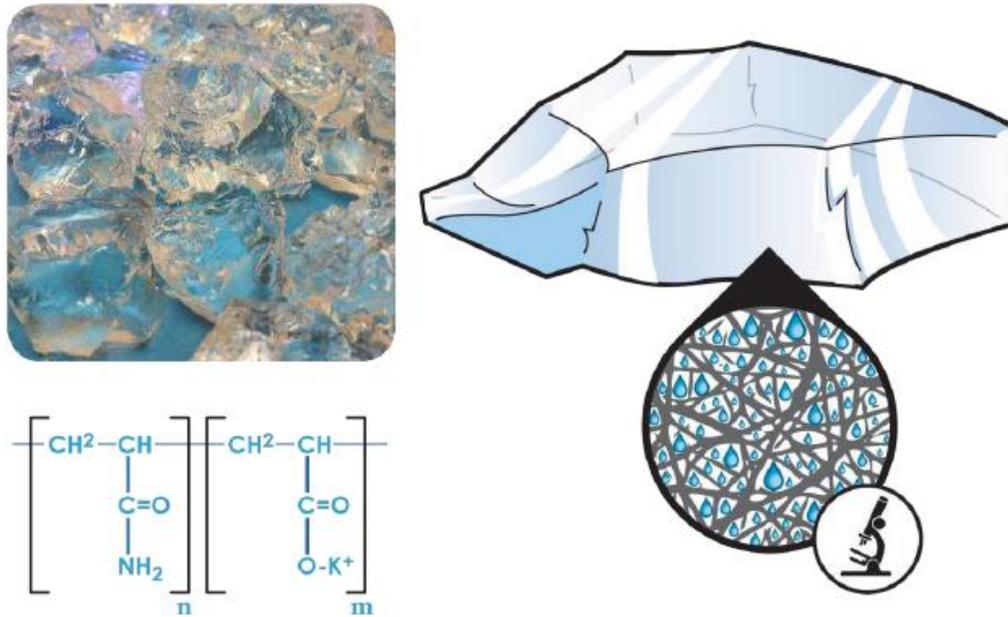


Figura 20 - Composición Silos de agua (<http://www.silosdeagua.cl>)



Figura 21 - Lluvia sólida (<http://www.lluviasolida.mx>)

Este producto, al entrar en contacto con el agua, la red de polímeros se expande debido a un proceso de osmosis que adhiere el agua a la estructura de la molécula. En el suelo, los “Silos de agua” se hinchan por las condiciones de humedad y entrega o libera esta

humedad a las raíces en condiciones secas. El líquido adsorbido y desadsorbido aumenta la disponibilidad para las raíces y reducen el estrés hídrico (<http://www.silosdeagua.cl>).

Si bien se puede aplicar a diferentes casos a continuación se detalla cómo sería el proceso de aplicación para cultivos extensivos, según las páginas web ya mencionadas:

1. Cargar los silos de agua en polvo en la tolva de la máquina sembradora.
2. Calibrar la dosificación de 5 gramos del producto por metro cuadrado.
3. Aplicar los silos de agua en la extensión del terreno.
4. Con la rastra, integrar el producto a la tierra.
5. Con maquinaria sembrar las semillas y colocar el fertilizante.
6. Hacer el riego acostumbrado o esperar las lluvias.

Es importante tener cuidado de que el producto quede a la profundidad donde germinarán las semillas y crecerán las raíces. Además, se podrían registrar las fechas y volúmenes de agua aplicados para comparar con el sistema de riego anterior, es decir, previo a la utilización del producto.

De aplicarse el producto en un área se recomienda que para el siguiente cultivo se aplique solo el 50% del mismo. Esto es debido a que, al arar la tierra, parte quedará expuesto al sol y se evaporará.

La “Lluvia Sólida” tiene una capacidad predeterminada de retención de agua lo que indica que, una vez llegada a la capacidad máxima, el agua simplemente escurrirá. Esto indica la posibilidad de utilizar el producto en cualquier tipo de clima, seco o lluvioso. Sin embargo, surge la interrogante de que, si el clima es lluvioso, el escurrimiento sea mayor utilizando este producto y por consiguiente aumente la posibilidad de erosión del suelo.

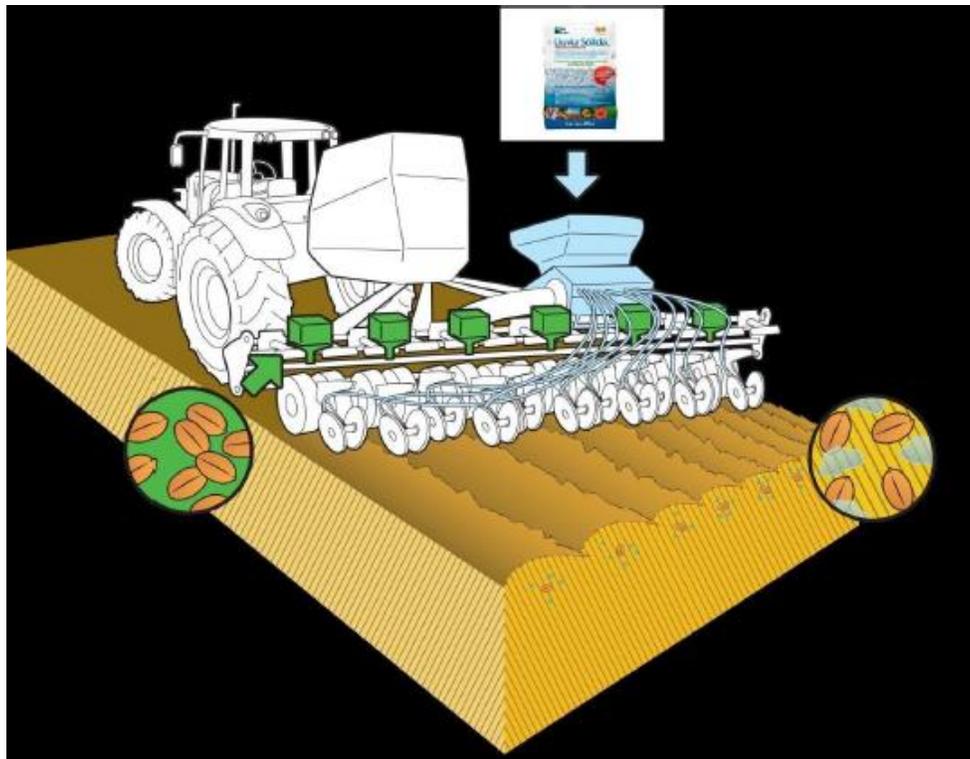


Figura 22 - Aplicación de producto a cultivos extensivos (<http://www.silosdeagua.cl>)



Figura 23 – Ejemplos de aplicación de producto a cultivos extensivos (<http://www.silosdeagua.cl>)

Si bien la empresa que ofrece el producto indica que es posible disminuir el agua utilizada para riego surge la interrogante de en qué casos esto sucede, debido a que la planta para un crecimiento determinado requiere de un volumen específico de agua, en cualquier condición. Por lo tanto, reducir el agua utilizada para riego redundaría en mejor la eficiencia del mismo, la cual en riego por aspersión y localizado son elevadas, indicando a priori no necesitar aplicar el producto.

Además de las interrogantes ya planteadas, la doctora Linda Chalker-Schoot de la Universidad del Estado de Washington, se pregunta si el acrilato de potasio aplicado en masa en el subsuelo no absorbería una cantidad de lluvia excesiva. Ella menciona que “estos geles pueden hacer tanto daño como bien. En cuanto comienzan a secarse, absorben el agua de su alrededor de manera incluso más vigorosa, lo que significa tomar el agua directamente de las raíces de la planta”. También expertos se cuestionan qué ocurre con los residuos del acrilato de potasio una vez expirada su vida útil, que puede alcanzar hasta los 10 años (<http://www.elconfidencial.com/>).

Entonces, si bien a priori podría ser un producto revolucionario en el agro, se debe tener cuidado acerca de su aplicación en los diferentes tipos de cultivos, algo que hasta el momento hacen los países que ya lo introdujeron. Esto se debe principalmente a que a la fecha las empresas no brindan resultados detallados acerca de sus experimentos con el producto, sino que presentan fotos e indican mejorías. Además, no se tiene conocimiento de su funcionamiento a largo plazo, pudiendo generar un efecto residual.

Por todo lo anterior, resulta adecuado realizar experimentos en pequeñas parcelas en el sitio donde se desea utilizar el producto, bajo las mismas condiciones que sin su aplicación, con el fin de comprobar si existen mejorías que indiquen la factibilidad de su utilización.

6 MEDICIÓN DE LA HUMEDAD

Uno de los elementos esenciales en la agricultura es la gestión del agua de riego. Es por ello que la vigilancia de dicho parámetro es un factor clave para la gestión del riego, que contribuye a maximizar la eficiencia y minimizar costos.

Los métodos de programación del riego más comúnmente usados son: la programación de acuerdo al calendario (número de días entre riegos), la observación del cultivo a fin de detectar cambios de color o escarbar el suelo y palpar la tierra para estimar el contenido de humedad. La programación calendarizada no toma en cuenta los días extremos del clima, lo cual puede ocasionar problemas de un año a otro. Saber observar el cultivo demanda experiencia y un buen ojo, pero aun cuando se tenga un buen ojo, en el momento que la planta muestre signos visibles de estrés ya habrá ocurrido una pérdida parcial de la cosecha. El palpar la tierra puede dar buenas estimaciones, pero les toma mucho tiempo a los agricultores (Martin, E., 2010).

Lo anterior, sumado a las nuevas tecnologías de riego y las grandes inversiones necesarias, llevan a que se busquen nuevos métodos o herramientas que permitan medir el contenido de agua en el suelo en forma real y rápida.

Hoy en día existen diferentes técnicas para poder determinar la humedad del suelo en tiempo real y así lograr un buen manejo del agua durante el riego. Sin embargo, Ramos Hernández, J. G. et al., (2015) concluye en su trabajo que, si bien las mediciones puntuales de la humedad del suelo con diferentes herramientas son exactas, cuando se trata de analizar su comportamiento espacial cubriendo áreas extensas la humedad del suelo es una variable difícil de medir. De todas maneras, emplear una calibración adecuada de la herramienta seleccionada deriva en valores confiables que permitan manejar los balances en suelo durante el ciclo vegetativo del cultivo.

6.1 Formas de medir la humedad en el suelo

La humedad del suelo no se distribuye de manera homogénea en ninguna dirección, sino que varía para diferentes volúmenes de suelo, lo que lo hace determinante para poder medirla. Existen diferentes métodos de medición, unos proporcionan mediciones reales (contenido de agua) y otras mediciones indirectas (constante dieléctrica). Asimismo, algunas técnicas proporcionan valores superficiales (por ejemplo, percepción remota) abarcando zonas extensas, y otras del perfil del suelo, pero en un pequeño volumen (por ejemplo, mediciones de TDR) (Ramos Hernández, J. G. et al., 2015).

Dentro de los métodos directos está el gravimétrico, el cual consiste en obtener una muestra de suelo y determinar la humedad real del suelo. Si bien este método es exacto, es un método destructivo, es decir, es necesario extraer diferentes muestras de suelo. Por otro lado, existen métodos indirectos que se caracterizan por medir otra variable del suelo que se pueda asociar a la capacidad de almacenamiento, en este caso los sensores

brindan información repetitiva no destructiva que, luego de una correcta calibración, permiten obtener la humedad del suelo (Ramos Hernández, J. G. et al., 2015).

Dentro de los métodos indirectos se encuentran: temperatura; resistencia; sonda de neutrones, reflectometría de dominio del tiempo (TDR) y reflectometría de dominio de frecuencia (FDR).

Los dos últimos son los más utilizados hoy en día por su fácil instalación y operatividad, además permiten almacenar las mediciones en dispositivos portátiles. Los instrumentos TDR funcionan bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética (la hace más lenta). El TDR envía una onda electromagnética a través de una guía colocada en el suelo a la profundidad deseada. El TDR entonces mide el tiempo que le toma a la onda viajar por la guía hacia el suelo y regresar. Este aparato registra el tiempo y lo convierte a una lectura de la humedad del suelo. Entre más mojado esté el suelo, más tiempo le toma a la onda magnética viajar por el suelo y regresar por la guía (Martin, E., 2010).

Otras mediciones de tipo indirecta son a través de sistemas remotos, los cuales incluyen sistemas ópticos y de microondas pasivos y activos. Las principales limitaciones asociadas a las técnicas de percepción remota empleadas para sensores de microondas es que la humedad de suelo sólo puede obtenerse para los primeros 5 a 10 cm de profundidad; sin embargo, la zona radicular del suelo es fundamental para establecer la disponibilidad del contenido de agua en el suelo y su impacto en el clima. Asimismo, las cubiertas vegetativas como bosques no discriminan bien el efecto del suelo (Wagner et al., 2007 citado por Ramos Hernández, J. G. et al., 2015).

Finalmente, existe una alta incertidumbre en el desarrollo los algoritmos para convertir la señal del satélite en humedad de agua, debido a que las mediciones in situ corresponden a 6 o menos veces la escala de medida con respecto a la de los satélites. El escalamiento es un proceso importante ya que se debe garantizar que se represente la variación de la humedad del suelo en el espacio. De acuerdo con Western et al. (2002), el mayor problema surge en lograr un buen conocimiento del ciclo hidrológico (Ramos Hernández, J. G. et al., 2015).

6.2 Medidores de humedad

A modo de ejemplo se incluirán algunos sensores que existen en el mercado con el fin de tener conocimiento de ellos.

Uno de los medidores de humedad es el *Diviner 2000*, utilizado por Ramos Hernández, J. G. et al., (2015) para sus mediciones. Este dispositivo es un sistema de medición de humedad del suelo robusto y portátil que registra la humedad a distintas profundidades de la zona del cultivo. Consiste de una sonda y de una unidad de visualización que le permite al agricultor medir el grado de humedad en el suelo y tomar decisiones respecto al riego, de manera inmediata, en 99 sitios distintos a la vez.

Diviner 2000 cuenta con una gran flexibilidad para la visualización de la información ya sea in-situ en una pantalla LCD o por medio de un computador. Esto le brinda al agricultor la posibilidad de toma de decisiones instantáneas y precisas in-situ o administrar el riego analizando los resultados desde su casa u oficina.



Figura 24 - Diviner 2000 (www.seedmech.com)

La empresa *Davis* también cuenta con un sensor de medición de humedad. Dicho dispositivo tiene la opción de colocar hasta cuatro sensores de humedad y cuatro de temperatura y así monitorear de forma remota el contenido de agua en el suelo a través de un computador o celular. Además, tiene la posibilidad de obtener datos de humedad del suelo y temperatura cada 15 minutos, para el seguimiento en tiempo casi real de las condiciones del suelo con una indicación clara del efecto de los eventos de riego o de lluvia recientes.

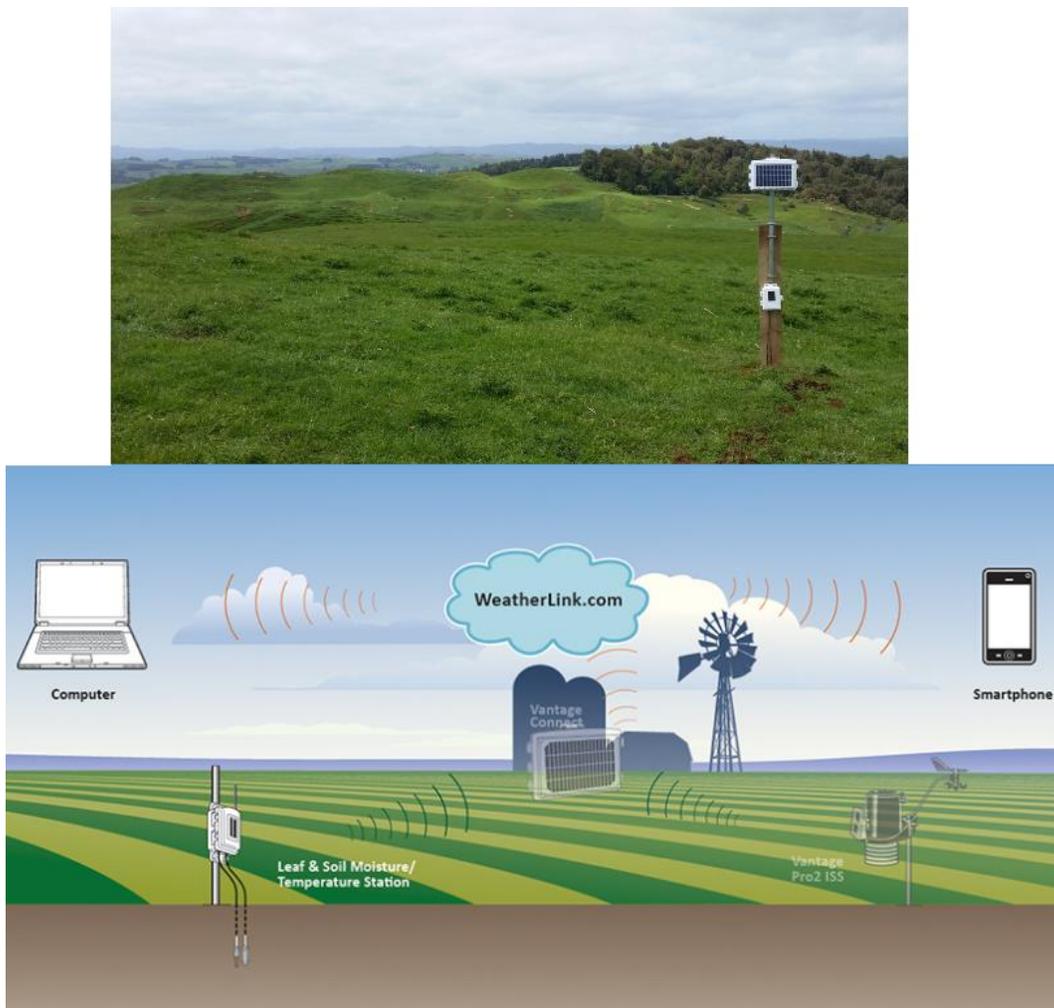


Figura 25 - Sistema de medición de humedad y temperatura del suelo (www.davisnet.com)

La empresa *Lindsey Corporation* cuenta con un sistema de monitoreo de humedad en el suelo, que hace parte de su marca denominada *FieldNET*, la cual es una plataforma basada en web para administrar todos los aspectos de su operación de riego. *FieldNET* se convierte en la herramienta de gestión que proporciona de forma rápida y fácil el control y alerta de las condiciones que se consideran importantes. Por lo tanto, agregando sensores de humedad en diferentes puntos del terreno, es posible lograr un monitoreo del contenido de agua en el suelo utilizando la computadora o celular.

Valmont Irrigation también cuenta con sensores de medición de humedad, el denominado *SoilPro 100*, que en 2013 ganó el premio AE50 de la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE) siendo considerado uno de los diseños más innovadores del año en productos para la industria alimenticia y la agricultura.

SoilPro 100 es una solución innovadora y de bajo costo que utiliza componentes simples a precios razonables para proporcionar a los agricultores información sobre la humedad del suelo, sin la necesidad de controles computarizados de pivote o acceso a Internet.

Este dispositivo combina un sensor de humedad del suelo y un módem celular programable para supervisar las condiciones de humedad. Los agricultores reciben mensajes de texto SMS cuando el sensor mide tanto en condiciones secas o saturadas.

Como se puede observar, existe una gran variedad de sensores de humedad de suelo que pueden ser utilizados para controlar el balance de agua en la zona radicular y manejar de forma adecuada el número de riegos y la cantidad de agua aplicada, evitando así el estrés del cultivo y logrando mejoras en el rendimiento final. Además, se observa que las empresas líderes en equipos de riego cuentan con sensores y aplicaciones para poder monitorear de forma remota este parámetro.

Por último, más allá de las capacidades que tienen estas tecnologías su buen funcionamiento dependerá del trabajo previo que se realice, es decir, previo a su instalación se debe conocer el suelo y calibrar los sensores. Esto implica poder llevar a cabo una serie de estudios donde se incluya el grado de homogeneidad del suelo, características físicas, etc.

Además, como estas herramientas tienen un radio de medición pequeño (unos pocos centímetros), todo lo que ocurra fuera de esa área no será captado por los sensores. Por lo tanto, si el suelo donde se realiza el cultivo tiene características diversas se necesitarán varios de estos dispositivos para realizar una lectura completa. Muchos autores recomiendan mezclar el uso de estos dispositivos con las vistas al campo para lograr mejorar resultados.

Si bien su uso posee grandes beneficios, el elevado costo sumado a la necesidad de capacitación hacen que los agricultores muchas veces se resistan a su utilización.

6.3 Tecnologías de observación de la tierra para asesoramiento de riego

Desde hace ya algún tiempo se está intentando implementar la observación de la Tierra mediante sensores a bordo de satélites, con el fin de proporcionar imágenes de la superficie terrestre que sean adecuadas para hacer efectivo un seguimiento de los campos o parcelas y establecer mapas de necesidades hídricas de los cultivos.

Según Quintanilla, A. et al. (2007), el uso cada vez más extendido de las nuevas tecnologías de información y comunicación, como las denominadas *SOLAP* (Spatial On-Line Analytical Processing) ofrecen la oportunidad de explotar información multidisciplinaria proveniente de diferentes fuentes, y permiten al usuario utilizar herramientas SIG-online sencillas para poder dar seguimiento a toda la información.

A modo de ejemplo, el proyecto europeo denominado *DEMETER* (DEMOstration of Earth observation Technologies in Routine irrigation advisory services) desarrolló un prototipo

denominado eSARAS, cuyo objetivo es ofrecer la información necesaria a los usuarios para su rutina diaria. En este caso, la rutina diaria de un Servicio de Asesoramiento de Riego (SAR).

Con dicha herramienta es posible disponer de valiosos indicadores y cubrir una mayor superficie de seguimiento a través de la teledetección. Luego, con la incorporación de nuevas tecnologías de información, se podría entregar los datos recopilados de forma ágil y sencilla a los agricultores, ya sea a través de informes o directo al teléfono móvil.

Si bien hace algunos años este tipo de herramienta contaba con muchas limitaciones, con el gran crecimiento tecnológico actual sería posible utilizar la teledetección como asesoramiento para el riego. Hoy en día existen satélites de alta resolución que permiten acercarse a una resolución espacial adecuada, entre 1 y 5m, los cuales podrían ser utilizados en la agricultura. Además, la facilidad actual de transmisión de información permite que los usuarios adquieran datos en tiempo real, permitiendo tomar decisiones a corto plazo.

En la figura siguiente se destaca cómo sería el funcionamiento de un SAR incorporando la teledetección como herramienta básica para dar seguimiento a los cultivos.

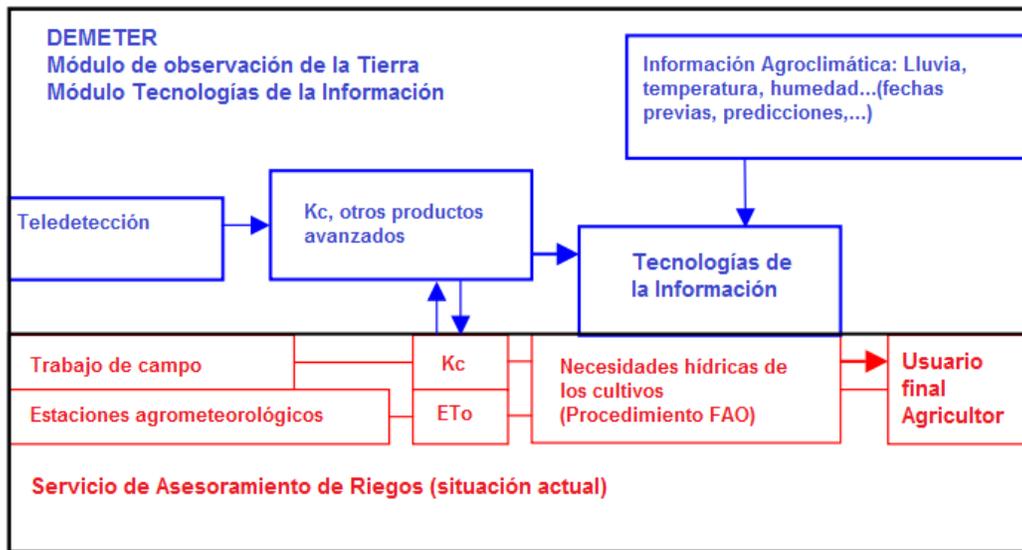


Figura 26 - Concepto y funcionamiento del Sistema de Asesoramiento de Riego Asistido mediante Satélite (SARAS) (Calera, A. et al. 2003)

No obstante, a la fecha no se tiene conocimiento de la implementación de esta técnica de manera adecuada ni cuáles son los resultados exactos que se entregan al usuario. Tampoco se conoce como es el proceso de calibración de las imágenes. De todas maneras, esta técnica es innovadora y parecería ser muy interesante su utilización en el agro.

7 APLICACIÓN PRÁCTICA - INFORMACIÓN DISPONIBLE

7.1 Localización

La zona de estudio se localiza dentro de la República Oriental del Uruguay, país ubicado en América del Sur (hemisferio sur) y que tiene fronteras con Argentina al oeste, Brasil al noreste, Río de la Plata al sur y Océano Atlántico al sureste.



Figura 27 - Ubicación geográfica de Uruguay y zona de estudio (triángulo rojo)

Como se aprecia en la figura anterior, el área de estudio se encuentra dentro del departamento de Soriano, en las proximidades de la ciudad de Dolores. Las coordenadas aproximadas son [-33.588° ; -58.180°].

La Figura 28 muestra con mayor detalle la localización geográfica del área de estudio. Cabe destacar que en dicha imagen las coordenadas son Universal Transversal de Mercator (UTM) Zona 21.

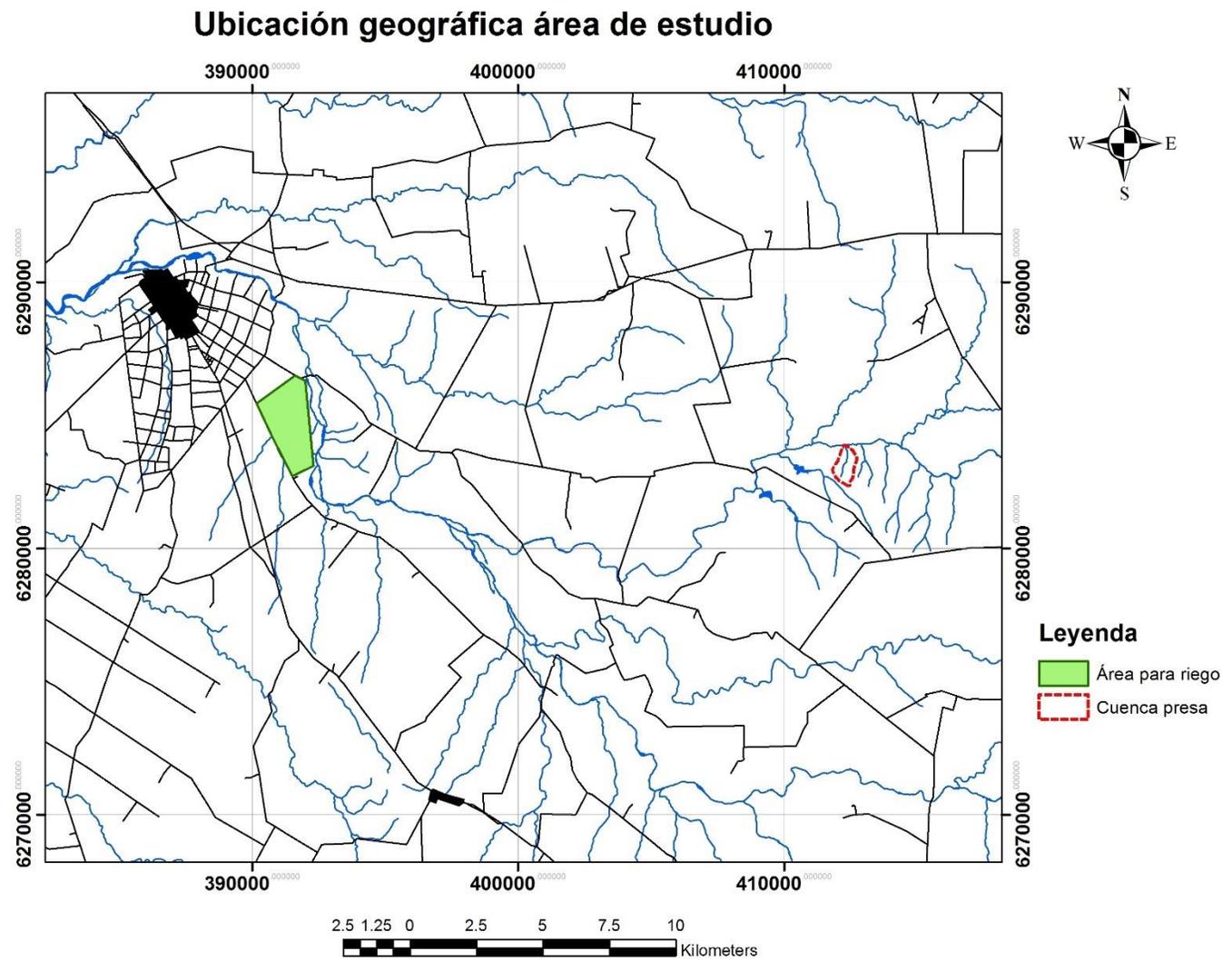


Figura 28 - Ubicación geográfica de zona de estudio

7.2 Clima

7.2.1 Clima de Uruguay

Según el documento *Clima del Uruguay* elaborado por Álvarez, W. y De Souza, R. (2010) **el clima de Uruguay es templado, moderado y lluvioso.**

Uruguay es el único país de América del Sur ubicado en toda su extensión en la zona de insolación templada del sur, entre los paralelos 30° y 35° S. Se ubica en el área de influencia de los anticiclones (área de alta presión atmosférica) de los océanos Atlántico y Pacífico, por lo que su clima presenta gran variabilidad de estados de tiempo atmosférico, producto de la combinación de los siguientes factores (Álvarez, W. y De Souza, R., 2010):

- Relieve: se caracteriza por el predominio de formas bajas. No existen barreras orográficas que afecten la distribución de las temperaturas y las precipitaciones. Por esta razón, no se observan diferencias marcadas entre los distintos sectores del país.
- Los anticiclones semipermanentes influyen en los estados de tiempo. El que se localiza en el océano Atlántico aporta aire de origen tropical por medio de los vientos del noreste y del este. Y el que se localiza en el océano Pacífico trae aire polar por medio de vientos del sur y del suroeste.
- Sobre el país influyen masas de aire tropical y polar. Las primeras se forman en territorio paraguayo-brasileño y en el océano Atlántico, y traen al espacio geográfico uruguayo altas temperaturas y elevados porcentajes de humedad. Las masas del aire polar que se originan en el océano Pacífico, al suroeste de Chile y sobre el Atlántico sur se caracterizan por temperaturas bajas y bajo contenido de humedad.
- Las corrientes marinas de Brasil y de Malvinas transportan aguas cálidas y frías respectivamente; representan una fuente importante de humedad para las masas de aire que circulan sobre ellas.

Respecto a la temperatura, el valor medio anual fue de 17.5°C en el período 1961-1990 y se podría decir que éstas aumentan del sureste al noroeste del país.

Las precipitaciones son mayores al norte del país, aunque se caracterizan por su variabilidad e irregularidad interanual. El suroeste del país es el área geográfica que recibe menos precipitaciones (entre 1.000 y 1.1000 mm/año), mientras que en el norte los valores superan los 1.400 mm/año.

Uruguay se caracteriza además por ser ventosos. El régimen de vientos indica que predominan los que soplan del noreste. Las velocidades medias son de 15 km/h, aunque con frecuencia se registran velocidades mayores a 100 km/h.

La humedad relativa media anual se sitúa en 70% para todo el territorio nacional, siendo enero el mes más seco, con registros de aproximadamente 65%, y julio el mes más húmedo, registrando un 80%de humedad.

En resumen, si se analizan el valor medio y las variaciones que asumen los principales parámetros meteorológicos en Uruguay, se reconoce una sola modalidad climática: un clima controlado por masas de aire tropical y masas de aire polar, que puede ser clasificado como clima **subtropical húmedo**, típico de las costas orientales de los continentes (Álvarez, W. y De Souza, R., 2010).

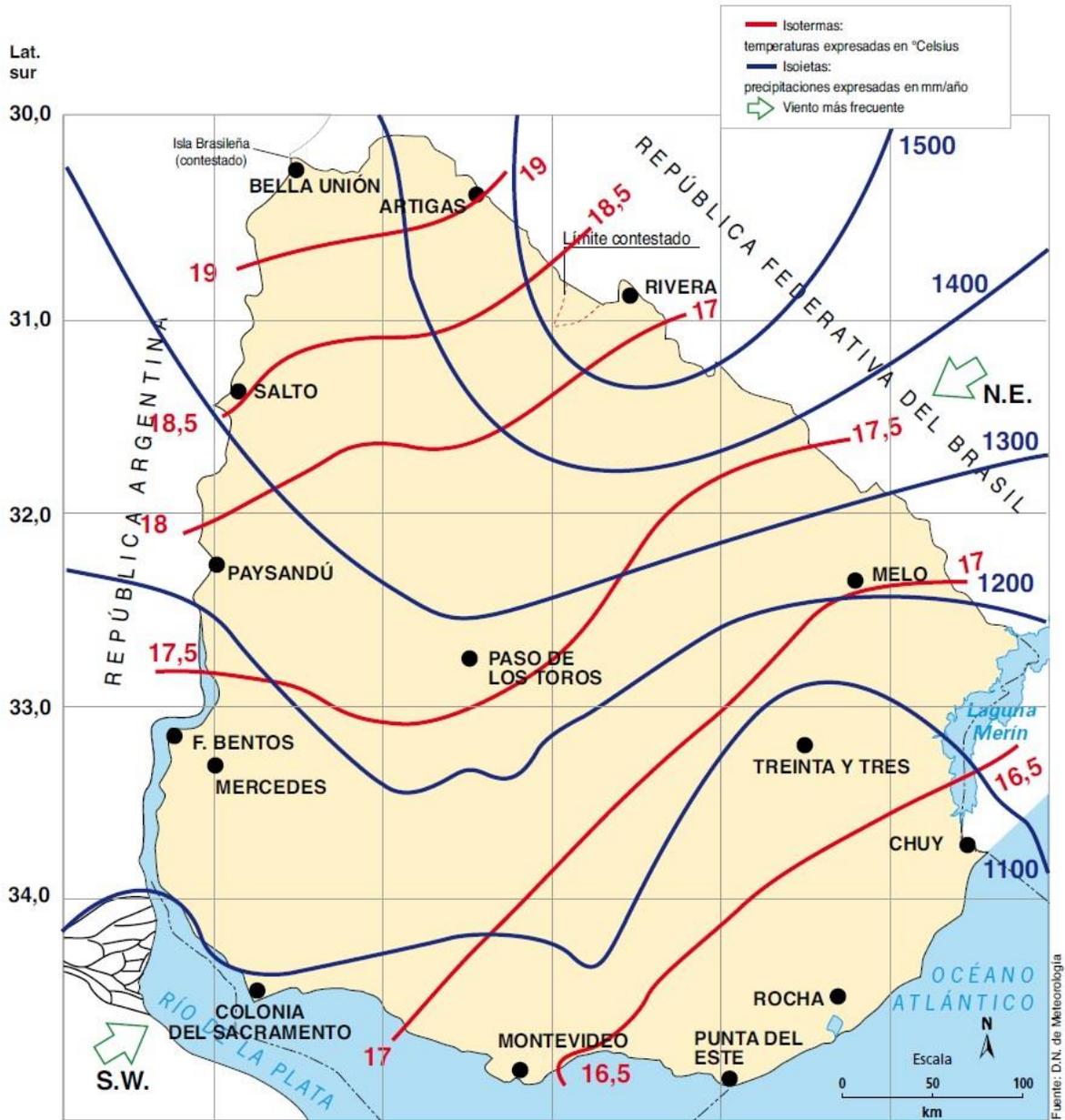


Figura 29 - Distribución de temperaturas y precipitaciones. Fuente: D. N. de Meteorología. (Álvarez, W. y De Souza, R., 2010).

7.2.2 Información climatológica recopilada

Se seleccionaron las estaciones meteorológicas o climatológicas cercanas al área de estudio y se solicitó la información que se consideró necesaria para realizar el proyecto. En la figura siguiente se aprecia la ubicación de dichas estaciones.

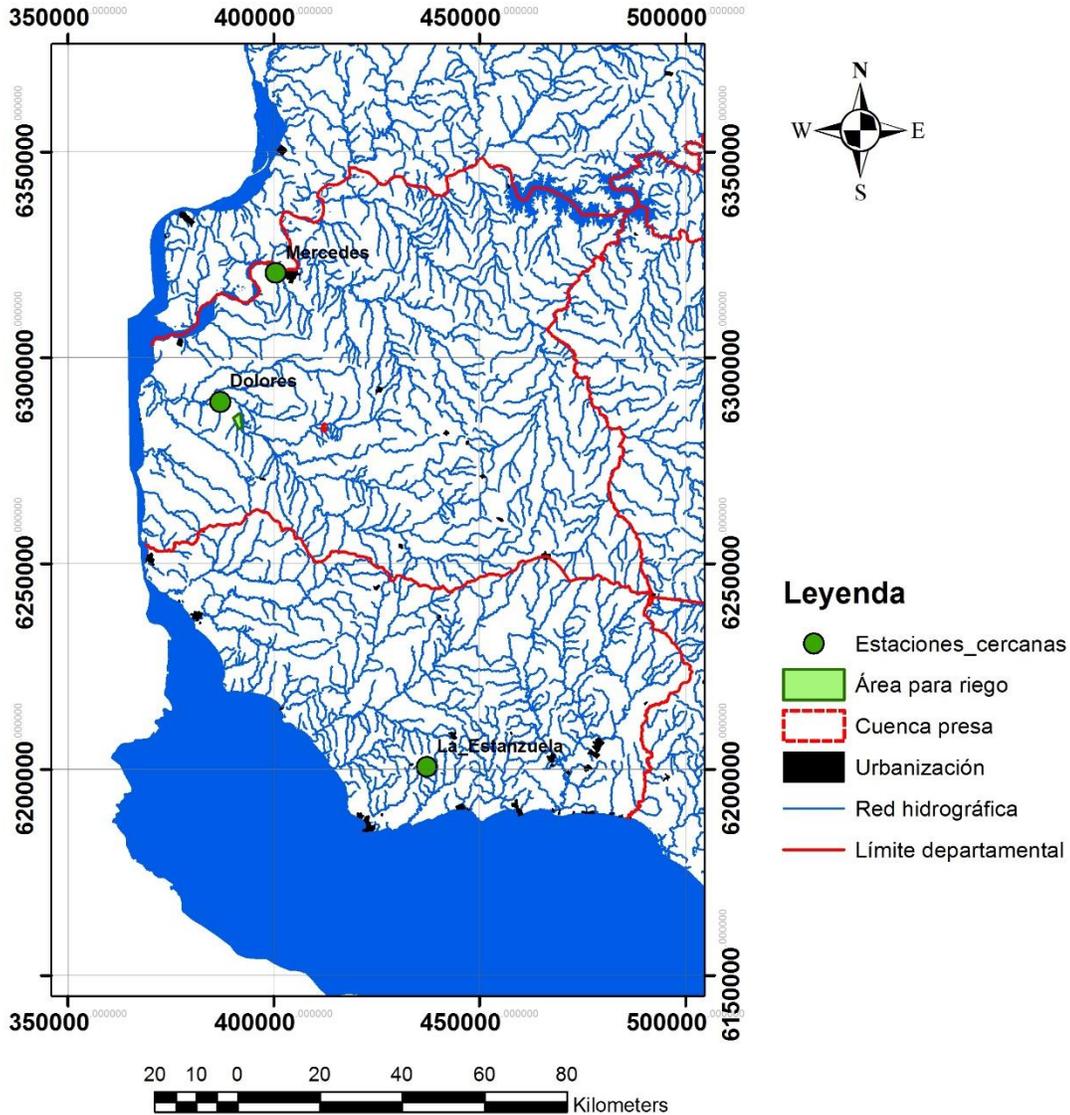


Figura 30 - Estaciones cercanas

Como se puede apreciar en la figura anterior se seleccionaron tres estaciones:

- **La Estanzuela:** es una estación experimental creada en 1914 por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) de Uruguay, con los cometidos de avanzar en el mejoramiento de cultivos y la producción de semillas básicas. Ésta cuenta con una estación meteorológica que forma parte del *Banco de datos agroclimáticos del INIA* y brinda información gratuita desde 1965 a la fecha. Dentro

de esa información, que se descarga desde la página web de INIA Uruguay, se presentan los siguientes parámetros: evaporación Pinche, evaporación Tanque A, evapotranspiración Penman, humedad relativa, heliofanía, precipitación, radiación solar, temperatura, viento, etc.

- **Dolores:** es una estación pluviométrica que pertenece al Instituto Uruguayo de Meteorología (*INUMET*). Solo cuenta con información de precipitaciones, la cual no se encuentra disponible de forma gratuita, sino que debe ser solicitada.
- **Mercedes:** estación meteorológica que pertenece a *INUMET* y registra, además de valores de precipitación, otros parámetros como evaporación Pinche o evaporación Tanque A. Al igual que la estación Dolores, la información debe ser solicitada.

Cabe destacar que *INUMET* cuenta con varias estaciones cercanas al área de estudio, pero al ser pluviométricas, se consideró que con las seleccionadas era suficiente para realizar un trabajo adecuado.

Por tanto, **además de descargar de manera gratuita la información de la estación La Estanzuela, se solicitó a *INUMET* información de las estaciones Dolores y Mercedes**, obteniendo lo siguiente:

1. La Estanzuela: información diaria en el período 1986-2015 de: evapotranspiración Penman, evaporación Tanque A, evaporación Pinche, temperatura media, precipitación acumulada, velocidad del viento, humedad relativa media y radiación solar.
2. Dolores: información diaria de precipitación en el período 1981-2015.
3. Mercedes: información diaria de precipitación en el período 1981-2015 e información diaria de evaporación Tanque A y Pinche en el período 200-2015.

7.2.3 Cálculo de evapotranspiración del cultivo de referencia

Para poder calcular la evapotranspiración del cultivo, es necesario, además de contar con los coeficientes de cultivo para las diferentes etapas del ciclo vegetativo, con la “evapotranspiración del cultivo de referencia” (E_{TP0}). Debido a que los datos son de evaporación “Tanque A”, dicho parámetro se determina como:

$$E_{TP0} = C_{ET} \times E_{TANQUE} \quad (7.1)$$

Donde:

E_{TP0} : evapotranspiración del cultivo de referencia

C_{ET} : coeficiente de evapotranspiración

	Coefficiente ANUAL
URUGUAY	0.71
ARTIGAS	0.73
SALTO	0.83
MELO	0.69
TREINTA Y TRES	0.69
PAYSANDU	0.71
MERCEDES	0.67
PRADO	0.8
ROCHA	0.59
BELLA UNION	0.7

Tabla 7 - Valores de coeficientes de evapotranspiración para Uruguay (Chiara, 1990)

Por lo tanto, **para la estación seleccionada el coeficiente de tanque es de 0.67** (estación Mercedes).

7.2.4 Selección del año seco

Para la simulación se va a utilizar los datos climatológicos correspondientes a la estación Mercedes, debido a que es la más cercana al área de estudio que contiene información diaria de precipitación y evaporación “Tanque A”. Cabe aclarar que la estación más cercana es Dolores, pero solo cuenta con datos de lluvia. De todas maneras, se compararon los datos de ambas estaciones no encontrando diferencias notorias, para los años que se van a utilizar.

En el gráfico a continuación se pueden observar los valores de precipitación acumulada en el período 1981-2015, sin embargo, el período en el cual se tienen valores de evaporación “Tanque A” es 2000-2015, por lo que se usarán datos solo de éste último período.

La simulación de los diferentes cultivos se va a realizar en un principio para un año seco, dado que en esas condiciones los requerimientos de agua de riego son mayores y, por lo tanto, de contar con un volumen mayor de lluvia, solo se deberá ajustar el plan de riego. Para seleccionar dicho año se procede a la utilización de **percentiles**, los cuales son una medida de tendencia central usada en estadística que indica, una vez ordenados los datos de menor a mayor, el valor de la variable por debajo del cual se encuentra un porcentaje dado de observaciones en un grupo de observaciones. Por ejemplo, el percentil 20 (P₂₀) es el valor bajo el cual se encuentran el 20 por ciento de las observaciones.

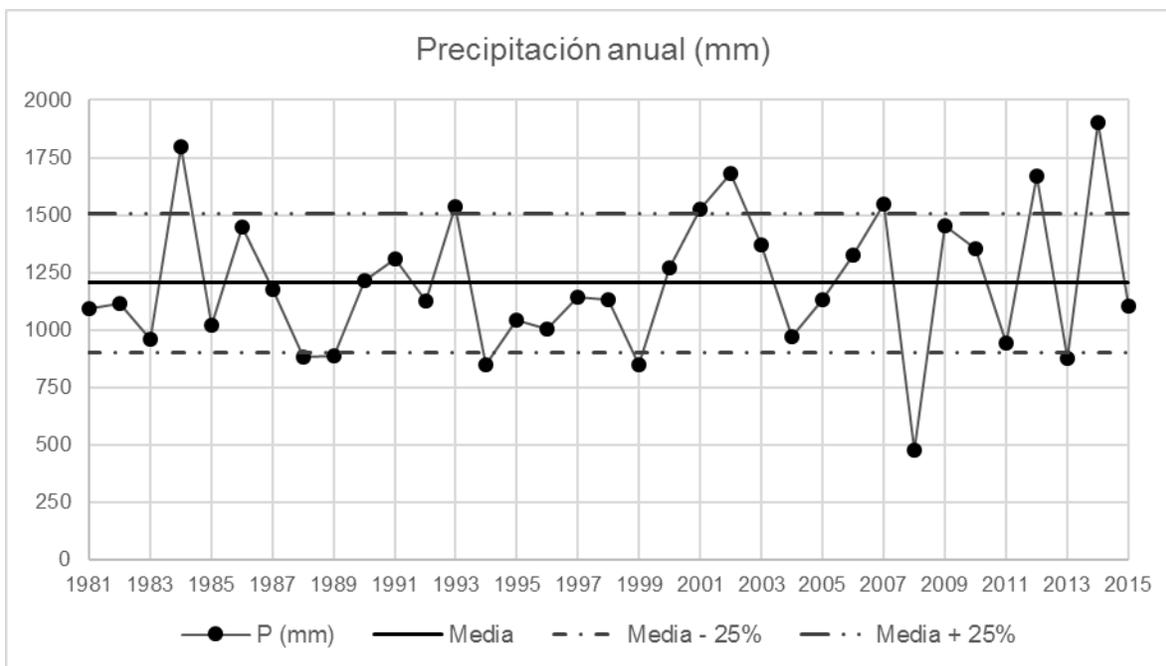


Figura 31 - Precipitación anual estación Mercedes. Período 1981-2015.

Valores anuales		Percentil	
AÑO	P (mm)	P _i	Valor
2014	1904.600	5%	777.00
2002	1681.000	10%	910.60
2012	1669.400	20%	970.20
2007	1550.300	25%	1071.83
2001	1523.700	30%	1117.75
2009	1451.200	40%	1267.90
2003	1370.600	50%	1341.10
2010	1353.900	60%	1370.60
2006	1328.300	70%	1487.45
2000	1267.900	75%	1530.35
2005	1129.800	80%	1550.30
2015	1105.700	90%	1675.20
2004	970.200	100%	1904.60
2011	944.500		
2013	876.700		
2008	477.900		

Tabla 8 - Valor de percentiles de precipitación anual en período 2000-2015. Estación Mercedes

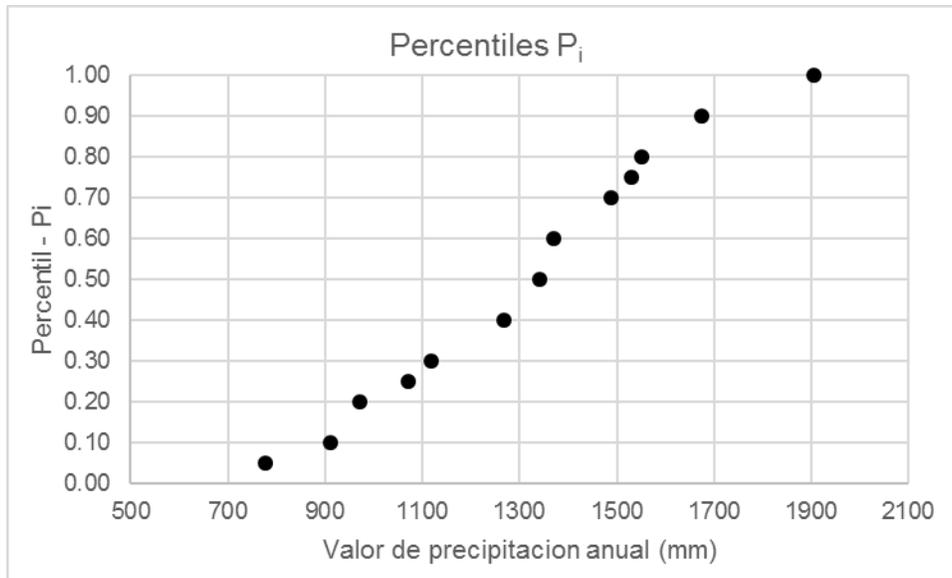


Figura 32 - Percentiles para valores de precipitación anual en período 2000-2015. Estación Mercedes

Se considerará entonces como muy seco al año 2008 que corresponde al mínimo de ellos; **como seco al año 2013** cuya probabilidad de excedencia es del 10%, como medio al año 2004, con probabilidad de excedencia del 25% y como húmedo al año 2001 cuya probabilidad de excedencia es del 75%.

7.3 Suelos

Para determinar los tipos de suelo se utilizan las cartas de suelos publicadas en la página web del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) de Uruguay (<http://www.cebra.com.uy/renare/mapa/cartas-de-suelos/>). Dichas cartas fueron desarrolladas por el Ministerio mencionado en el año 1976 y tuvieron posteriormente algunas actualizaciones.

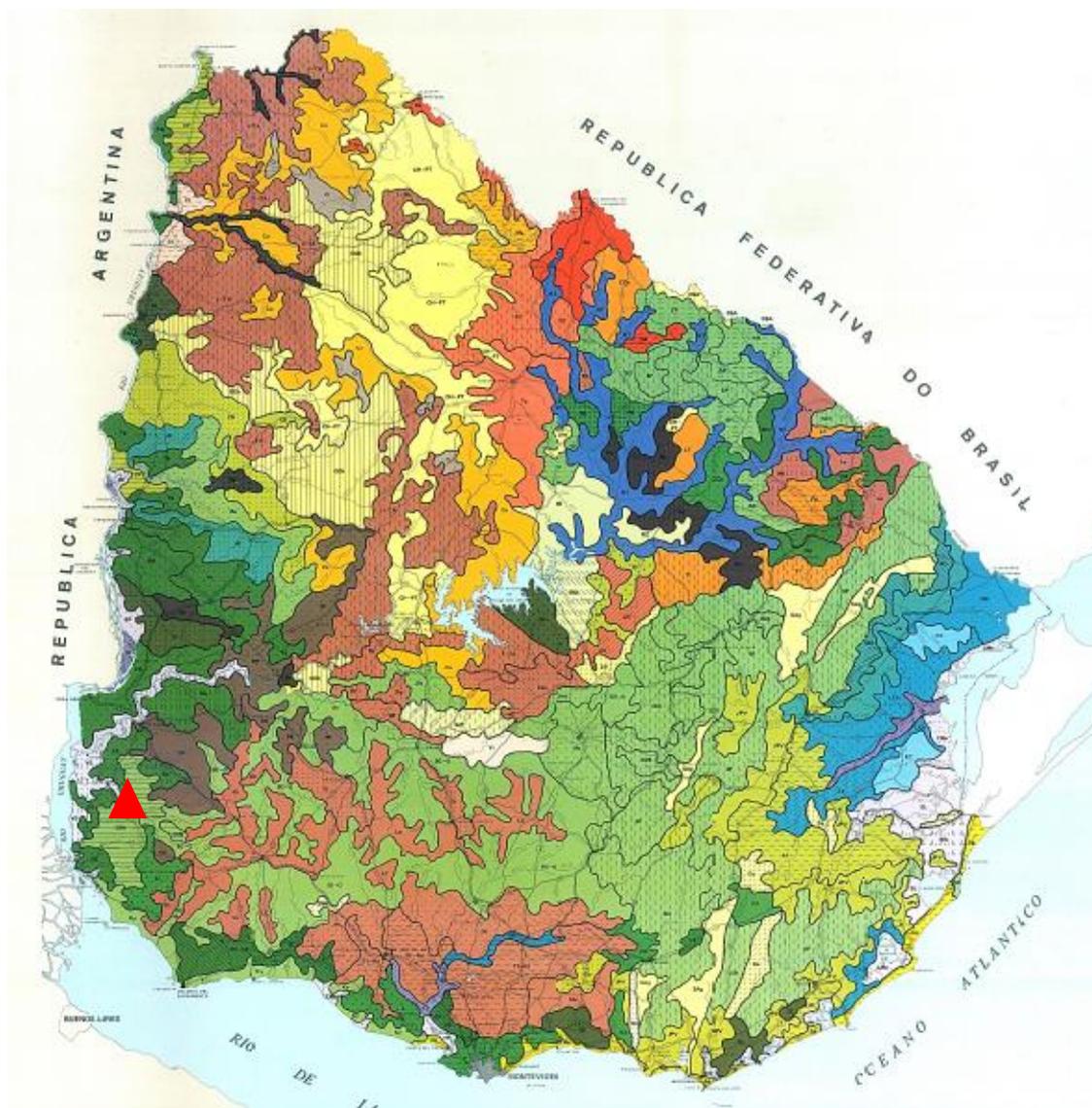


Figura 33 - Carta de suelos (MGAP). Escala 1:1.000.000

Triángulo rojo corresponde a zona de estudio

La figura anterior corresponde a la carta de suelos mencionada. Cabe destacar que no se incluye la leyenda debido a que no es factible su lectura con la escala máxima en que se puede incluir.

Es importante mencionar también que en recientes actualizaciones se realizaron cartas en mayor detalle por lo que, para el presente trabajo, se utiliza la carta del Departamento de Soriano realizada en 1996.

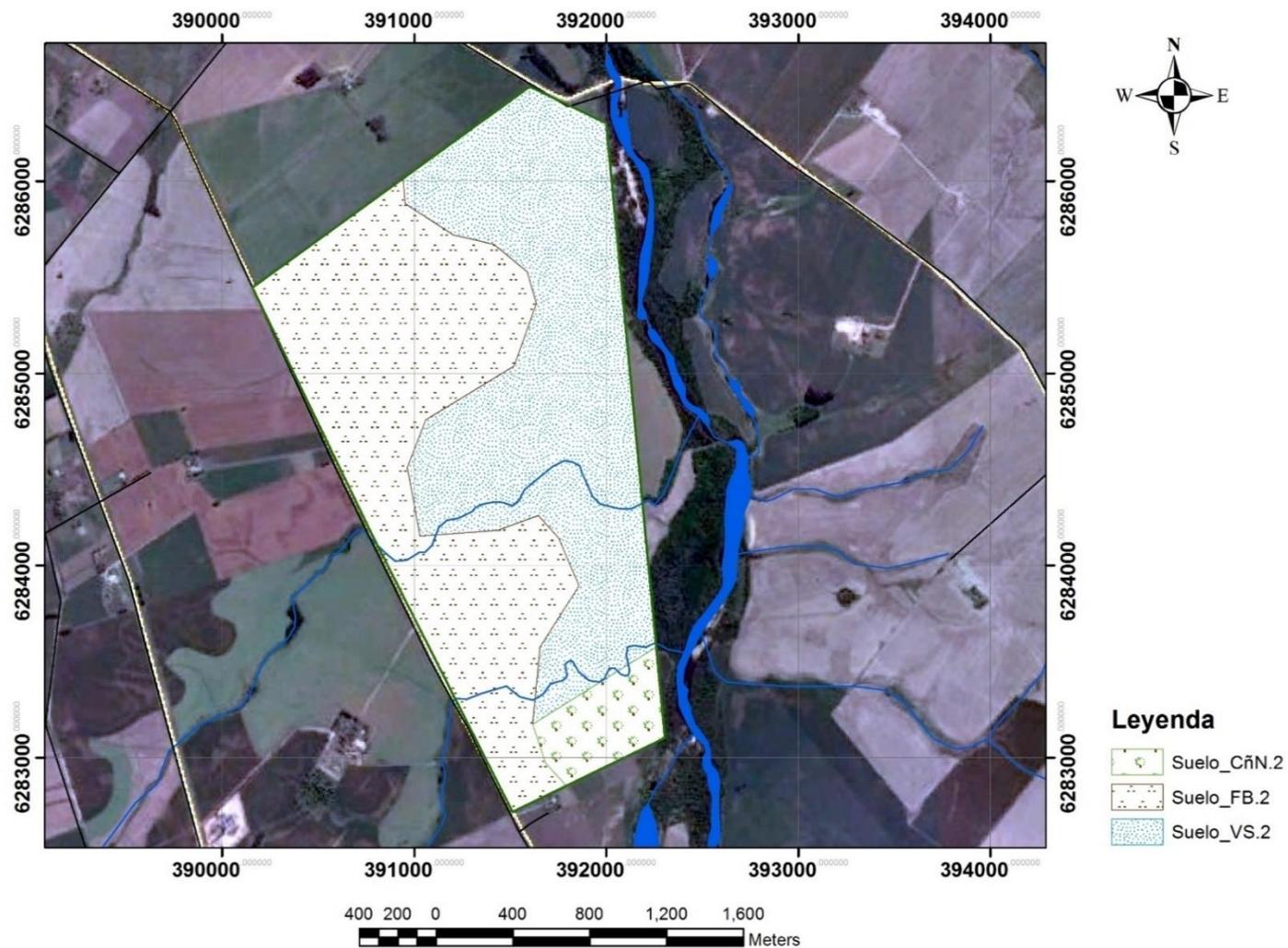


Figura 35 - Tipos de suelos en área destinada a riego

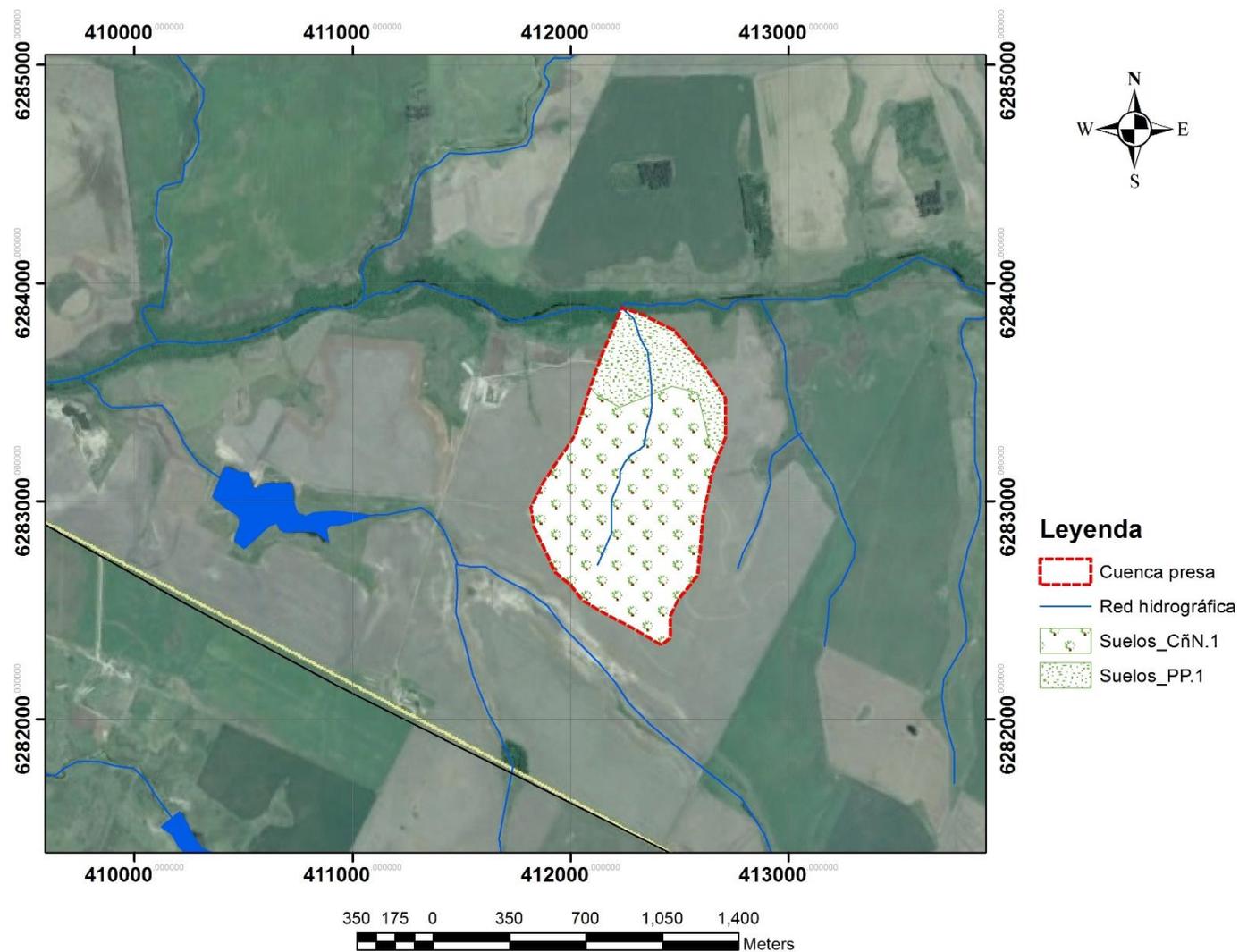


Figura 36 - Tipos de suelo en cuenca donde se ubicará la presa de almacenamiento

La descripción de cada suelo se presenta a continuación:

- Suelo CñN.2 (Cañada Nieto):
Suelos profundos; pardo oscuros y oscuros; poco diferenciados; texturas medias y pesadas; fertilidad natural media y alta; dominan Brunosoles Subéutricos Típicos, ArFr y Fr, y Brunosoles Eutricos Típicos: Lac, v.
- Suelo VS.2 (Villa Soriano):
Suelos profundos; pardos; texturas pesadas; medio y máximo grado de diferenciación; fertilidad natural alta con salinidad y sodicidad asociada; dominan Brunosoles Eutricos, Típicos y Lúvicos, Lac y Planosoles Eutricos Melánicos, Lac; asociados suelos alcalinos.
- Suelo FB.2 (Fray Bentos):
Suelos profundos; pardos; poco diferenciados; texturas medias; fertilidad natural alta; dominan Brunosoles Eutricos Típicos, Lac y Hápicos, Fr, mp; accesoriamente suelos alcalinos y sódicos.
- Suelo PP.1 (Paso Palmar):
Suelos moderadamente profundos y superficiales; pardos; poco diferenciados; texturas medias y livianas con pedregosidad; fertilidad natural media; dominan los Brunosoles Subéutricos, Lúvicos y Hápicos, Fr y ArAc mp respectivamente y Litosoles Subéutricos Melánicos, Ar.
- Suelo CñN.1 (Cañada Nieto):
Suelos profundos; pardos; poco y medianamente diferenciados; texturas medias; alta fertilidad natural; dominan Brunosoles Subéutricos Típicos, ArFr y Fr.

Debido a se trata de **Brunosoles**, la carta de suelos presenta la siguiente información:

- Perfil tipo: A/Bt/Cca.
- Suelos de color oscuro.
- Alto contenido de materia orgánica.
- Alta saturación de bases. La misma en el horizonte superior no puede ser inferior al 50%.
- Texturas medias a pesadas: franco, franco limoso, franco arcilloso limosos.
- Drenaje moderado a bueno.

7.3.1 Parámetros relevantes para simulación

Para poder realizar la simulación de cultivos se requieren de algunos parámetros, como lo son: la capacidad de campo (CC), el punto de marchitamiento permanente (PMP), la densidad aparente (Da), el número de curva (N) y la relación tensión-humedad del suelo.

A continuación, se observan algunos datos publicados por la Facultad de Agronomía (Universidad de la República) de Uruguay.

Lámina de agua en mm, retenida por algunos suelos del Uruguay, por cada 10cm de profundidad

Suelo	Horizonte	Transición	Da	Textura	CC	PMP	Agua Disponible
Brunosol éútrico / subéútrico háplico	A	cl	1.2	F(p)	35	18	17
Vertisol rúptico lúvico	A	gr	0.98	F Ac	39	21	18
	B	gr-cl	1.31	Ac L	34	21	13
	C		1.23	Ac L	37	26	11
Brunosol subéútrico típico	A	cl	1.25	F AC L	38	18	20
	B		1.41	AC L	37	25	12
Brunosol subéútrico ócrico melánico	A	cl	1.39	F Ar	25	10	15
	B		1.51	Ac Ar	33	23	10
Agrisol subéútrico melánico	A	ab	1.39	F L	32	11	21
	B		1.41	Ac L	38	26	12
Agrisol / Planosol dístrico ócrico	A	ab	1.44	F Ar	18	6	12
	B		1.48	Ac Ar	36	26	10

Transición- cl: clara; gr: gradual; ab: abrupta

Textura- F: Franco; Ac: Arcilloso; Ar: Arenoso; L: Limoso

Tabla 9 - Lámina de agua en mm ("Agua en el suelo", Facultad de Agronomía, 2013)

Otro parámetro importante, como ya se mencionó, es la relación tensión-humedad del suelo. Dado que no se tiene medida en campo dicha relación, se recurrió a bibliografía a fin de poder determinar una curva que represente el tipo de suelo en cuestión, el cual, según la tabla anterior, puede ser franco arcillo-limoso o arcillo-limoso.

De la investigación realizada se propuso utilizar la ecuación de van Genuchten (1980):

$$\theta(cm) = (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{1}{1 + (\alpha \psi_m(cm))^n} \right)^m + \theta_r \tag{7.2}$$

Donde:

θ : contenido de agua (cm³/cm³)

θ_s : contenido de agua saturado (cm³/cm³)

θ_r : contenido de agua residual (cm³/cm³)

ψ_m : tensión (cm)

α, n : parámetros que dependen del tipo de suelo

m : por lo general se asume que $m = 1 - 1/n$

Según la base de datos de la UNSODA (Unsaturated Soil Hydraulic Database) los parámetros según el tipo de suelo son los siguientes:

Textura	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	m
Arena	0.058	0.37	0.035	3.19	0.6865
Arena arcillosa	0.074	0.39	0.035	2.39	0.5816
Limo arenoso	0.067	0.37	0.021	1.61	0.3789
Arena limosa	0.083	0.46	0.025	1.31	0.2366
Limo	0.123	0.48	0.006	1.53	0.3464
Franco limosos	0.061	0.43	0.012	1.39	0.2806
Franco areno arcilloso	0.086	0.40	0.033	1.49	0.3289
Franco arcilloso	0.129	0.47	0.030	1.37	0.2701
Franco limo arcilloso	0.098	0.55	0.027	1.41	0.2908
Limo arcilloso	0.163	0.47	0.023	1.39	0.2806
Arcilla	0.102	0.51	0.021	1.20	0.1667

Tabla 10 - Valores de coeficientes de ecuación de van Genuchten según textura (TULLER, M. & OR, D., 2003).

Dado que **en el área predominan los Brunosoles subéutrico típico, se puede establecer que los mismos corresponden a un suelo franco limo arcilloso** (Tabla 9). Por lo tanto, en la gráfica siguiente se presenta la curva para un suelo de estas características. Cabe destacar que la CC se presenta a una tensión de 33.33 kPa y el PMP a 1500 kPa (primer y último punto de la curva).

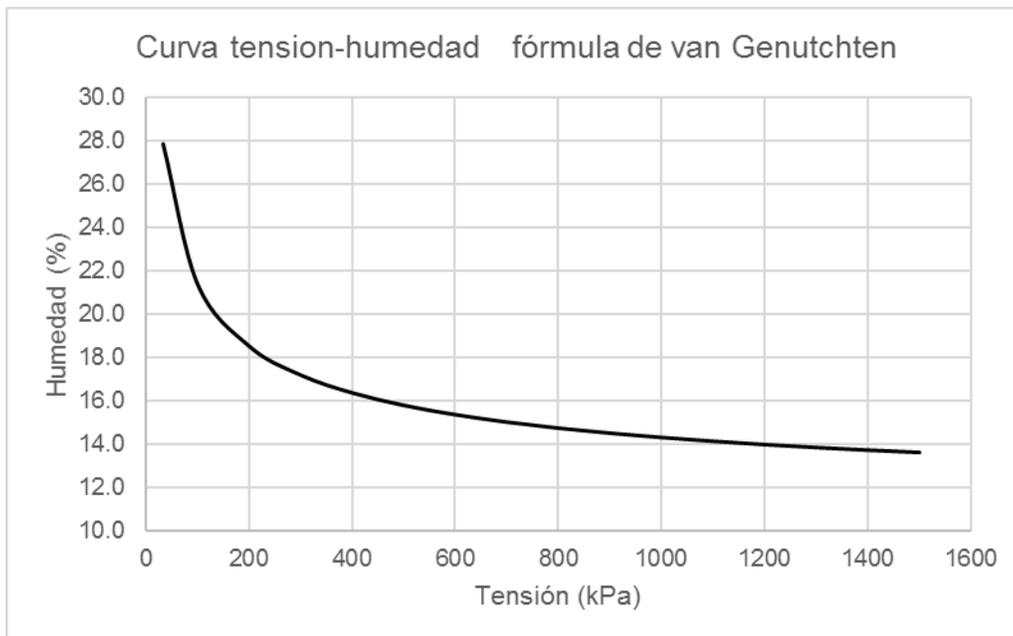


Figura 37 - Curva tensión-humedad para suelo franco limo arcilloso

Otro dato importante es determinar el factor N, necesario para determinar la “lluvia aprovechable”. En este caso se va a utilizar el Criterio del USBR, para el cual es necesario determinar el grupo hidrológico de suelo.

Cabe destacar que los tipos de suelos son: Villa Soriano, Cañada Nieto, Fray Bentos y Paso Palmar. Dichos suelos, según lo determina Durán A. (1996) en su estudio denominado *Clasificación en grupos hidrológicos de los suelos del Uruguay*, **forman parte del grupo hidrológico C o B.**

Luego, ingresando a las tablas que existe en diferentes bibliografías se selecciona el número N (Anexo 1).

Como resultado se tiene:

- **Número N para zona destinada a riego: 85**
- **Número N para zona donde se ubica la presa: 76.1**

7.4 Cultivos

Según lo publica *DUPLEX (Educa Prado)* en su página web, en Uruguay, después de los años cincuenta, en los que se alcanzaron las mayores superficies cultivadas, la producción agrícola disminuyó significativamente llegando a los niveles más bajos de la historia. En los últimos 20 años esta situación se revirtió, con una intensificación en el uso del suelo sin precedentes.

Actualmente en la región y en Uruguay lidera el proceso de modernización de la agricultura, con la incorporación de nuevas tecnologías, como la siembra directa y los cultivos resistentes a herbicidas, entre otros. En este sentido, la agricultura de granos es el sub-sector agropecuario que muestra mayor incorporación de tecnología, lo que ha llevado a un significativo aumento en su productividad (*DUPLEX – Educa Prado, 2016*).

En el país, el Litoral Oeste, conformado por los departamentos de Salto, Paysandú, Río Negro, Soriano, Colonia, San José, Canelones y parte de Florida y Flores, son la principal zona agrícola, responsable de la producción de la mayoría de los cereales (trigo, cebada, avena, maíz, sorgo, etc.) y oleaginosas (soja, girasol, colza, etc.), (*DUPLEX – Educa Prado, 2016*).

La integración de diversos cultivos, permite a los productores, alternar cultivos de invierno, verano y pasturas, dándole un carácter dinámico a la producción. Estos modelos, conocidos como sistemas mixtos agrícolas-ganaderos, han sido parte de la transformación tecnológica ocurrida en la región.

Los principales cultivos de invierno sembrados en el país son el trigo, la cebada y la avena. En los últimos años la superficie sembrada con cultivos de invierno rondó las 350 mil hectáreas, con un importante aumento en las áreas de trigo y cebada. La superficie

sembrada anualmente con trigo se ubica en el entorno de las 190 mil hectáreas y la de cebada en las 120 mil. Las áreas sembradas anualmente de cada cultivo varían, dependiendo de diversos factores como el clima, los mercados, etc. El rubro predominante asociado a los sistemas con agricultura es sin dudas la ganadería de carne. Por ese motivo, la instalación de praderas asociadas con cultivos de invierno constituye una práctica tradicionalmente utilizada por productores agrícola-ganaderos. Cerca de 100 mil hectáreas son sembradas utilizando esta modalidad, lo que equivale al 27% del área total de cultivos de invierno. La proporción de siembras asociadas es mayor en los cultivos de avena y trigo, en tanto que en la cebada el porcentaje es notoriamente inferior. En verano, los principales cultivos sembrados en el país son la soja, el girasol, el maíz y el sorgo. La superficie sembrada con cultivos de verano se ubica en el entorno de las 420 mil hectáreas, variando también en función de distintos factores. Por orden de superficie, se siembran anualmente cerca de 300 mil hectáreas de soja, 50 mil hectáreas de girasol, 50 mil hectáreas de maíz y 15 mil hectáreas de sorgo (DUPLEX – Educa Prado, 2016).

Según lo antes mencionado, se decide realizar diferentes simulaciones de cultivos, de verano e invierno, utilizando aquellos que predominan en el país: soja y maíz en verano, y trigo y cebada en invierno. En relación a lo anterior, se recopiló información de diferentes fuentes (INIA Uruguay, FAO, etc.) para obtener las características necesarias de cada cultivo y así poder realizar las simulaciones. Entre dichas características las más importantes son: coeficientes de cultivo, fecha de siembra, duración de las etapas del ciclo vegetativo y producción óptima.

7.4.1 Información relevante de cultivos simulados

En las tablas siguientes se aprecian algunas características importantes de los cultivos a simular. Dicha información varía según la fuente consultada, por lo que se debe tener cuidado a utilizarla.

Cultivo	Fecha de Siembra ¹	Cosecha Óptima (kg/ha) ²	Días Ciclo vegetativo ³				
			Germinación	Crecimiento	Floración	Madurez	Total
Soja	24-Oct	3900 - 4300	20	35	60	25	140
Maíz	01-Oct	11000 - 14000	30	40	50	30	150
Trigo inv.	20-Abr	4630 - 7000	20	60	70	30	180
Cebada inv.	04-Jun	4100 - 8500	20	25	60	30	135

1 Datos tomados de bibliografía [10] [24] [43] [44]

2 Datos tomados de bibliografía [14] [15] [22]

3 Datos tomados de bibliografía [12] (FAO)

Tabla 11 - Información relevante de cultivos (I)

Cultivo	Profundidad radicular (m) ¹	Coeficiente de cultivo (Kc) ¹		
		Inicial	Medio	Final
Soja	0.60 - 1.30	0.40	1.15	0.50
Maíz	1.00 - 1.70	0.30	1.20	0.35
Trigo inv.	1.50 - 1.80	0.70	1.15	0.25
Cebada inv.	1.00 - 1.50	0.30	1.15	0.25

1 Datos tomados de bibliografía [12] (FAO)

Tabla 12 - Información relevante de cultivos (II)

Respecto a las fechas de siembra, se recomienda se realice en un determinado rango de días, pero a modo de realizar el diseño, se escogió una fecha adecuada.

El valor de producción óptima, producción máxima obtenida en condiciones óptimas de fertilización y humedad, es un dato difícil de estimar. Sin embargo, diferentes bibliografías proponen dicho valor en base a experimentos y mediciones en campo.

Además, existe en bibliografía el rendimiento promedio de diferentes cultivos en los últimos años. En base a ello, se presentan algunas gráficas extraídas del documento de la FAO: *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua* (2012), donde se aprecian dichos valores. Sin embargo, se debe tener en cuenta que dicho valor promedio se realizó en base a resultados obtenidos para diferentes condiciones, en donde se incluye: con y sin riego, con y sin fertilización, diferentes tipos de suelo, diferentes tipos de clima, países desarrollados o subdesarrollados. Por lo tanto, dicho valor puede ser muy diferente a las condiciones del presente ejercicio.

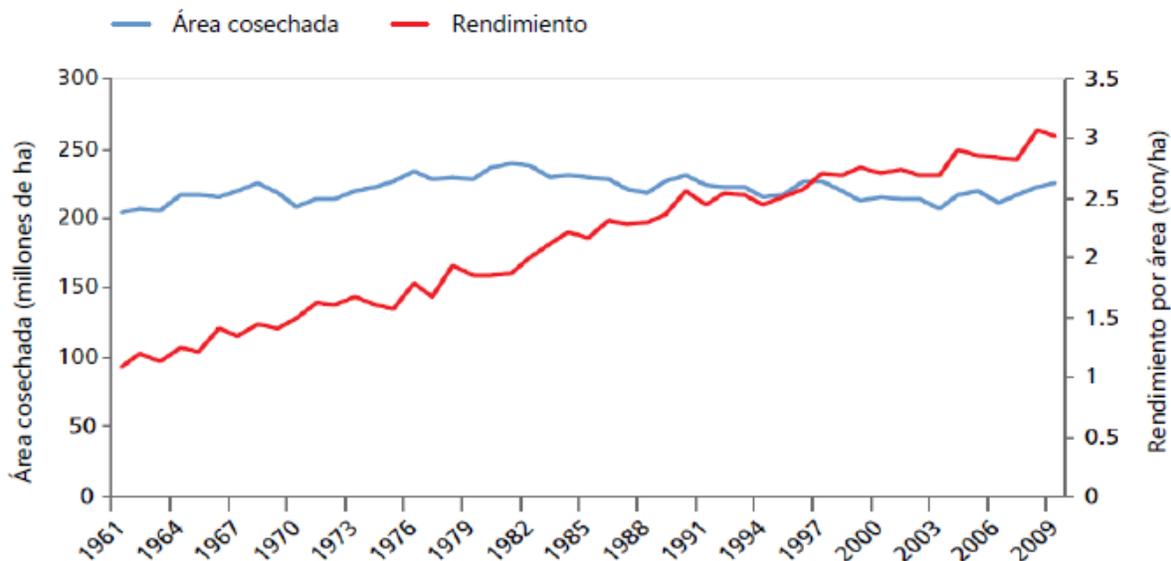


Figura 38 - Área mundial cosechada de trigo y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)

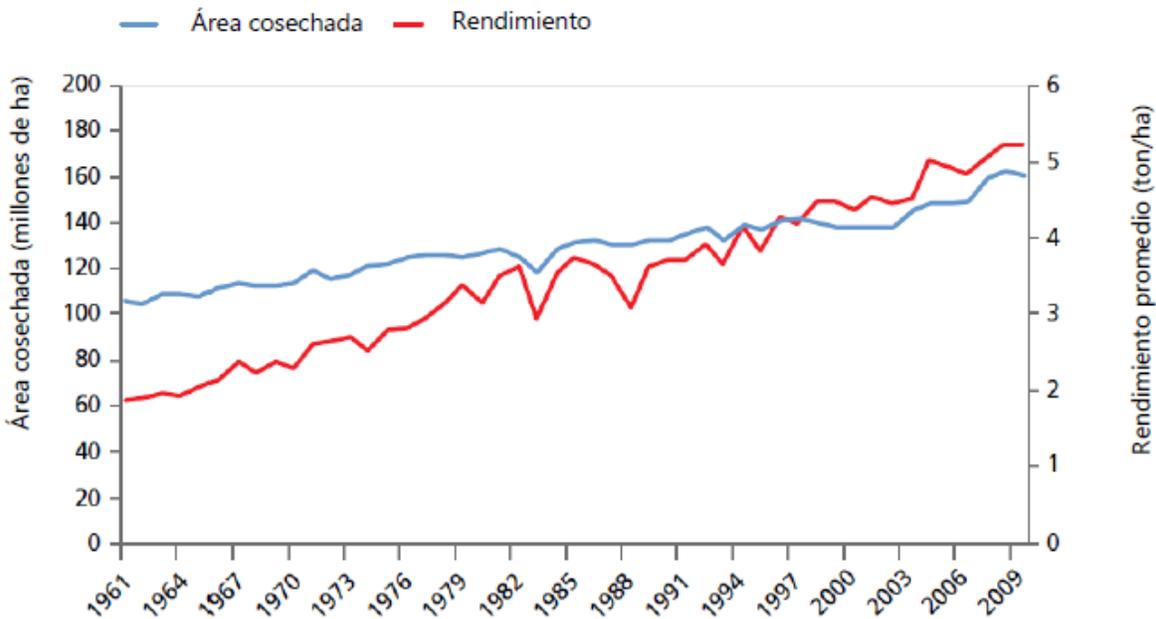


Figura 39 - Área mundial cosechada de maíz y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)

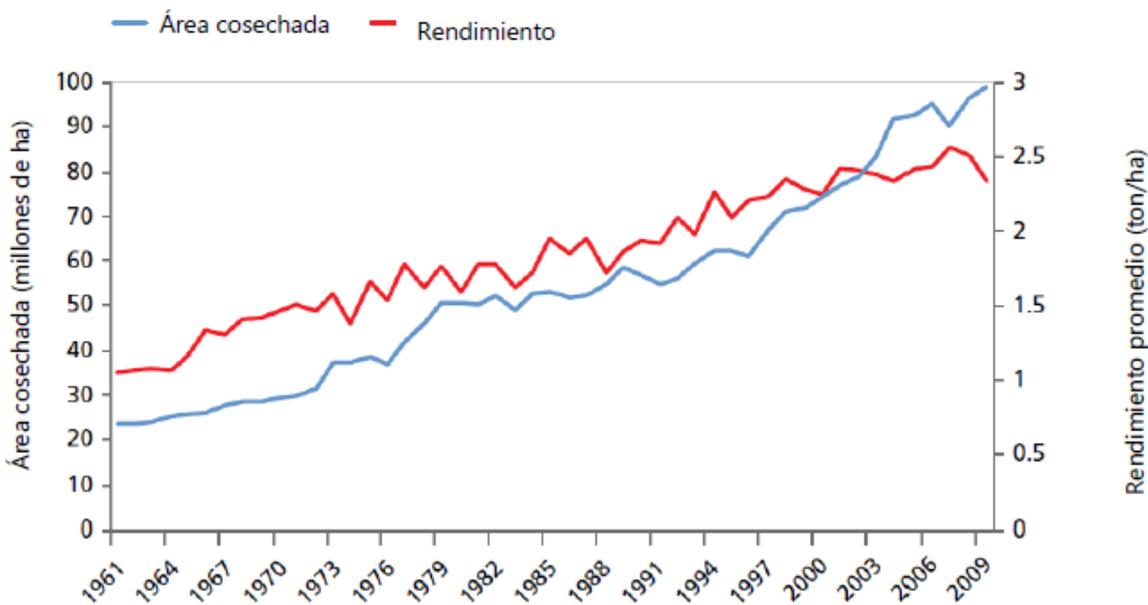


Figura 40 - Área mundial cosechada de soja y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)

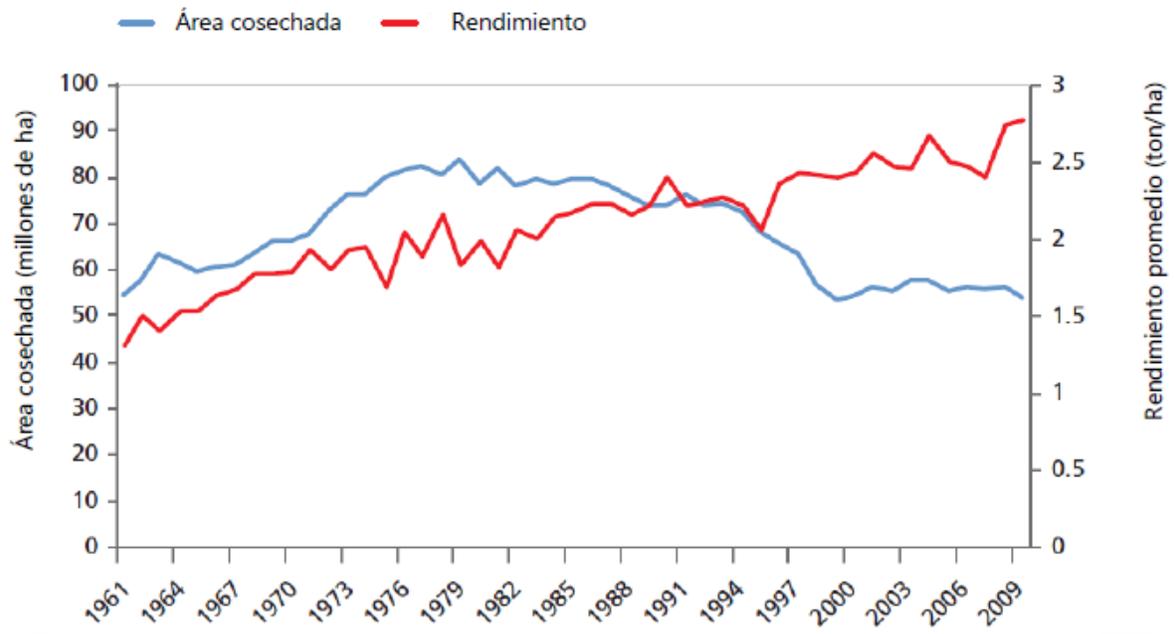


Figura 41 - Área mundial cosechada de cebada y rendimiento promedio durante el período 1961 - 2009 (FAO, 2011 citado en FAO, 2012)

8 APLICACIÓN DE SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CULTIVOS

8.1 Metodología desarrollada en la UNAM

Se realizó la simulación de cuatro cultivos, dos de verano y dos de invierno. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada caso.

Se destaca que la utilización de los valores climatológicos de la estación Mercedes para el año seco seleccionado (2013), y que el suelo es franco arcillo limoso.

8.1.1 Soja

El primer paso de la simulación es establecer la política de riego y calcular la dosis que se debe aplicar al suelo. Para ello es necesario calcular la humedad aprovechable:

$$HA = h_r \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) = 0.178m \approx 177.89mm$$

Suponiendo que **se aplica el riego cuando la humedad en el suelo haya disminuido un 40% de la máxima** se tiene:

$$dosis = POL \times h_r \frac{\gamma_s}{\gamma_a} \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) = 71.16mm$$

Esto quiere decir que se aplica el riego cuando en el suelo se tiene una humedad de:

$$Hum(aplicar riego) = HA - dosis = 106.74mm$$

Por otro lado, **se supone que al inicio el suelo se encuentra en PMP y se aplica un riego igual a la lámina máxima (HA) y, por lo tanto, se parte de una humedad igual a la CC.** Sin embargo, esta sería la situación más crítica, dado que la humedad del suelo puede ser mayor a PMP, por lo que la lámina de riego a aplicar al inicio puede ser menor (o nula si el suelo ya se encuentra en CC).

Una vez determinados estos valores se procede a la aplicación del modelo de Flinn para cada día del ciclo vegetativo. En la tabla siguiente se presenta un resumen de resultados obtenidos mientras que en el Anexo 2 se detalla la simulación completa del cultivo.

Resultados			
Número de riegos	No. R	4	
Lamina total de riego	$\Sigma r =$	391.36	mm
Lamina no aprovechable de lluvia	$\Sigma Q =$	163.20	mm
Lamina de lluvia total	$\Sigma Y =$	549.80	mm
Producciones			
Desarrollo Germinación	19.95		
Desarrollo Crecimiento	30.14		
Desarrollo Floración	34.97		
Desarrollo Madurez	24.74		
Producción Óptima	4100.00	kg/ha	
Producción Final	3066.82	kg/ha	
% respecto al óptimo	74.8	%	

Tabla 13 - Resumen de resultados del modelo para soja con una política igual al 40% de la humedad aprovechable

Se destaca que con la política seleccionada se obtienen 3067 kg/ha, un 75% en relación a la producción óptima. Además, es necesario aplicar 4 riegos, que corresponden a 391.36mm.

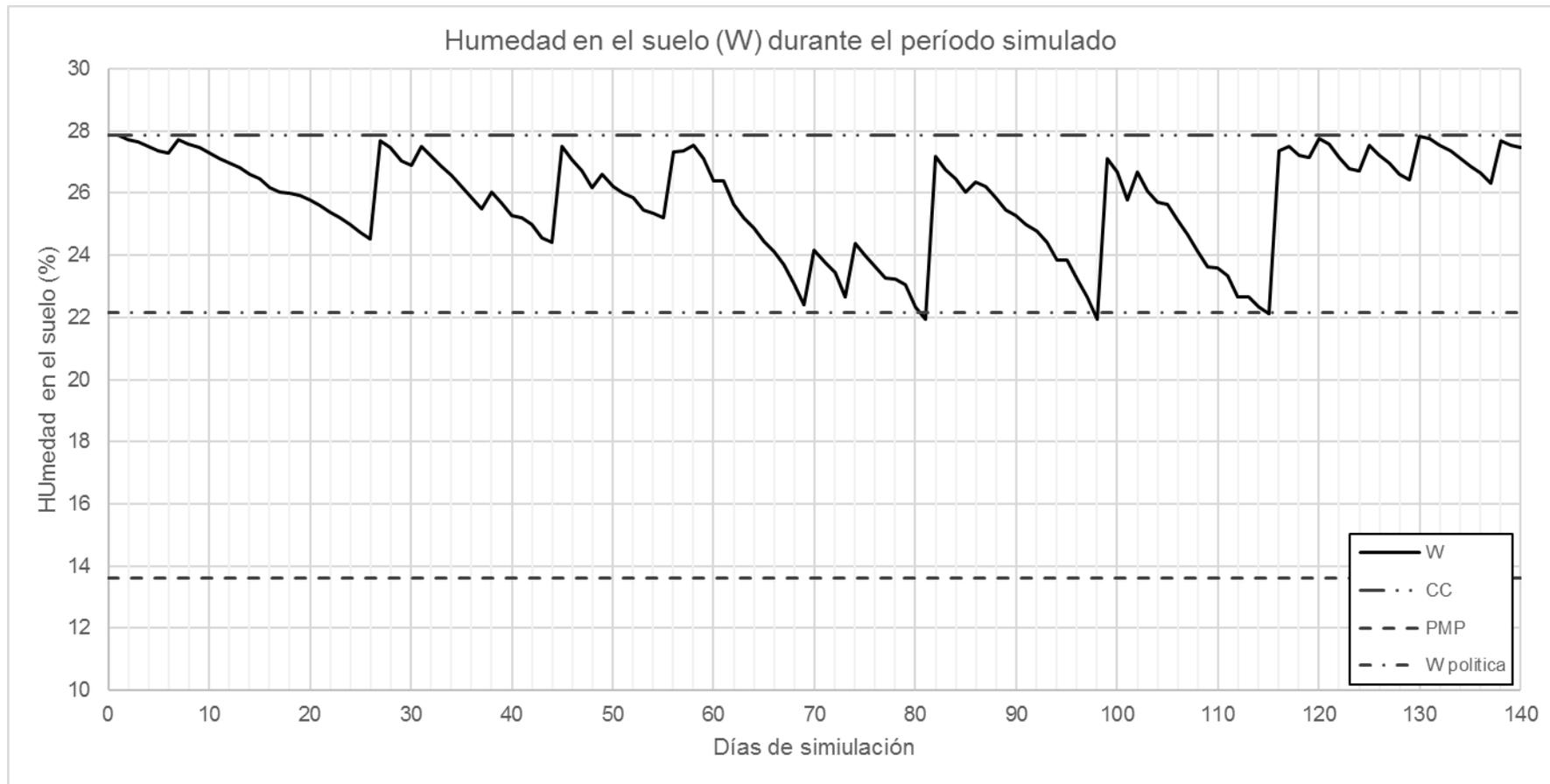


Figura 42 - Humedad en el suelo (W) para cada día de simulación

Una vez determinado el modelo es posible variar la política y observar cómo será la producción y cantidad de agua necesaria. En la tabla siguiente se observan los resultados obtenidos según la política de riego seleccionada.

Política (% de HA)	Dosis (mm)	Lámina total Riego (mm)	No. Riegos	Producción (kg/ha)	% respecto al óptimo
5	8.89	649.31	54	3367	82.1
10	17.79	622.62	26	3347	81.6
20	35.58	498.10	10	3249	79.2
30	53.37	391.36	5	3201	78.1
40	71.16	391.36	4	3067	74.8
50	88.95	355.78	3	2963	72.3
60	106.74	284.63	2	2870	70.0
70	124.52	302.42	2	2857	69.7
80	142.31	177.89	1	2534	61.8
90	160.10	177.89	1	2534	61.8
100	177.89	177.89	1	2534	61.8

Tabla 14 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para soja

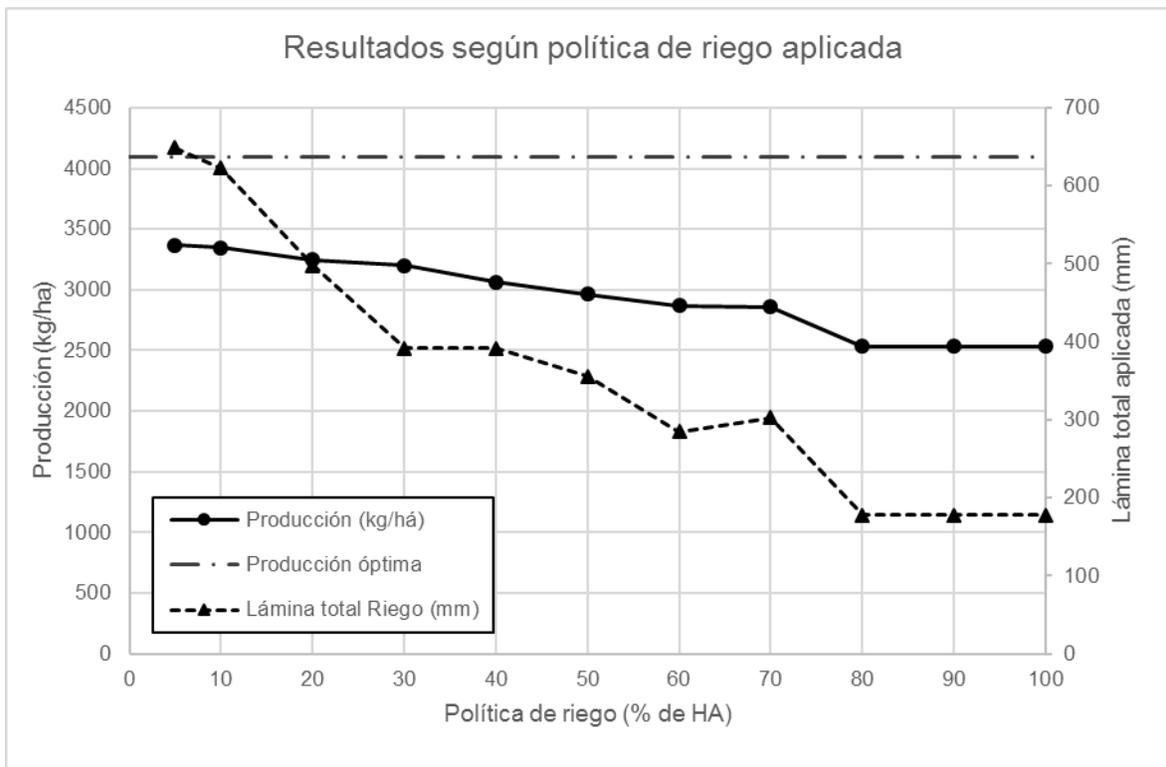


Figura 43 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para soja

Se deduce de la tabla y figura anterior que a medida que la política es más pequeña, es decir, a medida que permitimos que la humedad en el suelo disminuya menos, el rendimiento es mayor. Sin embargo, es necesario aplicar una mayor lámina y números de riegos lo que indica que, para la selección de la mejor opción, es necesario evaluar la cantidad de agua disponible para el riego y la forma de aplicarlo.

De los resultados anteriores se destaca también que, si se elige una política de 80% o mayor, es necesario aplicar solo el primer riego propuesto que lleva la humedad del suelo de PMP a CC. Por lo tanto, de encontrarse el suelo con una humedad cercana a la CC al inicio en la fecha de siembra, puede que no sea necesario regar el cultivo en ningún momento del ciclo vegetativo.

8.1.2 Maíz

De la misma manera que con la soja se realizó una simulación variando la política de riego obteniendo los siguientes resultados:

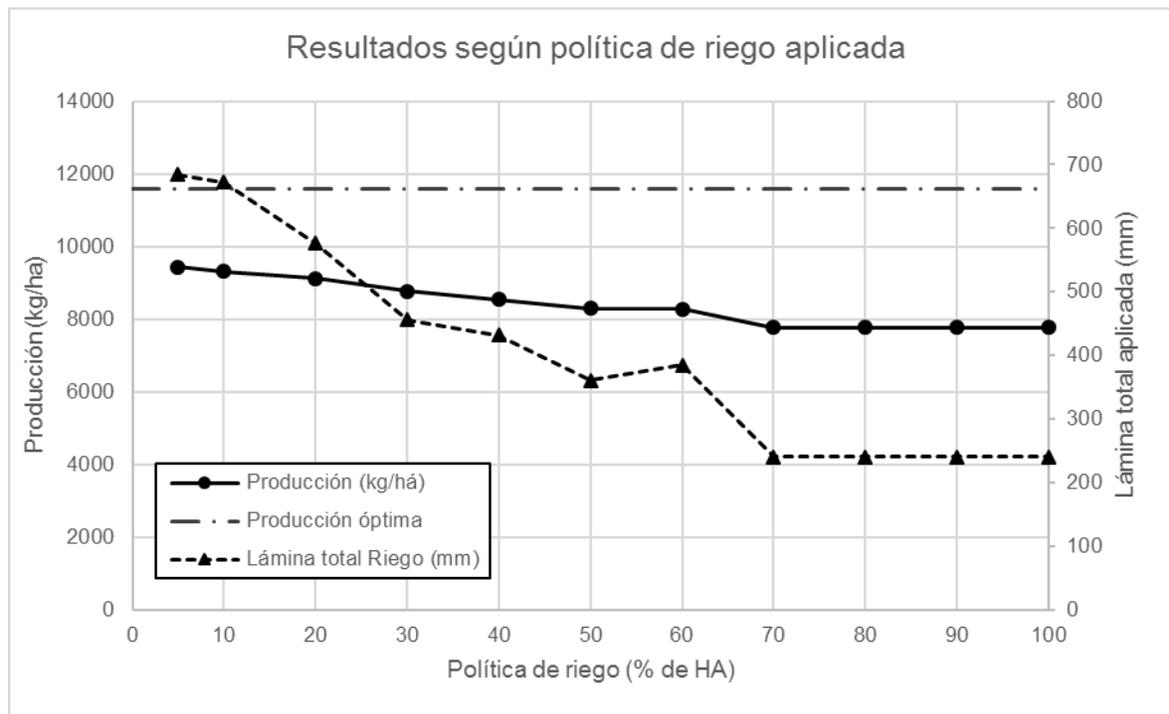


Figura 44 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para maíz

Comparando los resultados obtenidos para soja y maíz se observan resultados similares en cuanto a porcentaje de rendimiento respecto a la producción óptima. Sin embargo, dado que tanto la profundidad radicular del maíz como el ciclo vegetativo son mayores respecto a la soja, la necesidad de agua es mayor.

Se observa también que la producción de maíz es mayor a la de soja, es decir, se obtienen más kilos de maíz que de soja por hectárea. Lo anterior implica la importancia de conocer el precio de cada cultivo para saber cuál de los dos es más rentable. De todas maneras, pensando en una rotación de cultivos, ambas opciones son buenas para cultivo de verano.

8.1.3 Trigo de invierno

Siguiendo en la misma línea, se puede realizar el análisis y obtener resultados similares para el trigo cultivado en invierno.

En la tabla y figura siguiente se observa que a partir de una política del 60% solo es necesario aplicar el riego inicial propuesto. Esto indica que, de encontrarse el suelo con una humedad elevada (cercana a CC), puede no ser necesario regar en ningún momento. Además, el buen rendimiento que se obtiene en cualquiera de las políticas de riego podría estar asociado a la adaptabilidad del cultivo a esos meses.

Política (% de HA)	Dosis (mm)	Lámina total Riego (mm)	No. Riegos	Producción (kg/ha)	% respecto al óptimo
5	14.68	528.34	17	5744	98.8
10	29.35	469.64	7	5737	98.7
20	58.70	469.64	4	5731	98.6
30	88.06	469.64	3	5710	98.2
40	117.41	410.93	2	5711	98.2
50	146.76	440.28	2	5646	97.1
60	176.11	293.52	1	5625	96.7
70	205.47	293.52	1	5625	96.7
80	234.82	293.52	1	5625	96.7
90	264.17	293.52	1	5625	96.7
100	293.52	293.52	1	5625	96.7

Tabla 15 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para trigo de invierno

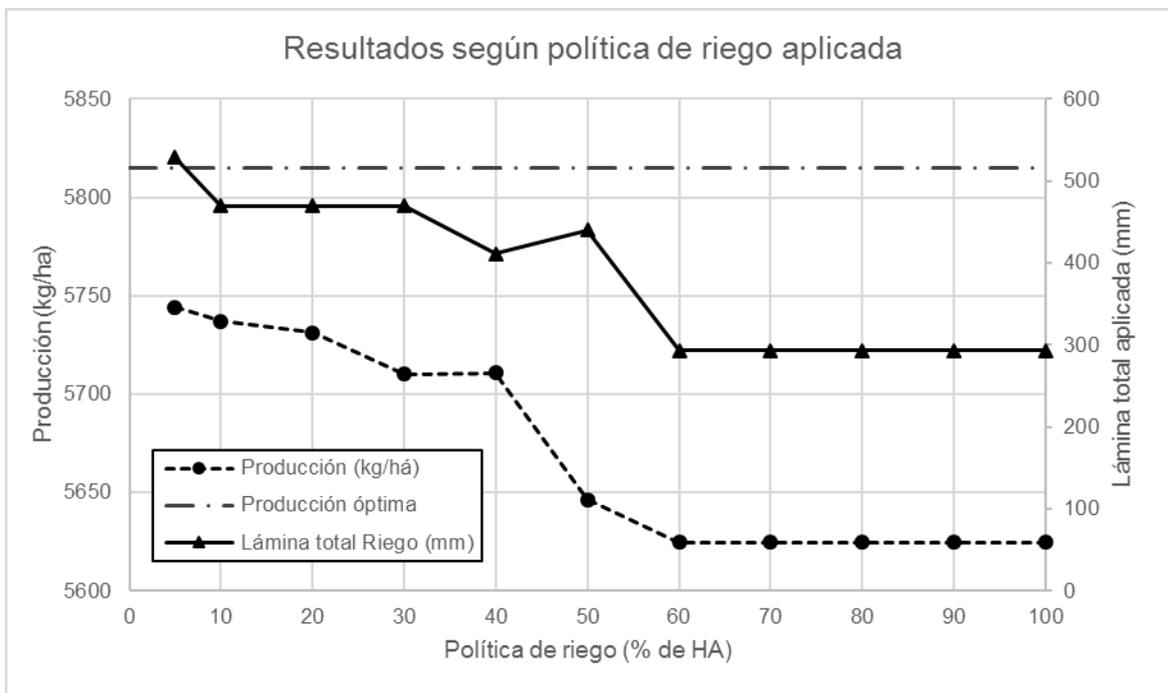


Figura 45 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para trigo de invierno

8.1.4 Cebada de invierno

Se repite el mismo análisis que con los cultivos anteriores obteniendo resultados similares al trigo de invierno.

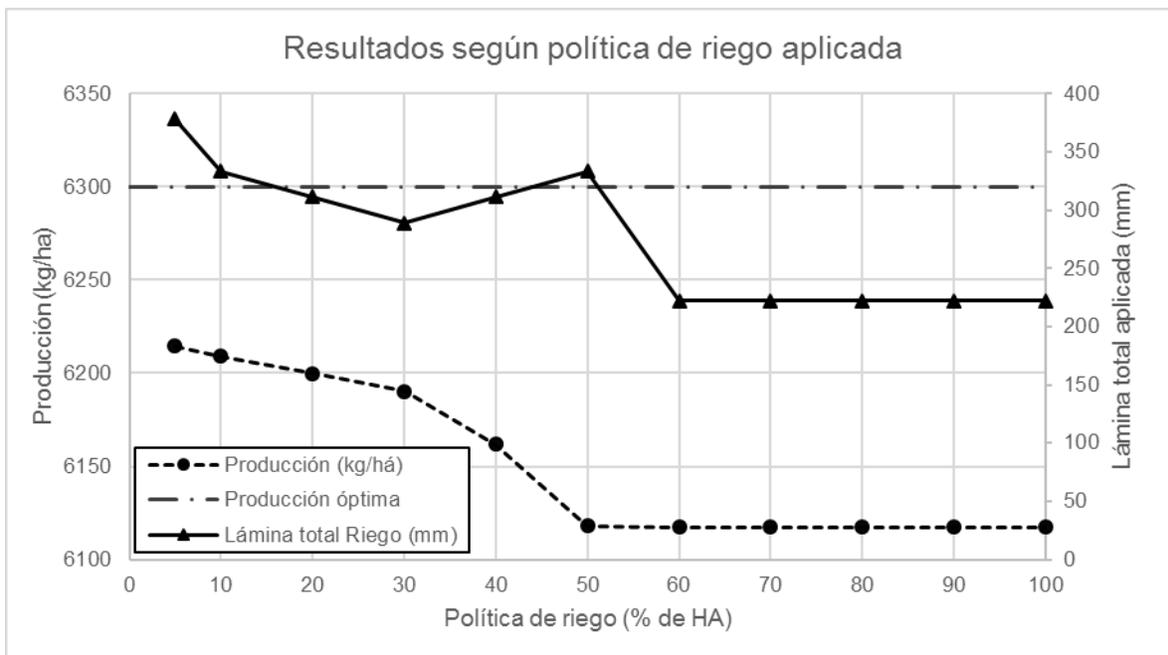


Figura 46 - Resultados obtenidos según política seleccionada, para cebada de invierno

8.1.5 Conclusiones del resultado obtenido con modelo de Flinn

De las simulaciones realizadas para los diferentes cultivos se aprecia que, de una manera sencilla, se puede variar la política de riego y obtener la lámina total de agua necesaria y el rendimiento por hectárea. Sin embargo, debido a que el valor de producción máxima varía en las bibliografías consultadas para un mismo cultivo, resulta razonable tener en cuenta solo el porcentaje respecto al óptimo seleccionado.

Se observa además que el porcentaje de rendimiento es mayor en los cultivos de invierno respecto a los de verano, esto es debido a la adaptabilidad que tienen los cultivos a las épocas en que son cultivados. Si bien no se presentan los resultados, se simuló el trigo también en verano obteniendo rendimientos similares a los de soja y maíz, por lo que se puede afirmar que el rendimiento se encuentra asociado al clima.

En un principio, parece pertinente seleccionar una política de 30% o 40% para los cultivos de verano, dado que se obtendrían buenos rendimientos en comparación con políticas menores, y se utiliza menos agua. Para los cultivos de invierno, se propone solo regar al inicio, si la humedad del suelo es baja. De todas maneras, se debe realizar un balance hídrico a la presa de almacenamiento que tome en cuenta las demandas de riego, y así determinar si es factible la opción elegida o hay que cambiar la política.

Respecto a los parámetros del suelo, si en vez de suponer que el suelo es franco arcillo limoso fuera franco arcilloso, opción que también es viable, se obtendrían resultados prácticamente iguales.

En la tabla siguiente se observan las demandas de agua que se tendrían con las condiciones elegidas: año más seco del período (2013) y PMP en el suelo a la fecha de la siembra, lo que implica una gran lámina de riego inicial. Además, se tuvo en cuenta una eficiencia en el riego del 80% (eficiencia típica en riego por aspersión) por lo que las demandas que allí aparecen son de agua bruta.

De todas maneras, allí se establecen las necesidades de agua en condiciones críticas, por lo que resulta razonable realizar otras simulaciones en condiciones no tan estrictas, de manera de poder regar un área mayor la mayor parte de los años. Es por ello que, con el modelo AquaCrop, se estimarán las necesidades de agua utilizando diferentes condiciones iniciales y climáticas.

	Cultivos			
Verano	Soja	Soja	Maíz	Maíz
Invierno	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
Mes	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)
Enero	178	178	0	0
Febrero	89	89	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	367	0	367	0
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	278	0	278
Julio	0	0	0	0
Agosto	147	0	147	0
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	222	222	300	300
Noviembre	0	0	0	0
Diciembre	0	0	0	0
Total (mm)	1003	767	814	578

Tabla 16 - Demanda mensual de agua bruta según cultivos

8.2 Simulación de cultivos con AquaCrop

8.2.1 Datos de entrada

Como ya se mencionó en capítulos anteriores el paquete AquaCrop requiere información de clima, cultivo, suelo y manejo.

Respecto a los datos de clima se utilizó información de las estaciones descritas.

En relación a los datos de cultivos se utilizaron los archivos existentes en la base de datos del paquete, los cuales, como ya se mencionó fueron calibrados y validados. De todas maneras, se modificaron aquellos parámetros no conservativos y en los que se encontró información para la región de estudio.

La información de suelo también parte de los archivos existentes en la base de datos, pero modificando aquellos parámetros en lo que se tiene información, similar a lo realizado para los cultivos.

Por último, en lo que refiere al manejo, se establecieron diferentes planes de riego, siempre teniendo en cuenta la disminución de cierto porcentaje en el agua disponible en el suelo, similar a lo realizado con el modelo de Flinn.

8.2.2 Resultados modelo AquaCrop

Una vez realizadas las simulaciones, el modelo permite observar diferentes resultados, tanto diarios como globales. Es posible observar balances de clima y agua, producción, salinidad del suelo, perfil del agua en el suelo, lluvia y comportamiento del conjunto clima-suelo-cultivo.

Los datos que allí se muestran pueden ser almacenados en la memoria del computador y luego abiertos como hojas de cálculo, con el fin de realizar operaciones con ellos o graficar los resultados.

Cabe destacar también que el modelo tiene la posibilidad de crear proyectos que permiten simular múltiples años y múltiples cultivos.

A continuación se presentan diferentes resultados para la simulación de la soja, simulando el mismo período que el utilizado en el modelo de Flinn para ese cultivo (2013, año seco) y aplicando al inicio una lámina de riego igual a la diferencia entre CC y PMP. Básicamente se realizaron cuatro simulaciones: una sin riego y las restantes con políticas diferentes de riego.

Producción			% aumento respecto a simulación sin riego
Sin riego	2165	kg/ha	
Política 80%	2966	kg/ha	37.0%
Política 40%	3387	kg/ha	56.4%
Política 20%	3398	kg/ha	57.0%

Lámina de riego		
Sin riego	0	mm
Política 80%	340	mm
Política 40%	496	mm
Política 20%	636	mm

Tabla 17 - Resultados globales para soja con modelo AquaCrop

Respecto a los valores “globales” obtenidos, resulta obvio obtener un aumento en la producción según la política es menos estricta en relación al cultivo, es decir, según se permite un menor descenso del agua en el suelo, lo que implica una mayor lámina total de agua.

Si se compara con el modelo de Flinn, allí se obtuvo 2534 kg/ha sin riego y 3067 kg/ha con una política del 40%. Esos valores indican un aumento del rendimiento de aproximadamente el 21% mientras que con AquaCrop se espera un aumento del 56%. Por otro lado, si se observan las láminas de riego para una política del 40%, Flinn indica la necesidad de aplicar 391mm mientras que AquaCrop necesita 496mm.

Sin embargo, realizar comparaciones entre ambos modelos no resulta demasiado prudente dadas las diferencias que existen entre ellos:

- Cantidad y diferencia de parámetros tanto en cultivo como en suelo.
- Leyes de cálculo en que se basa cada uno de ellos.
- Simplicidad del modelo: AquaCrop incorpora más procesos de cálculo que el modelo de Flinn, lo que hace que requiera más información para su ejecución.

De todas maneras, pese a las diferencias entre ambos modelos, resulta adecuado no detenerse en los valores de producción obtenida dado que los modelos no fueron calibrados, sino en el porcentaje de aumento/disminución de la producción según varía la política de riego. Además, es importante tener en cuenta la cantidad de agua y en qué momentos se debe aplicar la misma.

En la Figura 47 se aprecia los resultados del agua en el suelo durante el ciclo vegetativo según la política elegida. En dicha figura se toma como 140mm el valor de capacidad de campo y se calcula, en base a ese valor, el resto de los parámetros.

Según la información de suelo ingresada al modelo, se calcula la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, la cual es de 140mm para el caso analizado.

Se observa también una variación en la curva del punto de marchitamiento permanente. Eso es debido al crecimiento de las raíces y al tiempo en que estas llegan a su máxima longitud, es por eso que, luego de pasado cierto período de tiempo, este valor se mantiene constante.

Para las simulaciones que permitan determinar los rendimientos y las demandas de agua se supone:

- Cultivos de verano: soja y maíz.
- Cultivos de invierno: trigo y cebada.
- Políticas de riego: sin riego, descenso de 40% y 80% de la humedad del suelo.
- Condiciones climáticas: dos períodos diferentes en años secos, teniendo en cuenta la lámina de lluvia durante el ciclo vegetativo de cada cultivo.

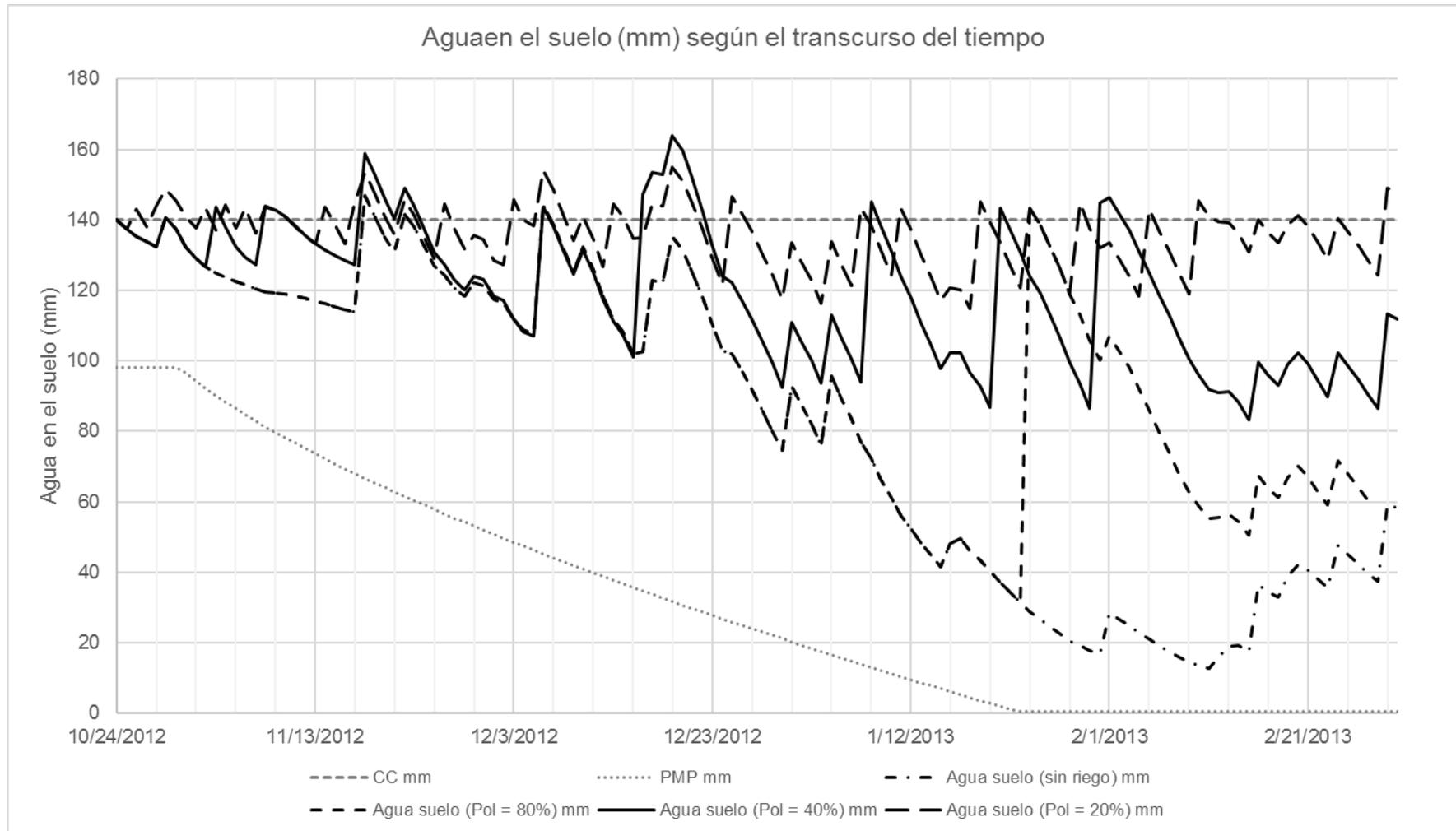


Figura 47 – Agua en el suelo a lo largo del ciclo vegetativo, según la política de riego elegida. Modelo AquaCrop

Soja

Maíz

Fecha siembra	24 - Octubre
----------------------	--------------

Fecha siembra	01 - Octubre
----------------------	--------------

Lámina lluvia (mm)	Agua en el suelo al inicio (%)	Política (%)	Producción (kg/ha)	No. Riegos	Lámina total riego (mm)
316	100	sin riego	1233	0	0
316	100	80	2586	2	195
316	100	40	3359	8	389
316	50	sin riego	0	0	0
316	50	80	1302	2	180
316	50	40	3363	11	488
316	0	sin riego	0	0	0
316	0	80	1928	4	310
316	0	40	3358	13	564
527	100	sin riego	2165	0	0
527	100	80	2966	1	119
527	100	40	3387	6	275
527	50	sin riego	0	0	0
527	50	80	2324	3	269
527	50	40	3389	9	383
527	0	sin riego	0	0	0
527	0	80	1928	4	319
527	0	40	3388	11	473

Lámina lluvia (mm)	Agua en el suelo al inicio (%)	Política (%)	Producción (kg/ha)	No. Riegos	Lámina total riego (mm)
366	100	sin riego	1202	0	0
366	100	80	1202	0	0
366	100	40	12589	4	412
366	50	sin riego	0	0	0
366	50	80	0	0	0
366	50	40	12420	6	500
366	0	sin riego	0	0	0
366	0	80	0	0	0
366	0	40	12463	7	525
738	100	sin riego	7660	0	0
738	100	80	7660	0	0
738	100	40	13036	3	319
738	50	sin riego	5708	0	0
738	50	80	5708	0	0
738	50	40	13049	3	303
738	0	sin riego	1676	0	0
738	0	80	1676	0	0
738	0	40	12999	5	449

Tabla 18 - Resultados de diferentes simulaciones para cultivos de verano, con AquaCrop

Trigo

Fecha siembra	20 - Abril
----------------------	------------

Lámina lluvia (mm)	Agua en el suelo al inicio (%)	Política (%)	Producción (kg/ha)	No. Riegos	Lámina total riego (mm)
268	100	sin riego	5678	0	0
268	100	80	5678	0	0
268	100	40	5678	1	126
268	50	sin riego	5012	0	0
268	50	80	5012	0	0
268	50	40	5678	2	162
268	0	sin riego	0	0	0
268	0	80	0	0	0
268	0	40	5685	3	266
459	100	sin riego	5719	0	0
459	100	80	5719	0	0
459	100	40	5719	0	0
459	50	sin riego	5719	0	0
459	50	80	5719	0	0
459	50	40	5719	0	0
459	0	sin riego	4100	0	0
459	0	80	4100	0	0
459	0	40	5726	3	224

Cebada

Fecha siembra	15 - Mayo
----------------------	-----------

Lámina lluvia (mm)	Agua en el suelo al inicio (%)	Política (%)	Producción (kg/ha)	No. Riegos	Lámina total riego (mm)
141	100	sin riego	3220	0	0
141	100	80	3220	0	0
141	100	40	3220	1	98
141	50	sin riego	1892	0	0
141	50	80	1892	0	0
141	50	40	3290	2	150
141	0	sin riego	0	0	0
141	0	80	0	0	0
141	0	40	3301	4	271
286	100	sin riego	3231	0	0
286	100	80	3231	0	0
286	100	40	3231	0	0
286	50	sin riego	3231	0	0
286	50	80	3231	0	0
286	50	40	3231	1	24
286	0	sin riego	2221	0	0
286	0	80	3127	1	45
286	0	40	3303	2	137

Tabla 19 - Resultados de diferentes simulaciones para cultivos de invierno, con AquaCrop

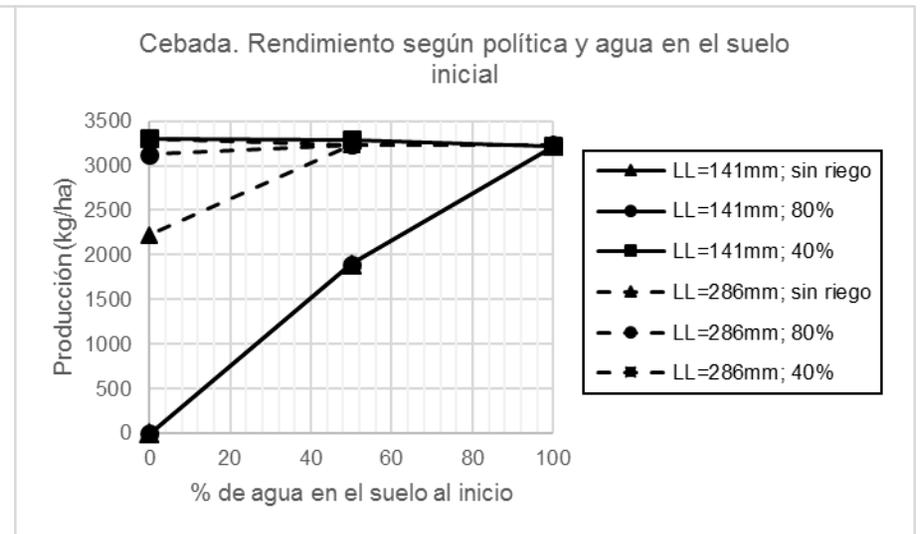
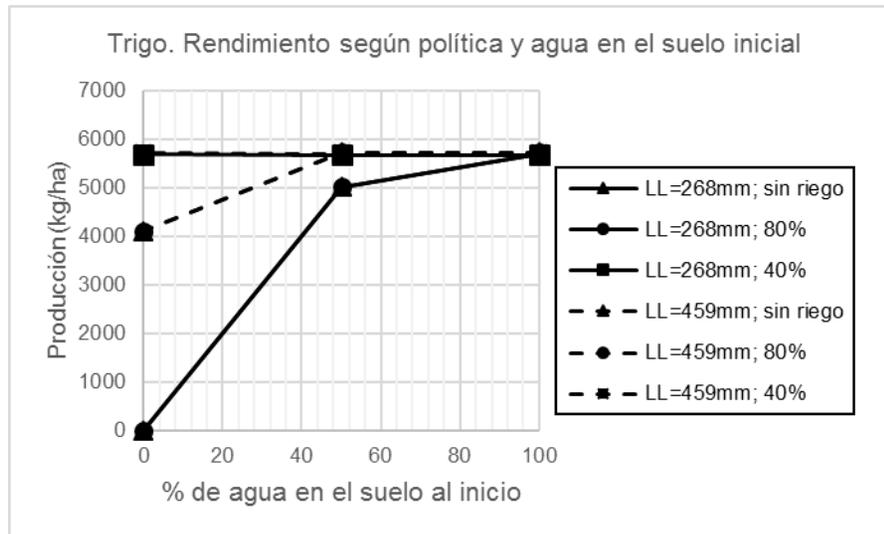
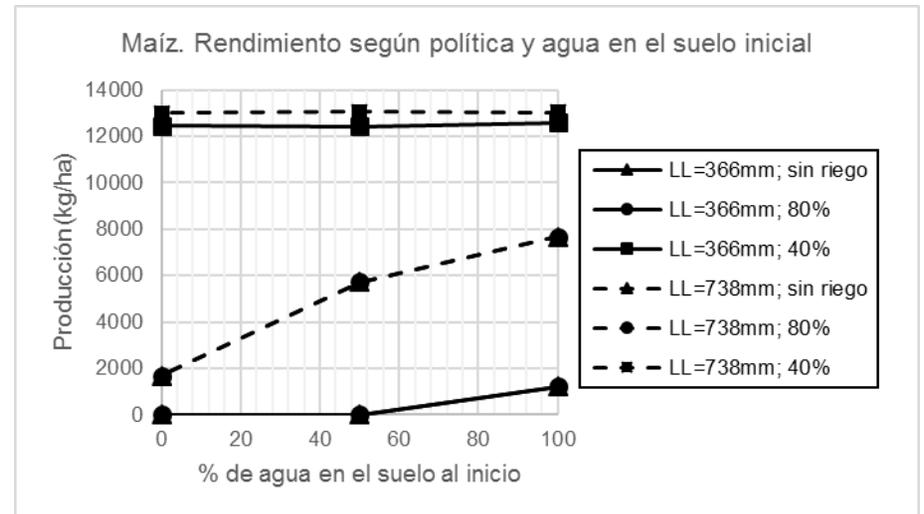
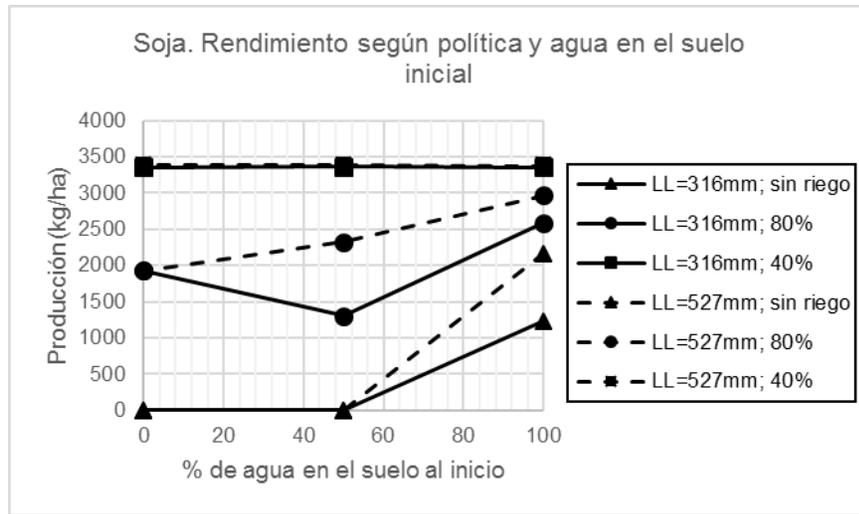


Figura 48 - Gráficas de rendimiento según política y lámina de lluvia

Los resultados se presentan en función de la producción (kg/ha) aunque, como ya se mencionó, esos valores son dudosos dada la falta de calibración de los modelos. De todas maneras, es útil a fines de comparar aumento o disminución del rendimiento en función del agua disponible para el cultivo durante el ciclo vegetativo.

A grandes rasgos, de los resultados se deduce lo siguiente:

- Los rendimientos mejoran si: el agua disponible inicial es mayor, la política de riego es menos estricta con el cultivo y la lámina de lluvia durante el ciclo vegetativo es mayor.
- Debido a la adaptabilidad de los cultivos al clima, los cultivos de verano requieren un plan de riego para obtener buenos rendimientos mientras que en invierno se podría evitar.

Por lo tanto, **para realizar el balance hídrico se suponen tres casos, considerando una eficiencia de riego del 80% (riego por aspersión):**

1. Cultivos de verano e invierno con política del 40%; agua disponible inicial en el suelo correspondiente al 50% de la máxima (diferencia entre CC y PMP) año seco
2. Cultivo de verano con política del 40%; cultivos de invierno sin riego; agua disponible inicial en el suelo correspondiente al 50% de la máxima; año seco.
3. Cultivo de verano con política del 40%; cultivos de invierno sin riego; agua disponible inicial en el suelo correspondiente al 50% de la máxima; año medio.

Verano	Cultivos			
	Soja	Soja	Maíz	Maíz
Invierno	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
Mes	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)
Enero	223	223	155	155
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	34	0	34	0
Mayo	169	0	169	0
Junio	0	65	0	65
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	123	0	123
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	83	83	36	36
Noviembre	78	78	180	180
Diciembre	226	226	254	254
Total (mm)	813	798	828	813

Tabla 20 - Demanda de agua bruta (riego) considerando: política de 40% en verano e invierno; con 50% del agua disponible al inicio; año seco

	Cultivos			
Verano	Soja	Soja	Maíz	Maíz
Invierno	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
Mes	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)
Enero	223	223	155	155
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	83	83	36	36
Noviembre	78	78	180	180
Diciembre	226	226	254	254
Total (mm)	610	610	625	625

Tabla 21 - Demanda de agua bruta (riego) considerando: política de 40% en verano; sin riego en invierno; con 50% del agua disponible al inicio; año seco

	Cultivos			
Verano	Soja	Soja	Maíz	Maíz
Invierno	Trigo	Cebada	Trigo	Cebada
Mes	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)	Agua (mm)
Enero	239	239	157	157
Febrero	0	0	0	0
Marzo	0	0	0	0
Abril	0	0	0	0
Mayo	0	0	0	0
Junio	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0
Agosto	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0
Octubre	56	56	0	0
Noviembre	73	73	95	95
Diciembre	111	111	128	128
Total (mm)	479	479	379	379

Tabla 22 - Demanda de agua bruta (riego) considerando: política de 40% en verano; sin riego en invierno; con 50% del agua disponible al inicio; año medio

8.2.3 Conclusiones del resultado obtenido con el modelo AquaCrop

Al igual que el modelo de Flinn, *AquaCrop* permite obtener resultados cambiando diferentes condiciones, ya sea condiciones iniciales, climáticas o políticas de riego. Además, una vez realizada la simulación es posible observar y exportar los resultados de manera de trabajar con ellos por medio de hojas de cálculo o alguna otra herramienta.

Las simulaciones realizadas arrojan conclusiones similares al modelo de Flinn: es necesario aplicar láminas de riego en los cultivos de verano para obtener buenos rendimientos mientras que es posible evitar dicho riego durante el invierno.

La facilidad de ejecución del software permitió realizar muchas simulaciones y poder analizar los resultados. Con ello fue factible establecer las demandas de los cultivos para poder determinar el área a regar por medio de un balance hídrico en el embalse.

De la misma manera que con el modelo de Flinn, el no contar con información que permita calibrar los modelos implica **tener un cuidado especial en los valores de rendimiento final que arroja cada simulación, siendo más prudente comparar los porcentajes de aumento o disminución entre cada simulación.**

8.3 Reflexión de los modelos utilizados

A lo largo de los capítulos se observó la facilidad que tienen ambos modelos para estimar los rendimientos de diferentes cultivos con diferentes condiciones, además de determinar la cantidad de agua necesaria y en qué momento es oportuno regar según la política seleccionada. No obstante, ambos paquetes de simulación son diferentes.

El modelo de Flinn es un modelo viejo que incorpora parámetros básicos de cultivo y suelo para realizar la simulación, lo que lo hace bueno para estimar rendimientos y oportunidad de riego de manera preliminar en proyectos de este tipo. Además, es interesante su aplicación con fines educativos dado que su construcción permite entender cómo funciona el sistema clima-suelo-cultivo.

El modelo *AquaCrop* es una herramienta “nueva” que incorpora diferentes procesos, lo que permite realizar un sinnúmero de situaciones variando las condiciones de manera fácil y rápida. Esto hace que, actualmente, sea uno de los modelos más utilizados en lo que a simulación de cultivos se refiere.

Por lo tanto, si bien en el presente trabajo se obtuvieron resultados similares con ambos modelos, se recomienda utilizar el modelo *AquaCrop* debido a que incorpora más procesos y opciones de simulación, además de contar con cultivos y tipos de suelo calibrados que permiten obtener resultados más confiables. Sumado a lo anterior, *AquaCrop* se encuentra respaldado por la FAO, una de las entidades más influyentes en el área de cultivos.

9 ANÁLISIS DE DISPONIBILIDAD DE AGUA

Para determinar la disponibilidad de agua se realizó un modelo mensual de precipitación-escorrimento. En este caso se utilizó el **modelo de Temez**, el cual se encuentra calibrado para todo el territorio uruguayo y es el que se recomienda utilizar a los ingenieros proyectistas.

Cabe destacar que la calibración realizada en Uruguay para obtener los parámetros intervinientes en el modelo se realizó a partir de 12 cuencas aforadas por la Dirección Nacional de Aguas (DINAGUA). Dichas cuencas fueron estudiadas en “Balances Hídricos Superficiales en Cuencas de Uruguay” (Genta et al., 2001).

Para tener conocimiento de cómo se realizó el ajuste del modelo se recomienda leer el Anexo A del *Manual de diseño y construcción de pequeñas presas* (2011) el cual forma parte de los documentos técnicos del Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA).

9.1 Modelo de Temez

Dicho modelo fue propuesto por Temez en 1977 y es un modelo de pocos parámetros, expresado en forma agregada, ya que trabaja con valores medios de las variables y parámetros, es decir, no considera la distribución espacial de los mismos. Reproduce el ciclo hidrológico de manera continua en el tiempo de forma simple y conceptual.

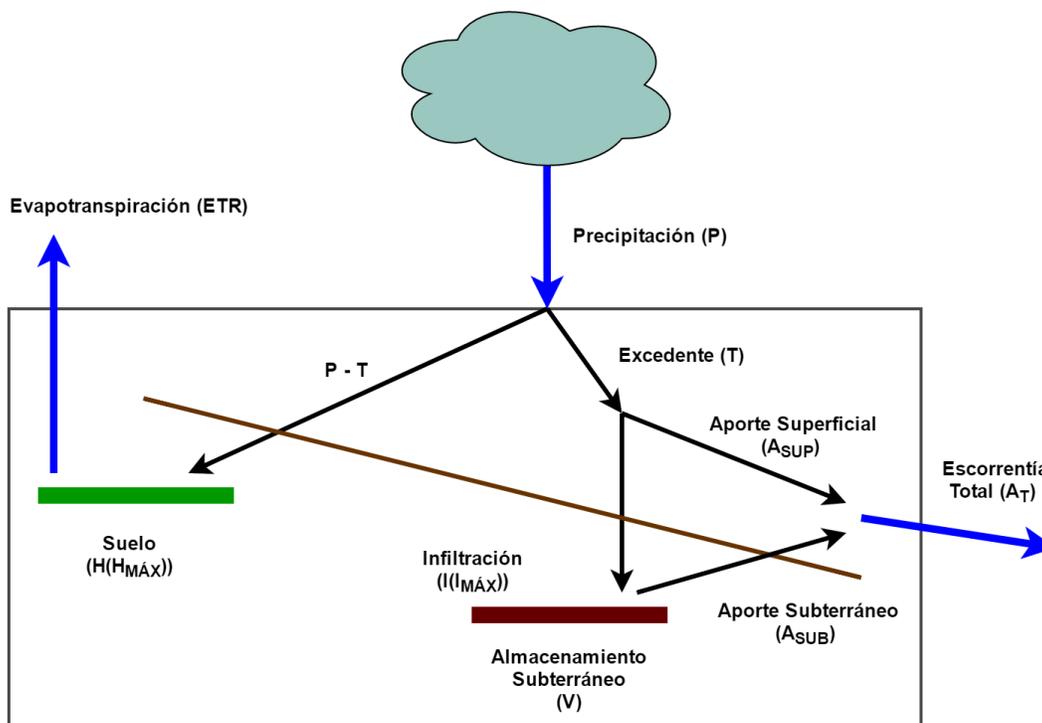


Figura 49 - Esquema conceptual del modelo

El modelo considera dos capas de suelo, una superior no saturada, y una inferior saturada. Estas capas pueden ser consideradas como embalses, generadores de flujo superficial rápido y lento respectivamente.

Según se aprecia en el esquema conceptual, se tiene un excedente (T) del agua que precipita (P), que es drenada y sale por el cauce, mientras que el resto del agua (P-T) es almacenada en la primera capa de suelo. En esta capa se genera evapotranspiración, y es posible además almacenar agua que pasa de un mes a otro.

9.1.1 Proceso de cálculo

El primer paso que es determinar el excedente (T), de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} T_i &= (P_i - P_{0i})^2 / (P_i + \delta_i - 2P_{0i}) & \text{si } P_i > P_{0i} \\ T_i &= 0 & \text{si } P_i \leq P_{0i} \end{aligned} \tag{9.1}$$

Siendo:

$$P_{0i} = CP_0(H_{m\acute{a}x} - H_{i-1}) \tag{9.2}$$

$$\delta_i = H_{m\acute{a}x} - H_{i-1} + ETP_i \tag{9.3}$$

Donde:

P_i : es la precipitación del mes i

T_i : es el excedente en el mes i

$H_{m\acute{a}x}$: es la capacidad máxima de retención de agua en el suelo (primer parámetro del modelo)

H_{i-1} : es la humedad en el suelo al final del mes i-1

ETP_i : es la evapotranspiración potencial en el mes i

CP_0 : segundo parámetro del modelo

Una vez determinado el excedente, se obtiene la evapotranspiración real imponiendo la condición de que su máximo es la evapotranspiración potencial:

$$ETR_i = \text{Mín}(H_{i-1} + P_i - T_i, ETP_i) \tag{9.4}$$

Posteriormente se calcula la humedad en el suelo al final de cada mes (H_i):

$$H_i = \text{Máx}(0, H_{i-1} + P_i - T_i - ETR_i) \tag{9.5}$$

El modelo adopta una ley de infiltración (I) al almacenamiento subterráneo que es función del excedente y del parámetro $I_{m\acute{a}x}$ (tercer parámetro del modelo).

$$I_i = I_{m\acute{a}x} \frac{T_i}{(T_i + I_{m\acute{a}x})} \quad (9.6)$$

Esta ley asegura que la infiltración aumenta con el excedente, pero tiene como asíntota horizontal $I=I_{m\acute{a}x}$.

Una vez determinada la infiltración, ésta se convierte en recarga para el almacenamiento subterráneo, en tanto que el resto escurre superficialmente.

$$A_{sup_i} = T_i - I_i \quad (9.7)$$

El almacenamiento subterráneo, al igual que el suelo, es una capa capaz de retener y entregar agua. Para la distribución entre ambos se propone que la cantidad de agua entregada (Q) es proporcional al volumen almacenado (V), definiendo así el cuarto parámetro, α .

$$\begin{cases} Q_i = \alpha V_i \\ \frac{dV_i}{dt} = I_i - Q_i \end{cases} \quad (9.8)$$

Luego, si se propone que la recarga se concentra en la mitad del mes, el volumen almacenado (V_i) es:

$$V_i = V_{i-1}e^{-\alpha t_i} + I_i e^{-\alpha t_i/2} \quad (9.9)$$

Y el agua entregada:

$$Q_i = Q_{i-1}e^{-\alpha t_i} + \alpha I_i t_i e^{-\alpha t_i} \quad (9.10)$$

Con t_i = cantidad de días del mes i .

De esta manera, el aporte subterráneo (A_{sub}) es:

$$A_{sub_i} = V_{i-1} - V_i + I_i \quad (9.11)$$

Finalmente, la escorrentía total (A_T) se calculó como:

$$A_{T_i} = A_{sub_i} + A_{sup_i} \quad (9.12)$$

9.2 Información necesaria

Para la aplicación del modelo es necesario contar con los siguientes datos:

1. Precipitación mensual:

Se debe disponer de una serie históricas de precipitaciones acumuladas mensuales. Se recomienda utilizar un período de 30 años, el más reciente posible. En función de los anterior, se van a utilizar los datos mensuales de precipitación de la estación Dolores, aportados por INUMET.

2. Área de la cuenca de aporte:

Es necesario determinar el área de la cuenca de aporte, la cual se delimitó a partir de las cartas del Servicio Geográfico Militar 1:50.0000 y cuya superficie es de 85.57 ha (ver Figura 36).

3. Agua Disponible:

Se calcula la cantidad de agua disponible de los suelos de la cuenca ponderando por las respectivas áreas ocupadas de cada Unidad Cartográfica de suelo. Para ello se utiliza la tabla denominada “Agua disponible de los suelos de Uruguay” (Molfino y Califra, 2001), ver Anexo 1.

Tipo Suelo	Área (m ²)	AD (mm)	Observaciones
PP1	179788	88.2	<i>Paso Palmar</i>
CñN1	675916	146.4	<i>Cañada Nieto</i>

Agua disponible cuenca	134.2 mm
-------------------------------	-----------------

Tabla 23 - Estimación agua disponible de los suelos de la cuenca donde se ubicará la presa

4. Ciclo anual medio de evapotranspiración potencial

El ciclo anual medio de evapotranspiración potencial se calcula a partir de la

Tabla 24 y la Figura 50. Para ello primero se determina la ETPm, ubicando el baricentro de la cuenca en el mapa y luego, utilizando los coeficientes (ETPi/ETPm) se determina mes a mes la evapotranspiración potencial.

Cabe destacar que en la aplicación del modelo estos valores de ciclo medio deben ser repetidos en todo el ciclo de cálculo.

ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
1.88	1.45	1.19	0.73	0.44	0.29
JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
0.35	0.55	0.78	1.12	1.47	1.78

Tabla 24 - Ciclo anual de evapotranspiración (ETPi/ETPm)

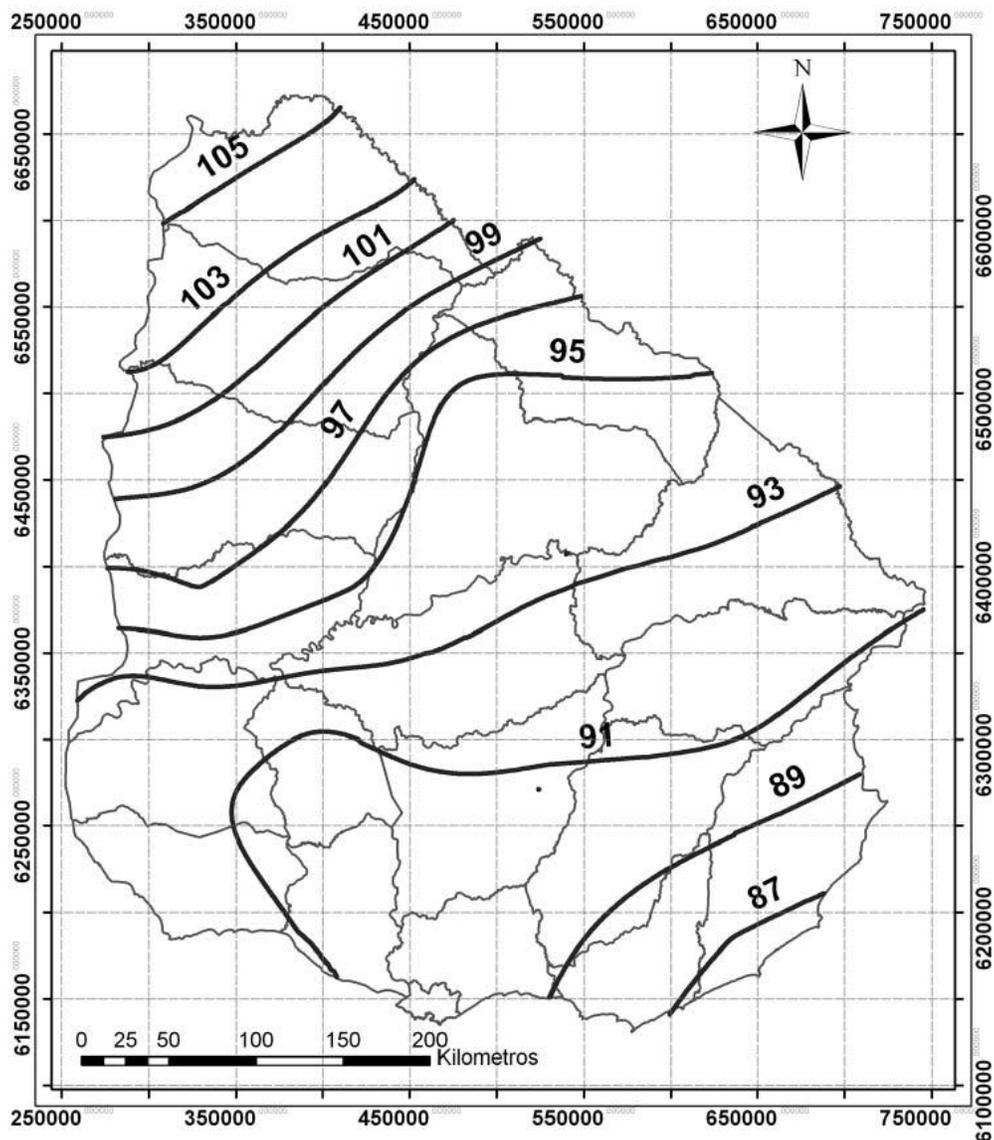


Figura 50 - Isolíneas de evapotranspiración media anual (ETPm, mm/mes). (MVOTMA et al., 2011)

9.3 Resultados del modelo de Temez

El cálculo se realizó en un período de 35 años, desde 1981 a 2015.

Los parámetros seleccionados para el modelo se presentan a continuación y corresponden a los valores obtenidos para todo el país, según la calibración mencionada.

Cpo	0.3	
α	0.0775	1/día
Imáx	386	mm
CAD	0.9161	

Tabla 25 - Parámetros de modelo de Temez

El procedimiento de cálculo se describió anteriormente por lo que en esta sección solo se presentan los resultados en forma gráfica mientras que, en los anexos, se puede observar el cálculo completo.

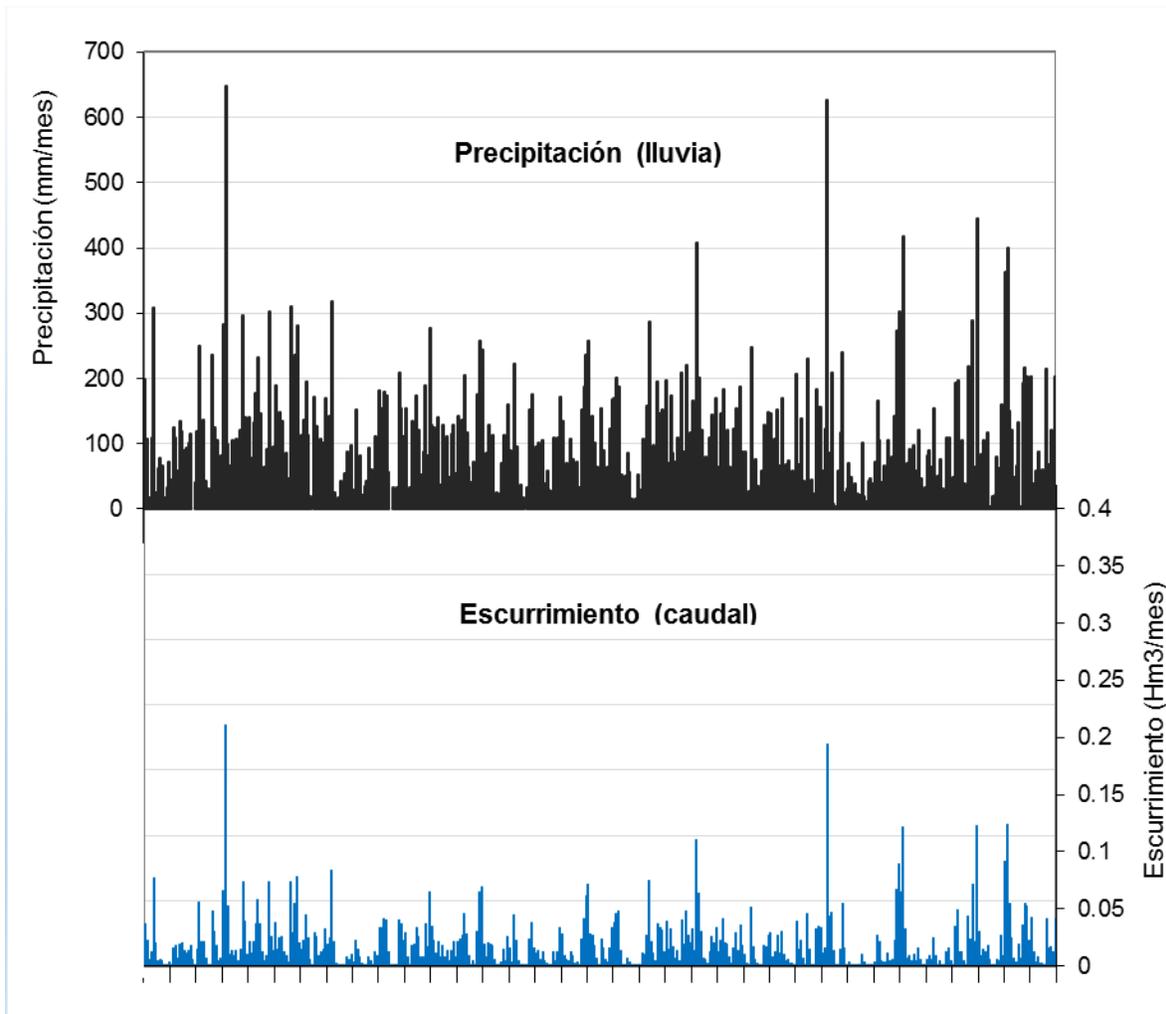


Figura 51 - Escurrimientos acumulados mensuales de la cuenca en el período 1981-2015, según el Modelo de Temez

A partir de los datos anteriores se obtiene que **el volumen de escurrimiento medio anual de la cuenca es de 0.239 Hm³.**

Otro análisis que se puede hacer es observar la variación tanto de la precipitación como del escurrimiento promediados mes a mes.

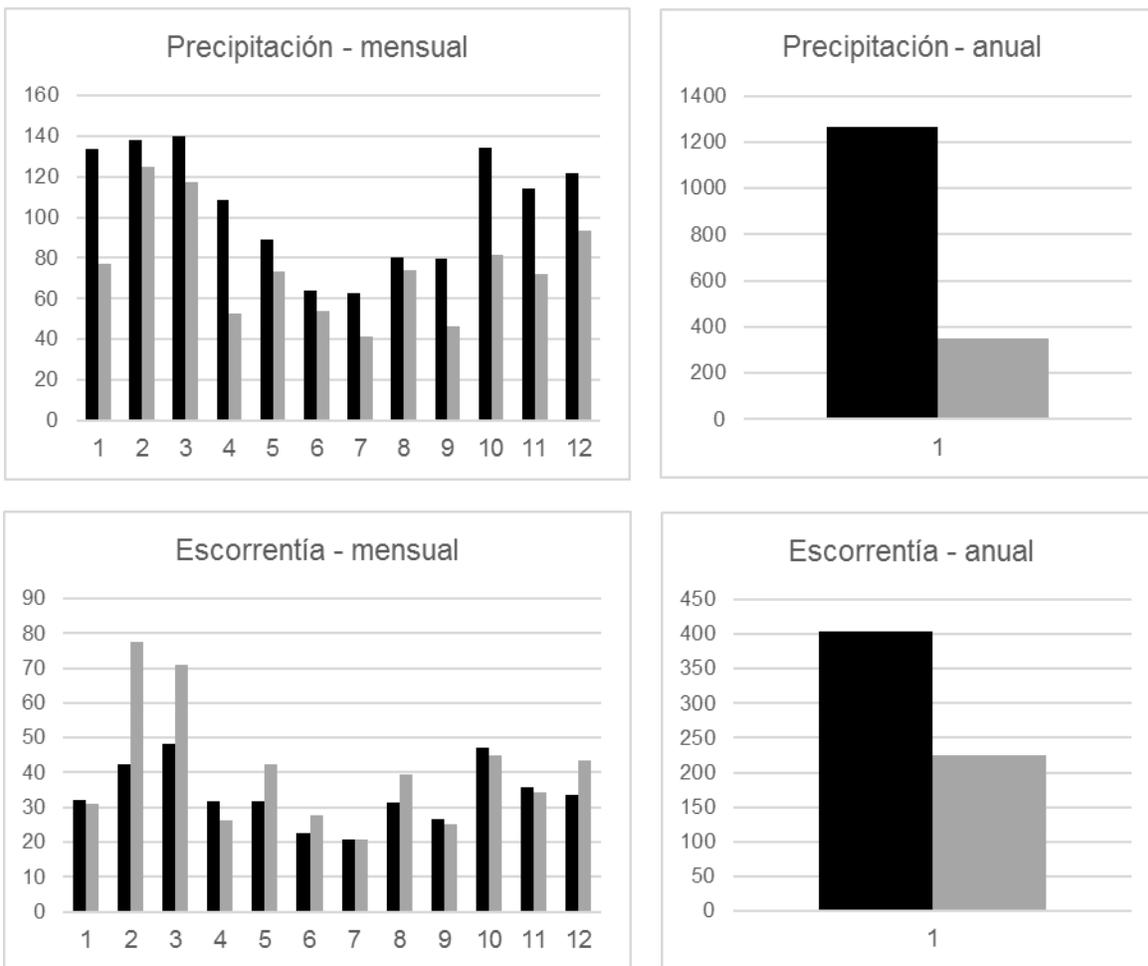


Figura 52 - Precipitación y escurrimiento mensual y anual

Al observar los datos medios mensuales se deduce que las precipitaciones son menores a la mitad del año, en los meses de junio y julio, en tanto que los escurrimientos presentan valores similares a lo largo del año. Al detenerse en los valores de desviación estándar, se observa que estos son elevados e incluso mayores que los valores de las variables, por lo que se podría decir que no es posible predecir o estimar valores mensuales de estos parámetros.

Respecto a los valores anuales, la desviación estándar es menor en comparación con los datos mensuales, por lo que anualmente se podría estimar un valor sin generar grandes errores, sobretodo en la precipitación media anual.

Los escurrimientos calculados se utilizarán en el próximo capítulo para realizar un balance hídrico que nos permita determinar si es factible cumplir con las demandas de riego.

10 BALANCE HÍDRICO EN EMBALSE

En el presente capítulo se realiza un balance hídrico mensual en el embalse a diseñar. A partir de dicho balance se pretende determinar mes a mes el gasto que se puede destinar a riego y realizar un análisis de garantía de la obra para cubrir la demanda.

Diferentes bibliografías detallan la resolución a la problemática de maneras similares, pero en este caso se utiliza la descrita por Aparicio, J. (1992) en su libro *Fundamentos de Hidrología de Superficie*.

Según Ven te Chow et al. (1988) las variables primordiales que deben determinarse en un diseño de embalse para el suministro de agua son: localización y altura de la presa, elevación y capacidad del vertedero, y capacidad y modo de operación de las estructuras de descarga. Además, se establece que las variables de mayor importancia son: la capacidad de almacenamiento en el embalse y el caudal firme, o descarga de agua promedio.

El diseño hidrológico de un embalse para el uso del agua involucra cuatro pasos:

1. Proyección hacia el futuro de la demanda de agua que debe ser suministrada por el embalse.
2. Determinación de la localización y la elevación de la presa, y el cálculo de sus curvas de área superficial – capacidad de almacenamiento.
3. Cálculo de caudal firme del embalse para las diferentes condiciones.
4. Comparación con la demanda de agua y del caudal firme del embalse para determinar su vida útil o período durante el cual el embalse cubrirá las demandas.

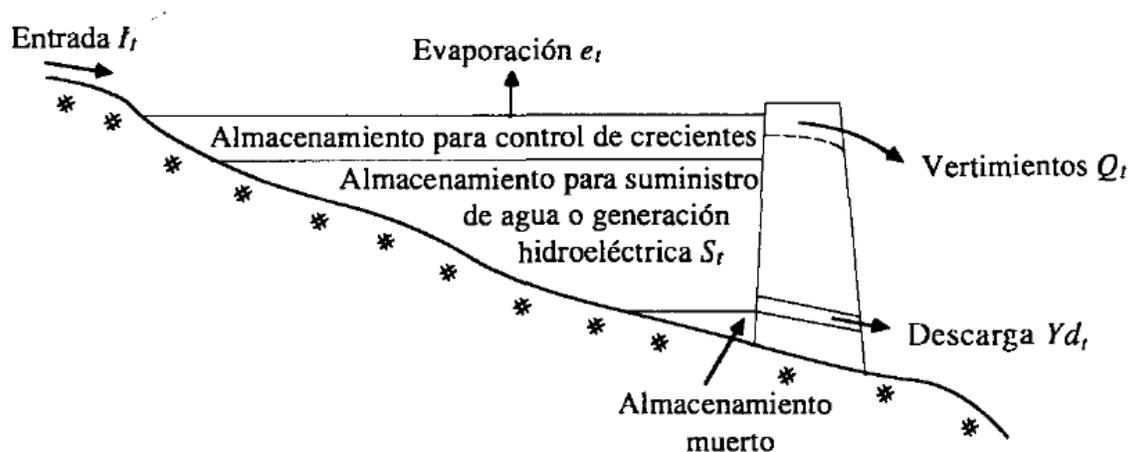


Figura 53 - Zonas de almacenamiento de un embalse, (Ven te Chow, 1988)

10.1 Geometría del vaso del embalse

El primer paso para realizar el balance hídrico es determinar la geometría del embalse. Para ello es necesario tener un relevamiento topográfico de la zona de emplazamiento del mismo. Como mínimo es necesario contar con medidas hasta la cota de coronamiento, y se recomienda trazar curvas de nivel cada un metro.

Luego se deben obtener las leyes que relacionan el volumen con la altura y el área con la altura, y ajustarlas a la zona de interés, que es entre el nivel de obra de toma y de vertedero. Para ello existen diferentes opciones, unas más exactas que otras.

En el presente trabajo se determinaron las áreas de dos maneras diferentes:

1. A través de herramientas del software de sistemas de información geográfica (GIS) utilizado;
2. Aplicando la metodología establecida por el MVOTMA (2011), ver [31].

Con ambas metodologías los resultados fueron similares, por lo que se podría utilizar cualquiera de ellas para el cálculo. A continuación, se aprecian los resultados que se utilizarán en posteriores capítulos.

Cota (m)	Área (m ²)	Volumen (m ³)
44	6907	0
45	18687	12318
46	37680	39952
47	76803	96045
48	125255	196092
49	183940	349752
50	239926	561067
51	297952	829482
52	356681	1156359

Tabla 26 - Cotas y áreas de curvas de nivel de futuro embalse

En la figura siguiente se observan las curvas de nivel del área donde se va a ubicar la presa y, en particular, se aprecian las curvas dentro de la cuenca de estudio (líneas bordó). Además, se propuso un posible cierre de la presa a modo de poder determinar relaciones de volumen-altura y área-altura. Para tener una idea de los valores de dichas curvas, la cota menor dentro de la cuenca tiene un valor de 44m y la mayor de 66m.

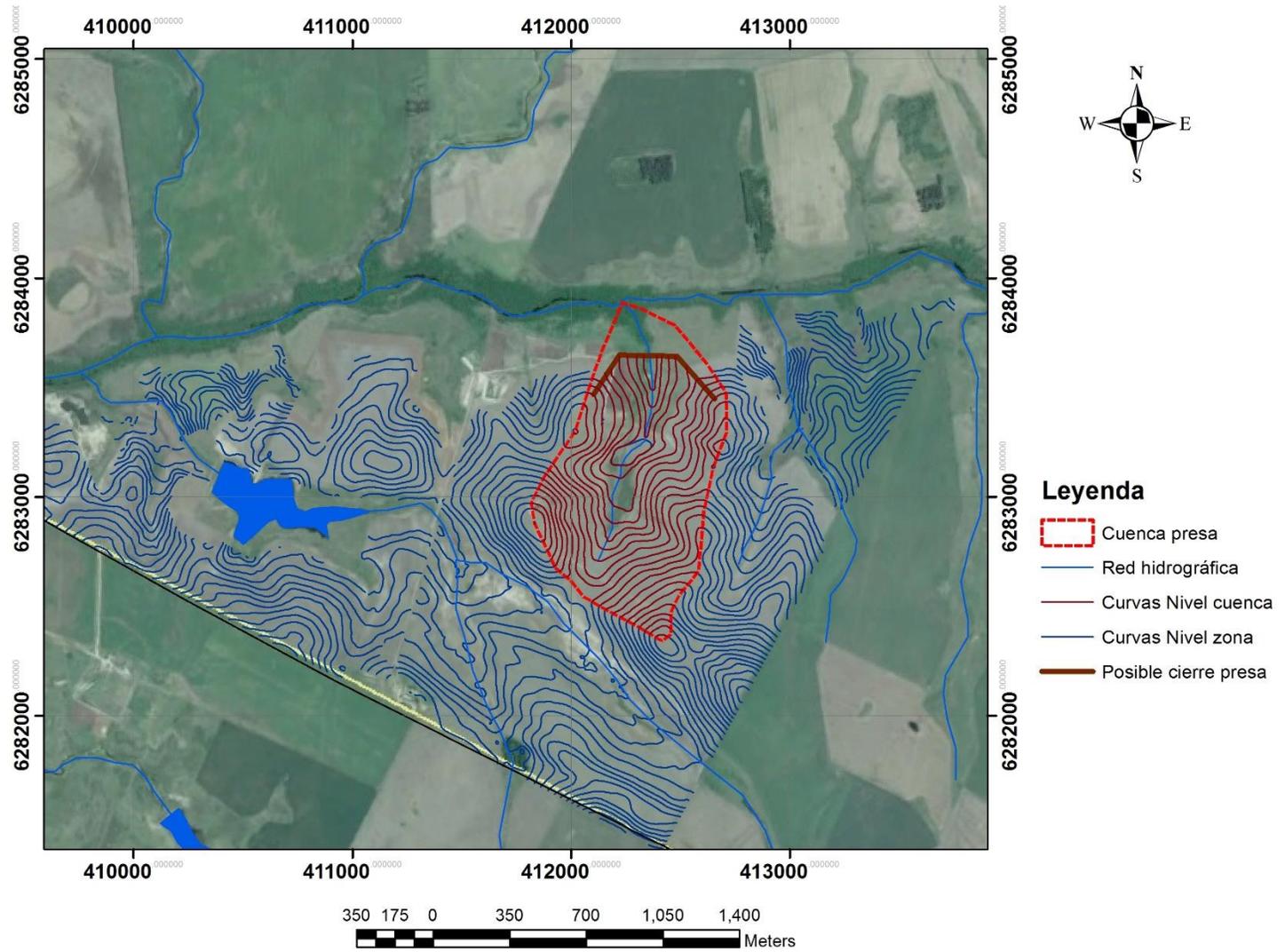


Figura 54 - Curvas de nivel cada 1m en área donde se ubicará la presa

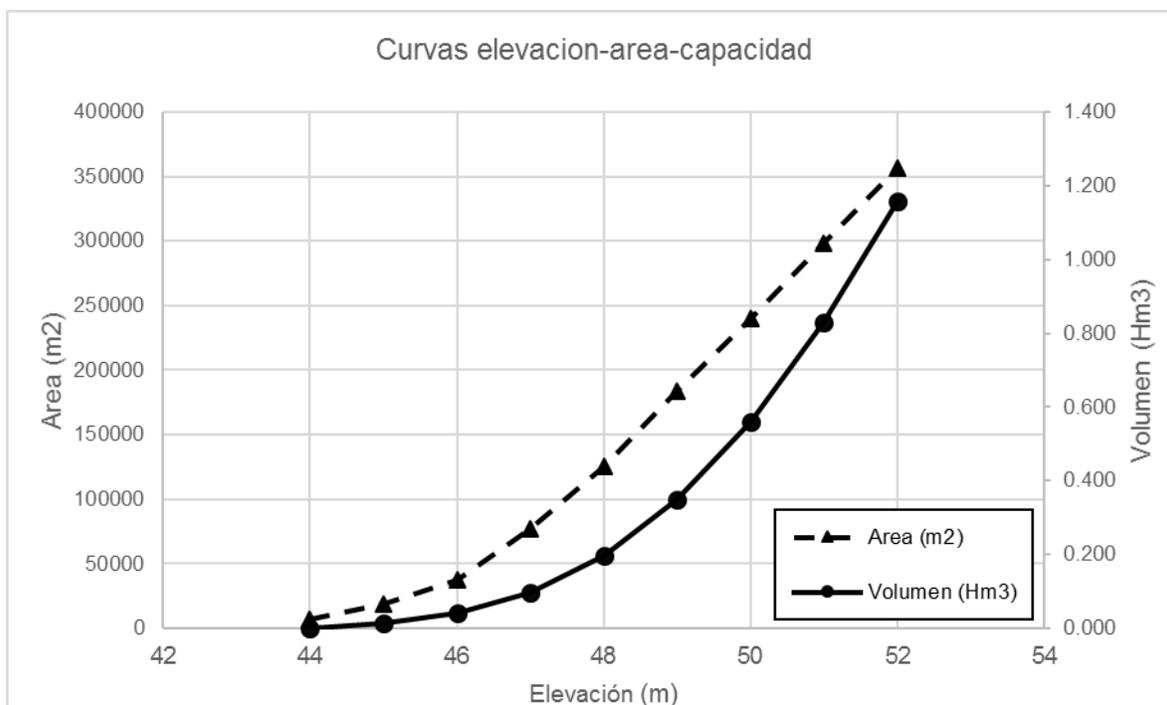


Figura 55 - Curvas elevación-área y elevación-volumen

Una vez determinada las leyes, se puede calcular el volumen máximo de almacenamiento (V_{MAX}) que quedará caracterizado por la cota de toma y la de vertido. Las cotas antes mencionadas se conocen también como NAMINO (nivel de aguas mínimo de operación) y NAMO (nivel de aguas máximo ordinario) respectivamente.

Entonces, suponiendo los siguientes valores:

- NAMINO = 45.0 m
- NAMO = 51.0 m

Se tiene que el volumen de almacenamiento máximo es:

$$V_{MAX} = 0.817 \text{ Hm}^3 \approx 817,164 \text{ m}^3$$

10.2 Metodología balance hídrico

Previo al desarrollo del balance, es importante la definición de los principales componentes de un vaso de almacenamiento, algunos de los cuales ya se mencionaron.

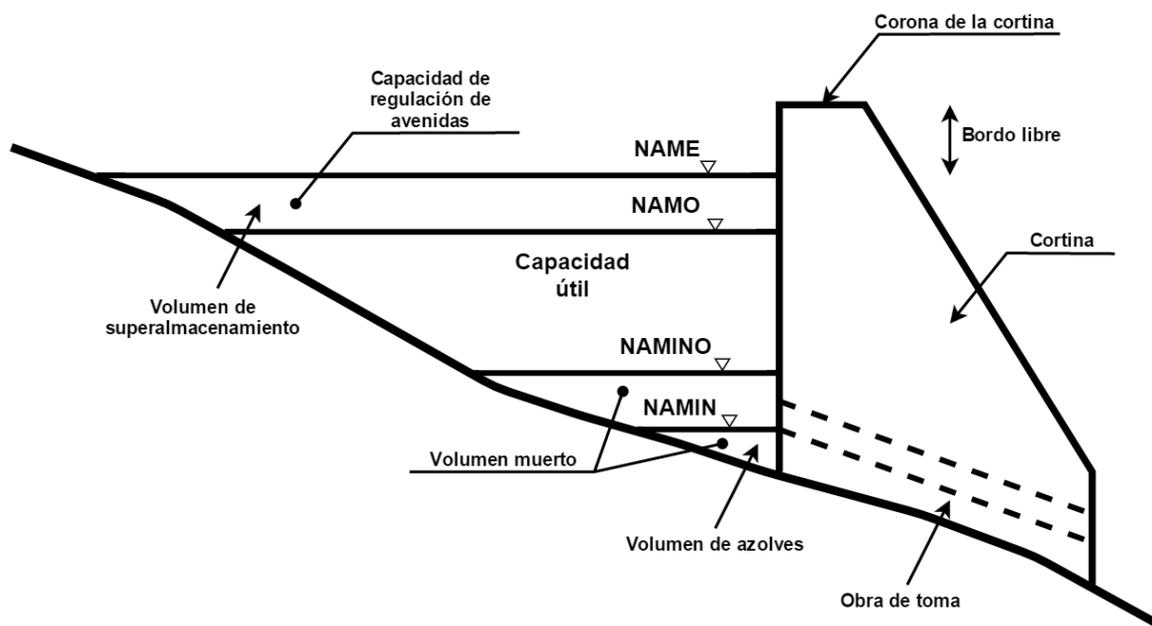


Figura 56 - Principales componentes de un vaso (Aparicio, J., 1992)

- NAMINO: nivel de aguas mínimas de operación. Nivel más bajo con el que puede operar la presa.
- NAMin: nivel de agua mínimas. Coincide con el nivel al que se encuentra la entrada de la obra de toma y, cuando se trata de un embalse con fines de riego, este nivel coincide con el NAMINO.
- Volumen muerto: el que se encuentra por debajo del NAMINO o NAMin y corresponde al volumen que no puede ser utilizado para los fines del embalse.
- Volumen de azolves: volumen que recibe el carreo de sólidos por el cauce, durante la vida útil de la presa.
- NAMO: máximo nivel con el que se puede operar la presa para satisfacer las demandas.
- Volumen o capacidad útil: corresponde al volumen que se puede almacenar entre el NAMO y el NAMin o NAMINO, y es con el que se satisfacen las demandas.
- NAME: nivel de aguas máximas extraordinarias.
- Bordo libre: espacio entre el NAME y la elevación (corona) de la cortina.

Según APARICIO, J. (1992) cuando se desea hacer una primera estimación del volumen útil se pueden usar dos métodos. El primero, llamado *curva masa* o diagrama de Rippl, desarrollado en 1883, es útil cuando las demandas son constantes, y el segundo, conocido como *algoritmo del pico secuente*, y es conveniente cuando las demandas varían en el tiempo.

Si bien la utilización de los dos métodos mencionados anteriormente da una serie de opciones preliminares de volumen útil, no considera algunos aspectos como evaporaciones y años secos o húmedos que pueden llegar a afectar de manera

considerable el funcionamiento del vaso. Es por ello que es necesario realizar una simulación de funcionamiento del vaso (Aparicio, J., 1992).

La ecuación fundamental para la simulación del funcionamiento del caso es la de *continuidad*, que expresada en un intervalo de tiempo Δt , en este caso un mes, es:

$$X - D = \Delta V \quad (10.1)$$

Donde:

X : volumen de entradas al vaso durante el intervalo de tiempo seleccionado.

D : volumen de salidas del vaso durante el intervalo de tiempo seleccionado.

ΔV : cambio de volumen almacenado en el vaso durante el intervalo de tiempo seleccionado.

Las entradas a un vaso son:

$$X = E_{cp} + E_t + E_{ll} \quad (10.2)$$

Donde:

E_{cp} : entradas por cuenca propia (escurrimientos)

E_t : entrada por transferencia de otras cuencas

E_{ll} : entradas por lluvia sobre el vaso (precipitación sobre el vaso)

Las salidas a un vaso son:

$$D = S_d + S_e + S_i + S_{de} \quad (10.3)$$

Donde:

S_d : volumen extraído para satisfacer la demanda

S_e : volumen evaporado

S_i : volumen infiltrado en el vaso

S_{de} : volumen derramado

La ecuación queda entonces de la siguiente manera:

$$E_{cp} + E_t + E_{ll} - S_d - S_e - S_i - S_{de} = \Delta V \quad (10.4)$$

10.2.1 Procedimiento de calculo

Si el subíndice i denota el principio del intervalo simulado y el $i + 1$ el final del mismo, la ecuación de continuidad se puede expresar como:

$$V_{i+1} = V_i + I_i - O_i + P_i - S_{ds_i} \quad (10.5)$$

Donde:

V_{i+1} y V_i : volúmenes almacenados en los instantes $i + 1$ y i , respectivamente.

I_i : volumen de entradas al vaso que no depende del nivel del mismo durante el intervalo considerado. $I_i = E_{cp_i} + E_{t_i}$

O_i : volumen de salidas del vaso que no depende del nivel del mismo durante el intervalo considerado. $O_i = S_{d_i}$

P_i : volumen de entradas – volumen de salidas del vaso que sí depende del nivel del mismo durante el intervalo considerado. $P_i = E_{ll_i} - S_{e_i} - S_{i_i}$

Además, la ecuación descrita está sujeta a la siguiente restricción:

$$V_{min} \leq V_{i+1} \leq V_m \quad (10.6)$$

Donde:

V_{min} : es el volumen de almacenamiento correspondiente al NAMINO o NAMin.

V_m : es el volumen de almacenamiento correspondiente al NAMO.

Por lo tanto, se tiene el siguiente sistema de ecuaciones con el cual se resuelve el balance hídrico en el embalse:

$$\begin{cases} V_{i+1} = V_i + I_i - O_i + P_i - S_{ds_i} \\ V_{min} \leq V_{i+1} \leq V_m \end{cases} \quad (10.7)$$

10.3 Resultado del balance hídrico

Para realizar el balance se utilizó la siguiente información de entrada:

- Curva elevación-área y elevación-volumen del vaso de la presa.
- Volumen de escurrimiento superficial y subterráneo determinados por el modelo de Temez (capítulo 9.3).
- Precipitación y evaporación utilizadas para la obtención del escurrimiento superficial y subterráneo de la cuenca.

- Demanda correspondiente la necesidad de agua para riego de los cultivos seleccionados en un ciclo anual.
- Área que se pretende regar.

Se considera que no hay aporte de escurrimientos de otras cuencas y que el volumen infiltrado a través del vaso es nulo.

Luego del balance es posible calcular el *Índice de satisfacción de demanda (ISD)*, el cual se determina a partir de los volúmenes que resulten disponibles para riego, de la siguiente manera:

$$ISD = \frac{\sum \text{volumen mensual demandado}}{\sum \text{volumen mensual entregado}} \tag{10.8}$$

Entonces se fue modificando el área de riego y calculando el ISD para las tres opciones seleccionadas (Tabla 20, Tabla 21 y Tabla 22).

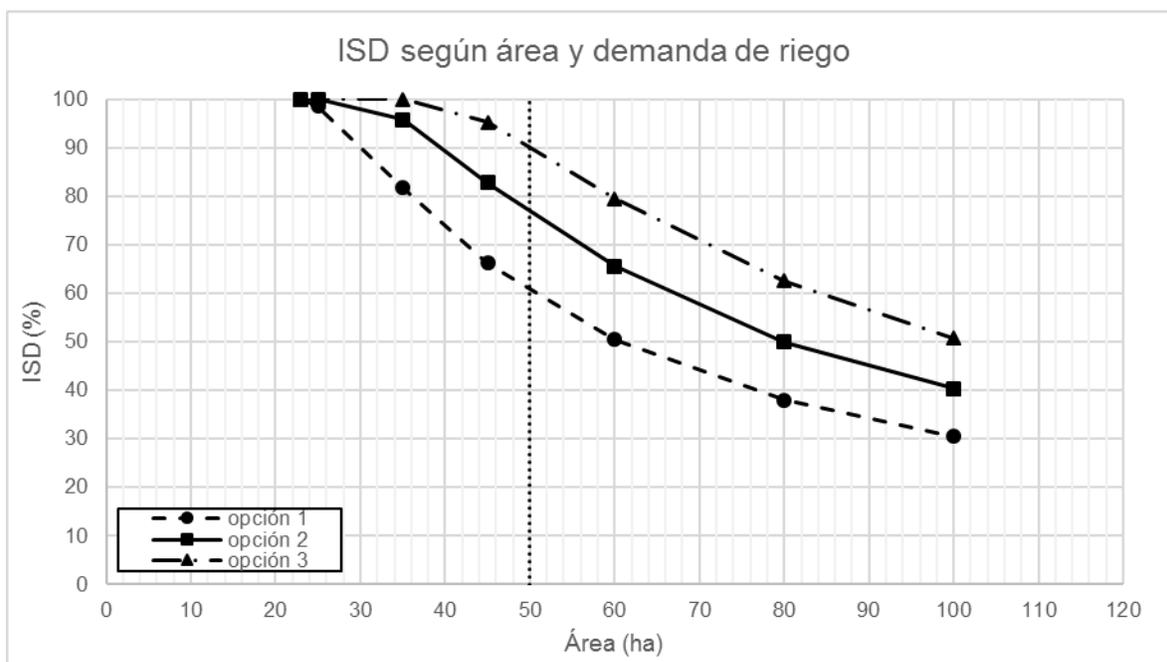


Figura 57 - ISD según área y demanda de riego

Según el gráfico anterior se deduce:

- La opción con riego en invierno (opción 1) nos permitiría regar un área igual o menor a 43 hectáreas para obtener un ISD mayor o igual a 70%. Se decide entonces descartar la opción de regar en invierno dado que se considera que el área es pequeña.

- Las opciones 2 y 3, que implican regar solo los cultivos de verano en años secos y medios respectivamente, nos permitirían regar un área más grande la mayor parte del tiempo.
- Según los resultados obtenidos se concluye que el área de aporte al embalse es pequeña, lo que no permite recuperar su capacidad en cortos períodos de tiempo y, por ende, no poder satisfacer la demanda para área de riego grandes.

Según lo mencionado, **se selecciona regar 50 hectáreas**. Esto indicaría que bajo las demandas de años secos se regaría el 77% de las veces mientras que en años medio el 90% de las veces. Es decir, con el área elegida no se podría satisfacer la demanda todos los años, debiendo tener un especial control en el manejo del agua en la presa.

De todas maneras, para años secos se podría regar solo en la fecha de siembra, lo que garantiza tener un rendimiento razonable utilizando menos agua. Otro parámetro importante que se puede controlar es la humedad en el suelo, es decir, a través de su medición se puede identificar el momento exacto en que se debe aplicar la lámina de riego y realizar así un manejo adecuado del agua.

Existe una presa en el sector donde se pretende construir el embalse que actualmente está destinado al riego (Figura 36). Se podría realizar un análisis de satisfacción de demandas actuales y evaluar la posibilidad que dicha presa aporte también agua al nuevo sistema de riego. Por otro lado, se podría estudiar la posibilidad de utilizar parte del agua que circula por el curso donde se tomará el agua para regar el área seleccionada. De ser posible alguna de las opciones anteriores se podría regar un área mayor.

11 DISEÑO DE SISTEMA DE RIEGO – PIVOTE CENTRAL

Teniendo en cuenta los avances tecnológicos mencionados en capítulos anteriores y la zona fértil donde se pretende instalar el sistema de riego, se decidió diseñar un sistema de pivote central que cubra 50 hectáreas.

Para ello se utilizaron algunos conceptos básicos que se describen a continuación y las hojas de cálculo de la USDA, que permiten diseñar el sistema y comprobar que no haya escorrentía que pueda generar pérdidas de agua y/o erosión en el suelo.

Según diferentes bibliografías la capacidad del sistema se determina como:

$$Q = KA \frac{D}{H} \quad (11.1)$$

Donde:

Q : gasto (L/min)

A : área a regar (hectáreas)

D : lámina de riego a ser aplicada (mm)

H : tiempo total para completar el riego (horas)

K : constante igual a 166.7 para Q en L/min

La lámina de riego es la necesaria para satisfacer los requerimientos del cultivo dividido por la eficiencia de aplicación:

$$D = \frac{d}{E} \quad (11.2)$$

Donde:

d : lámina neta de riego (mm)

E : eficiencia de aplicación (%)

La lámina mínima de riego puede definirse usando el tiempo mínimo de rotación del lateral y la evapotranspiración máxima, de la siguiente manera:

$$d = ET \frac{H}{24} \quad (11.3)$$

Donde:

ET: evapotranspiración máxima diaria (mm/día)

Para determinar el tiempo que dura el pivote en dar una vuelta (H), se utiliza la siguiente ecuación:

$$H = 0.105 \frac{L}{v_t} \tag{11.4}$$

Donde:

L: longitud del pivote menos tramo que sobresale (m)

v_t: velocidad máxima del pivote (m/min)

Por lo tanto, suponiendo: velocidad del pivote de 2.0 m/min; evapotranspiración máxima de 13.1 mm/día y eficiencia del sistema del 80%, se tiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} H = 19.7 \text{ horas} \\ d = 9.3 \text{ mm} \\ D = 11.6 \text{ mm} \\ Q = 294.4 \text{ m}^3/h \approx 1300 \text{ gpm} \end{array} \right.$$

Una vez determinada la capacidad del sistema se utilizó la aplicación web denominada *pivotplacer* desarrollado por le empresa *Senninger*. Dicha aplicación te permite ubicar diferentes pivotes centrales en cualquier parte del mundo y extraer el perfil longitudinal de la zona más crítica en cuanto a elevaciones. Además, te indica la elevación del centro del pivote y la elevación del punto más alto y más bajo dentro del área cubierta.

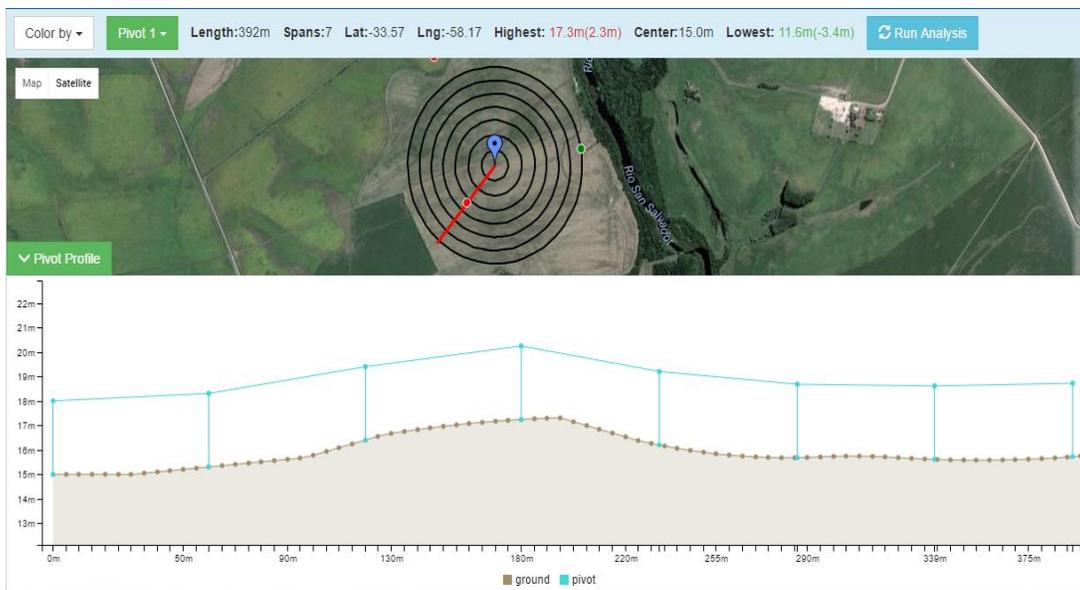


Figura 58 - Ubicación pivote central y perfil longitudinal crítico (www.pivotplacer.com)

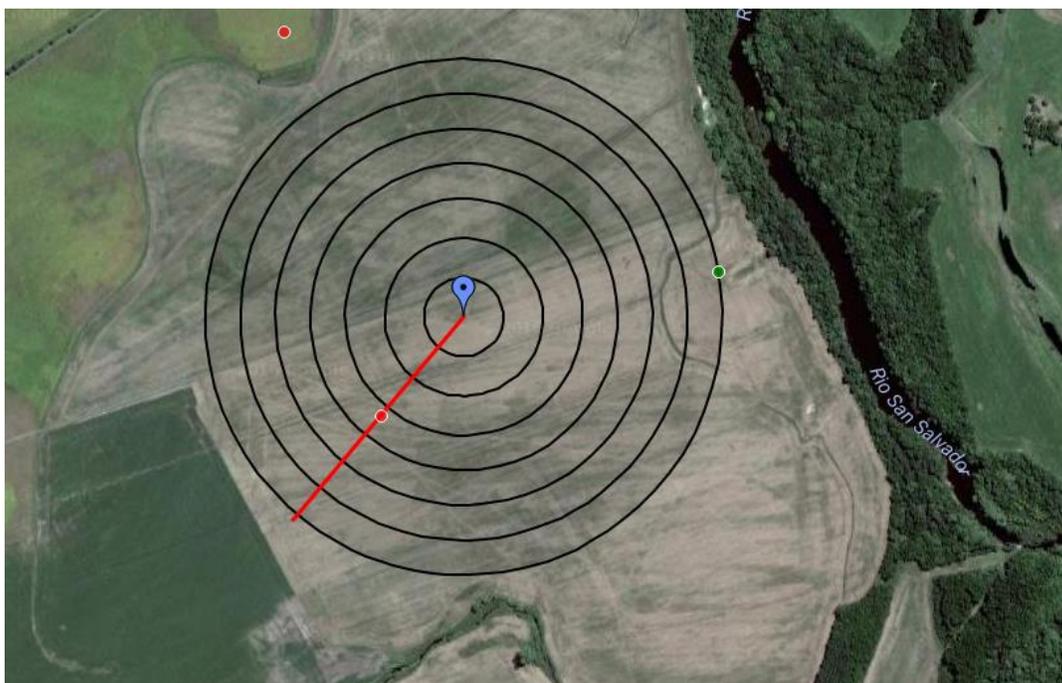


Figura 59 - Ubicación pivote central: posición central y espaciamiento entre torres (www.pivotplacer.com)

La posición del centro del pivote será en las coordenadas: [latitud: -33.57 ; longitud: -58.17] y estará compuesta por siete torres con una longitud total de 392m. La punta del pivote se pretende equipar con un arma (*end gun*) con el fin de regar un área mayor, completando un área de riego de aproximadamente 50 hectáreas.

Para la ubicación de las torres se tomaron en cuenta las recomendaciones de los algunos de los fabricantes ya mencionados.

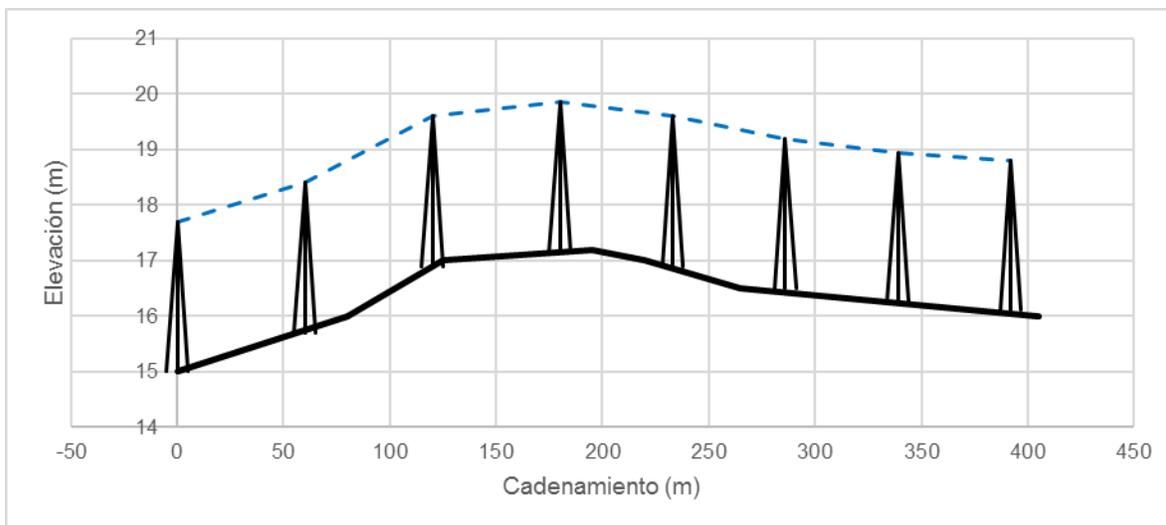


Figura 60 - Ubicación de las torres en perfil longitudinal (perfil crítico)

Torre	Largo total m	Espacio entre torres m	Elevación base m	Diámetro tubería alimentación in
0	0	0	15.0	6 5/8
1	60	60	15.7	6 5/8
2	120	60	16.9	6 5/8
3	180	60	17.2	6 5/8
4	233	53	16.9	6 5/8
5	286	53	16.5	6
6	339	53	16.3	6
7	392	53	16.1	6

Tabla 27 - Información torres y tuberías de alimentación en pivote central

Desde el punto de vista hidráulico, el objetivo del riego por pivote central es aplicar una cantidad uniforme de agua por unidad de área, por lo tanto:

$$\frac{Q}{A} = constante \tag{11.5}$$

Por lo tanto, para si q_i es la velocidad de aplicación por unidad de longitud del sistema a una distancia L del centro del pivote, y a_i es el área asociada a un anillo anular de ancho unitario en ese punto, se tiene:

$$\frac{Q}{A} = \frac{q_i}{a_i} \quad (11.6)$$

Como R es el radio del sistema y $a_i = 2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 1$ se tiene:

$$q_i = \frac{2QL}{R^2} \quad (11.7)$$

Entonces, el siguiente paso es determinar las boquillas del aspersor que proporcionan los gastos correctos a lo largo del lateral, pero teniendo en cuenta las consideraciones de topografía y suelo. La determinación de una velocidad de aplicación representativa para un suelo dado es una de las consideraciones más importantes en la planeación de un sistema por pivote central, para asegurar que no se presentará un escurrimiento significativo. Además, influyen en el fenómeno el contenido de humedad inicial y las condiciones de la superficie del suelo.

Los paquetes de simulación para seleccionar las boquillas de los aspersores y los procedimientos de operación deben minimizar el escurrimiento para lograr mejores eficiencias y uniformidades de riego.

Para dimensionar el paquete de aspersores y verificar el escurrimiento se utilizan las hojas de cálculo de la USDA. Para ello, es necesaria la siguiente información:

- Eficiencia de aplicación.
- Utilización de reguladores de presión y valor de la presión de funcionamiento de cada aspersor.
- Largo total del lateral del pivote.
- Espesores y diámetros de las tuberías, así como coeficientes de pérdidas.
- Altura de las torres, altura del punto medio entre torres y altura de los aspersores.
- Capacidad de retención de agua del suelo.
- Profundidad de las raíces del cultivo.
- Descenso permisible de la humedad en el suelo.
- Radio de riego del arma final (*end gun*).
- Gasto del sistema.
- Cantidad el agua en el suelo inicial.
- Conductividad hidráulica efectiva.
- Distancia del primer aspersor al centro del pivote.
- Selección del tipo de aspersor y distancia entre aspersores.
- Pendientes entre torres y elevación de las mismas.

Una vez introducida la información anterior en la hoja de cálculo, se procede a la ejecución y posterior análisis de los resultados.

Respecto a los datos de suelo, estos fueron consultados en bibliografía dado que solo se sabe que es un suelo franco arcillo limoso. Algunos de los parámetros intervinientes ya fueron mencionados en capítulos anteriores.

Según el tipo de suelo, se seleccionaron aspersores de impacto dado que, según la bibliografía y los fabricantes, serían los más adecuados para este caso. En particular **se seleccionaron los modelos Nelson F70 y F33S con una separación entre ellos de 2.7m, dando un total de 142 aspersores. Además, se utilizarán reguladores de presión, fijando la misma en 30 PSI.**

Los diámetros de las tuberías de alimentación son: en los primeros tres tramos de 6 5/8” mientras que en los últimos cuatro de 6”.

En el Anexo 4 se pueden observar los resultados de la simulación de cada aspersor, así como los resultados de análisis de escurrimientos. En esas tablas se observan los diámetros de las boquillas, así como las presiones en la línea de la tubería. Además, **se aprecia que el escurrimiento superficial es mínimo, por lo que el diseño sería adecuado.**

A modo de resumen, se necesitaría el siguiente número de aspersores, para cada modelo y tamaño de boquilla:

Modelo	Tamaño boquilla 64th	Cantidad
NL F33S	8	20
NL F33S	9	6
NL F33S	10	5
NL F33S	11	7
NL F33S	12	6
NL F33S	13	7
NL F33S	14	8
NL F70	16	17
NL F70	18	17
NL F70	19	9
NL F70	20	8
NL F70	21	9
NL F70	22	9
NL F70	23	9
NL F70	24	4
NL F70	26	1

Tabla 28 - Número de aspersores según modelo y tamaño de boquillas

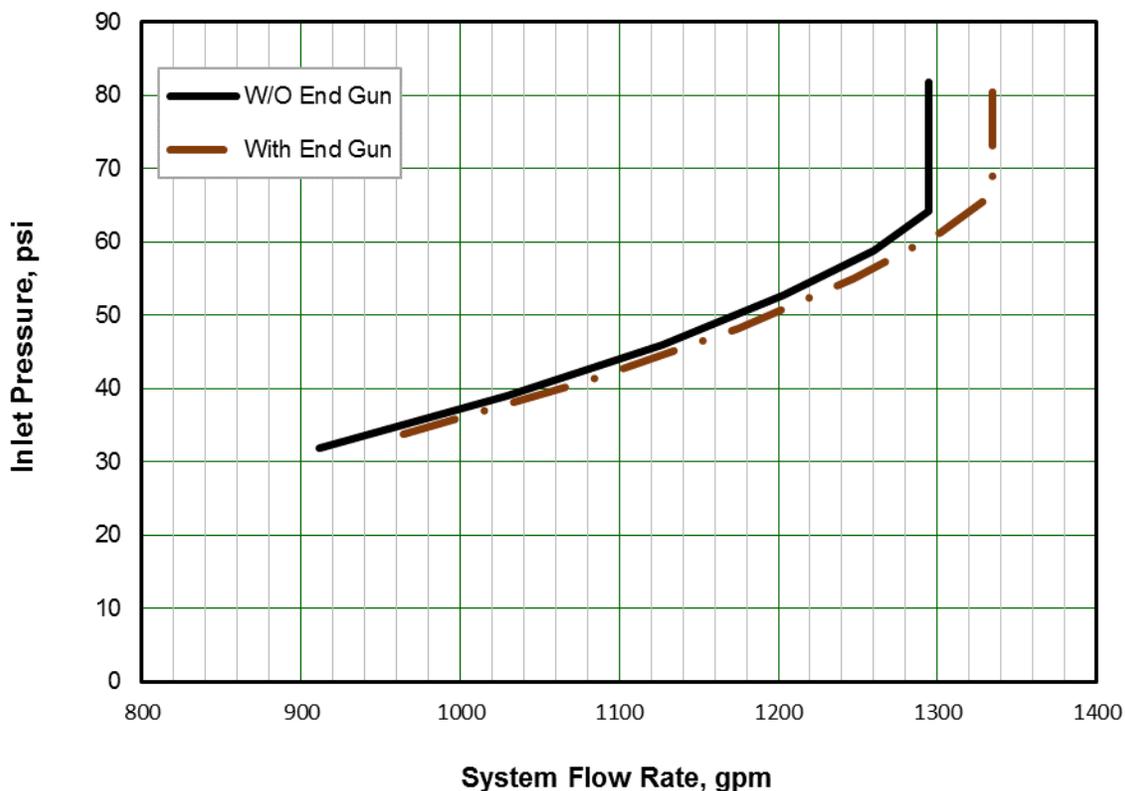


Figura 61 - Presión en el pivote, según planilla de cálculo de la USDA

Otro dato importante que se puede extraer de la planilla de cálculo son las presiones en el pivote con y sin el arma final.

Luego, utilizando la segunda planilla de cálculo denominada *Pivot Design*, se ingresan todas las características del sistema y se obtiene, entre otras cosas, la presión de trabajo de la bomba. Para ello se supuso que la conducción desde la bomba ubicada a pocos metros del río hasta el centro del pivote se hace en una tubería de 10".

Esto da como resultado **una carga total de 83m, para erogar el gasto total de 294.4m³/h.**

Un esquema general se observa en la figura siguiente.

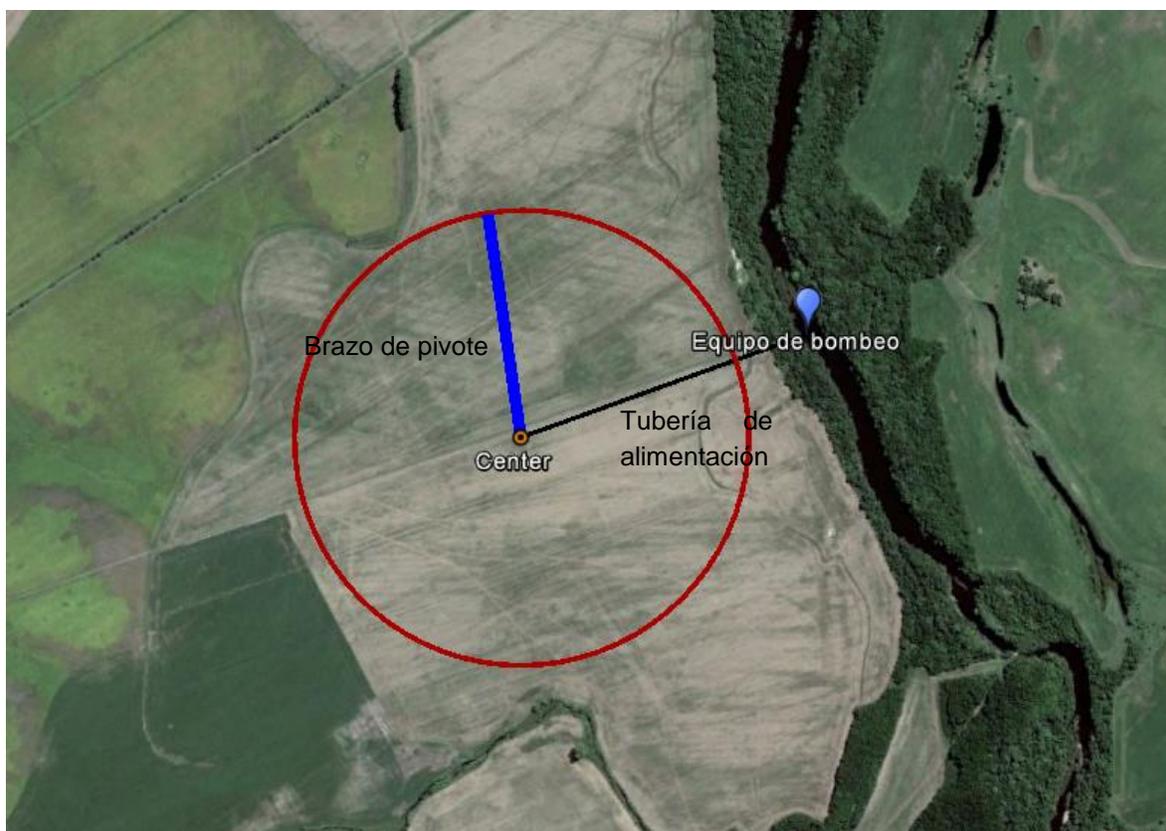


Figura 62 - Esquema general de planta

Resumiendo:

- Sistema de pivote central para regar un área aproximada de 50 hectáreas, compuesto por siete torres.
- 142 aspersores con reguladores de presión separados una distancia de 2.7m, con un arma final (end gun).
- Equipo de bombeo que entregue $294.4\text{m}^3/\text{h}$ superando una carga de 83m.
- Tubería de alimentación de 10" con una longitud aproximada de 520m.

Es de suma importancia aclarar que los resultados obtenidos en este capítulo no son para nada los resultados finales debido a los siguientes aspectos:

- No se tiene análisis de suelo que permita ajustar de manera correcta la posibilidad de escurrimiento o no por parte de los aspersores.
- No se realizó una visita a campo a fin de observar en detalle la zona donde se desea implementar el sistema.
- No se tiene conocimiento del lugar adecuado para instalar el equipo de bombeo.
- No se realizó un análisis exhaustivo de las diferentes opciones que hoy en día ofrecen los proveedores a fin definir qué opción sería la más adecuada, sino que

se intentó evaluar algunas de ellas a modo de poder presentar un ejemplo de cálculo. Sin embargo, se realizaron algunas consultas a fabricantes, pero sin lograr una respuesta concreta.

- No se evaluaron aspectos económicos, factor clave en este tipo de proyectos.
- Al no contar con manuales de las hojas de cálculo utilizadas puede existir en el dimensionado algún error que no fue tomado en cuenta.

Por todo lo anterior, **se concluye que el equipo seleccionado, si bien los resultados obtenidos indican que sería adecuado se debería estudiar con más detalle, utilizando las planillas mencionadas o algún otro software, pero siempre en comunicación con los proveedores que cuentan con personal capacitado para resolver el problema.**

12 RESUMEN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Previo a la discusión de resultados se presentará un resumen de los resultados obtenidos en el diseño del sistema de riego.

12.1 Resumen del proyecto

El agua a aplicar al cultivo se almacenará en un embalse de tierra, el cual tendrá las siguientes propiedades:

- Cota de fondo: 44msnm
- Cota de vertido: 51msnm
- Cota de toma: 45msnm
- Volumen máximo: 0.790 Hm³

Cuando sea necesario regar, se deberá abrir la toma y dejar que el volumen necesario a regar sea expulsado del embalse, para ello se recomienda contar con un limnómetro o similar que permita conocer el volumen en función del descenso de nivel en el embalse. Dicha agua será transportada hacia el área del riego de manera natural, por medio de dos cauces, en una longitud total de 30km.

El sistema de riego será un pivote central capaz de regar 50 hectáreas. Para ello se instalará un equipo de bombeo que tomará el agua necesaria que fluye por el cauce, que previamente fue enviada desde el embalse y será impulsada hasta cada aspersor. El sistema contará entonces con:

- Equipo de bombeo capaz de impulsar 294.4m³/h superando una carga de 83m.
- Tubería de alimentación de 10" con una longitud aproximada de 520m.
- 142 aspersores con reguladores de presión separados una distancia de 2.7m, con un arma final (end gun).

Además de lo descrito anteriormente, se recomienda instalar, según la variación del suelo en el área a regar, una serie de medidores de humedad que permitan controlar el agua en el suelo y así establecer los momentos oportunos de riego. Por otro lado, el sistema a instalar se recomienda sea un sistema "inteligente", es decir, que tenga autonomía y se pueda controlar a distancia, con el fin de inspeccionar los diferentes aspectos sin tener necesidad de estar en el campo todo el tiempo.

De esta manera, se tendría un sistema de avanzada que permita ahorrar agua y energía mejorando los rendimientos del cultivo. Cabe aclarar nuevamente que no se tienen en cuenta los aspectos asociados a los fertilizantes.

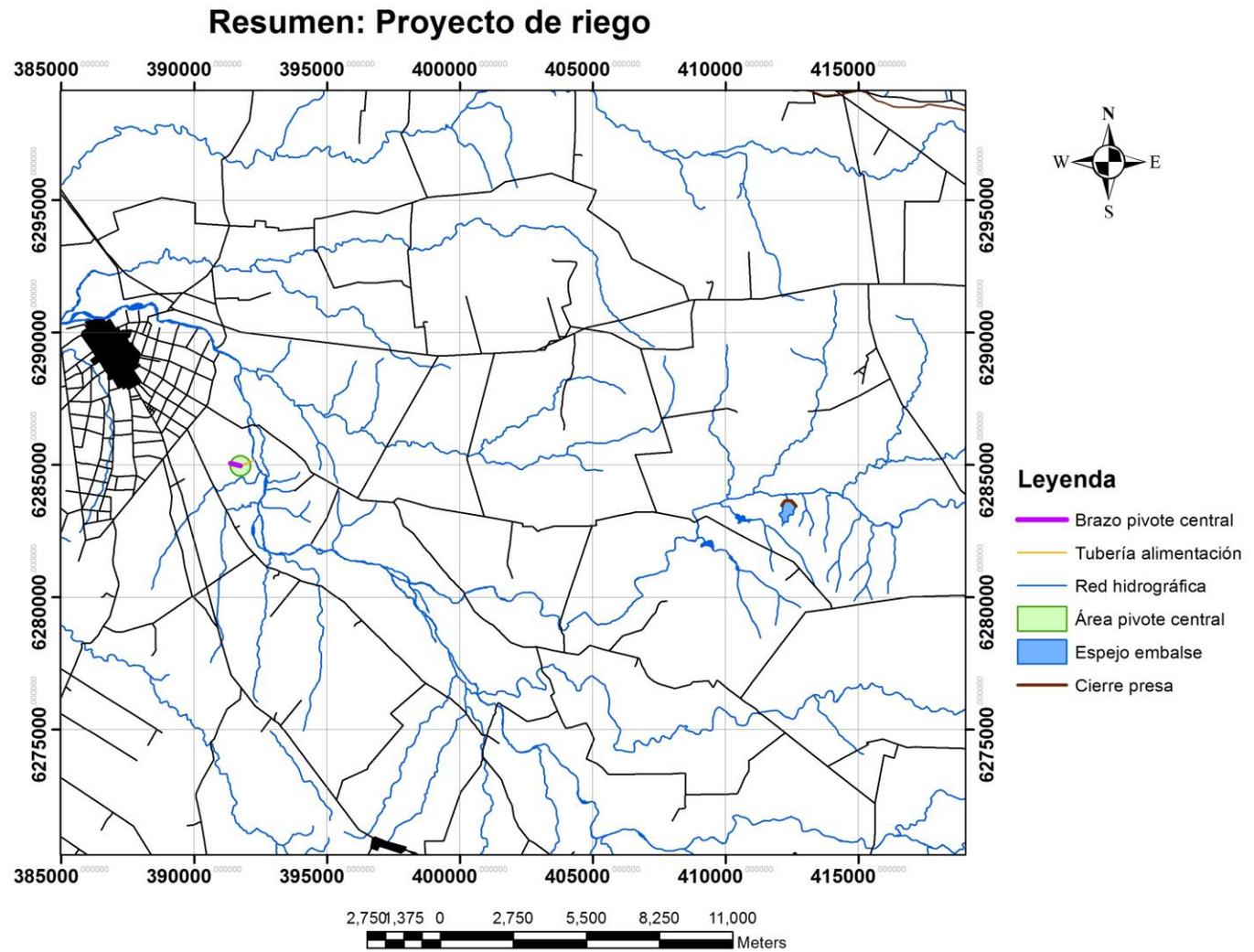


Figura 63 - Resumen del proyecto

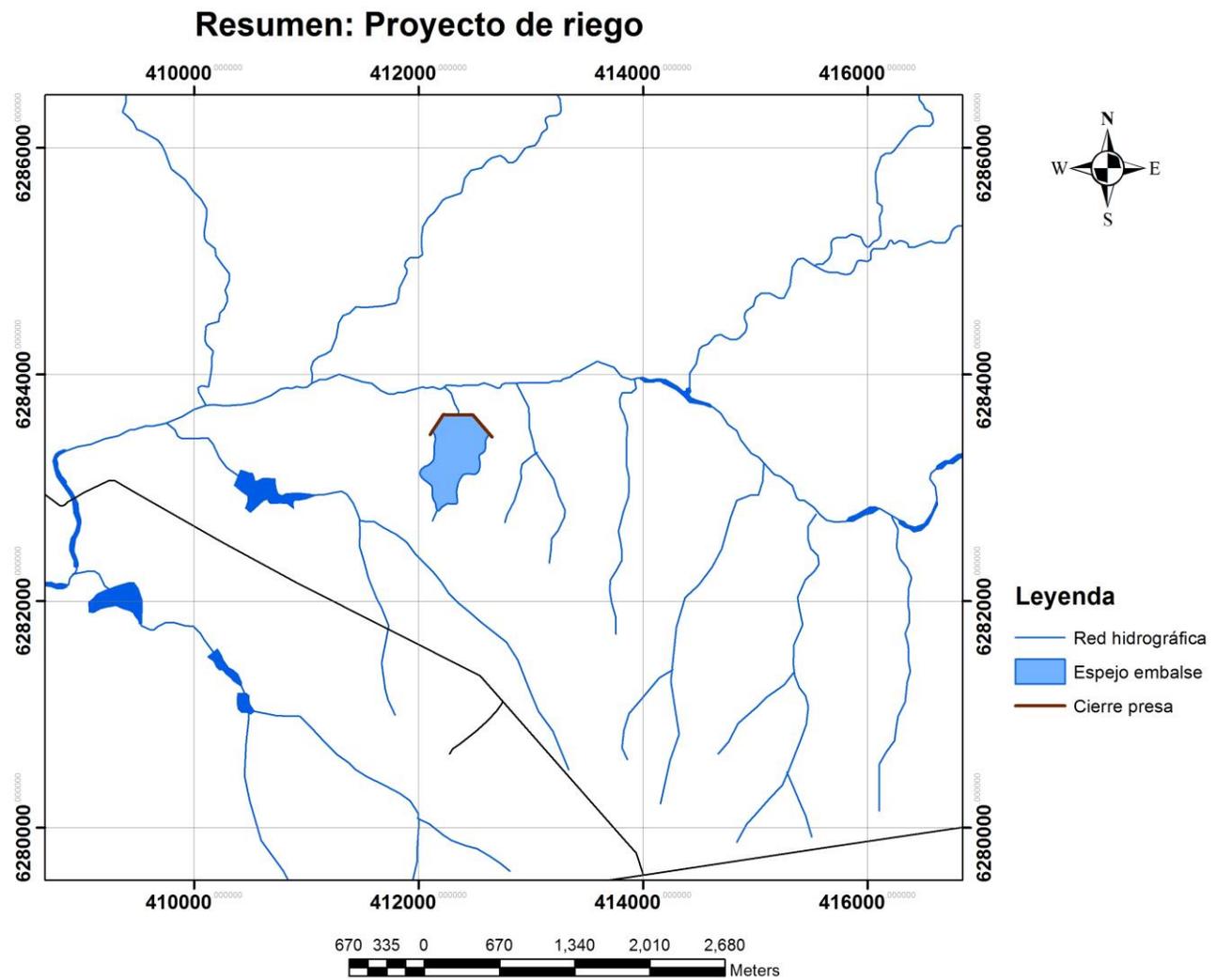


Figura 64 - Resumen: Espejo de agua de embalse

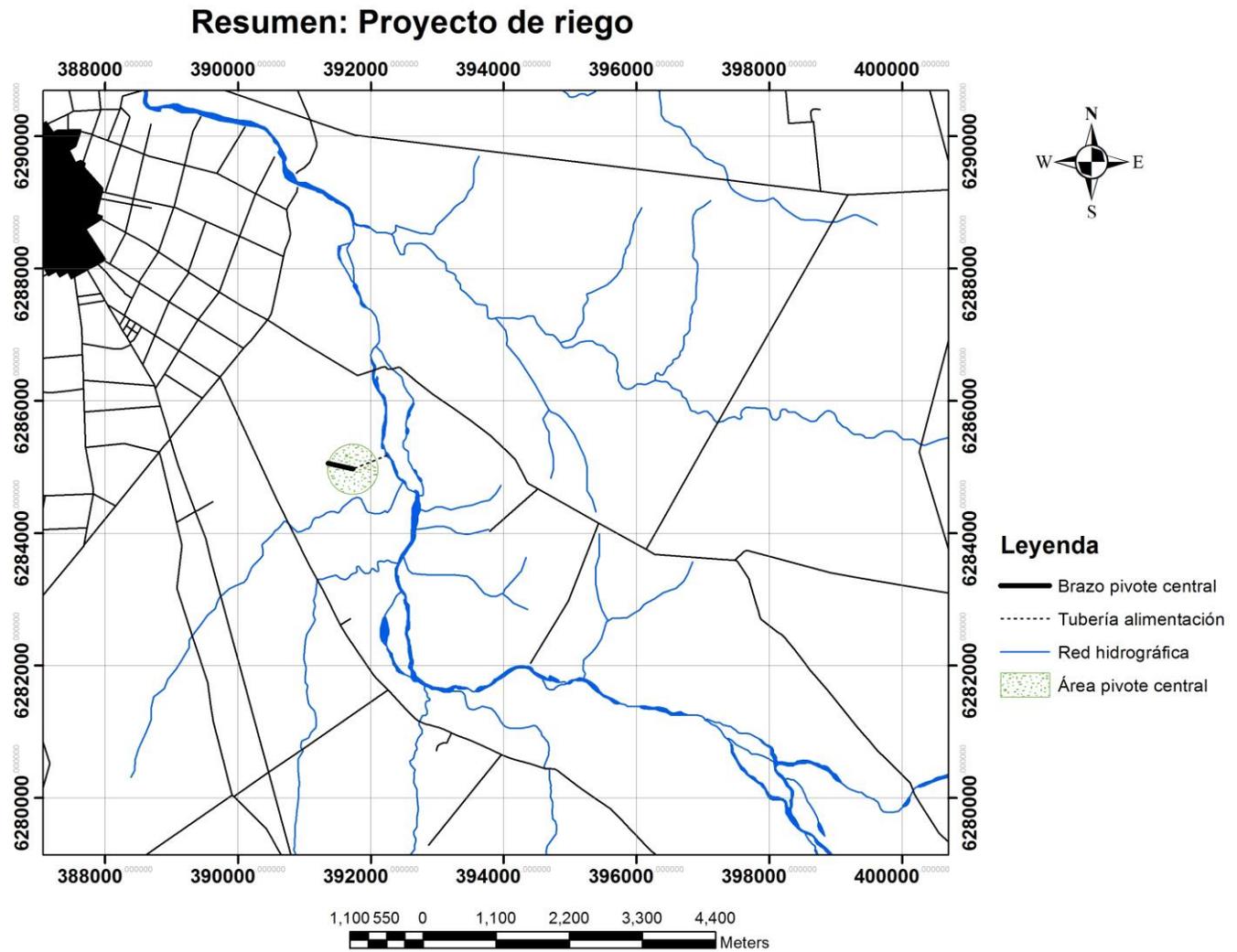


Figura 65 - Resumen: Pivote central

12.2 Discusión de los resultados

La presente tesis se podría dividir en dos grandes partes. La primera enfocada a la investigación, en donde se pretende dejar en evidencia los diferentes paquetes de simulación de cultivos, las nuevas tecnologías en equipamientos de riego, así como los modelos y programas de diseño que permiten, utilizando un computador, diseñar y/o evaluar un proyecto completo de riego. Por otro lado, la segunda parte se refiere a la aplicación de lo investigado en un proyecto de riego, compuesto por un embalse y sistema de riego por aspersión de pivote central. Vale la pena entonces, discutir los resultados obtenidos en ambas partes de la tesis.

Respecto a los proyectos de simulación de cultivos se observó que algunos de ellos se enfocan en un único tipo de cultivo mientras que la mayoría se adaptan a una gran variedad de ellos. Sin embargo, todos requieren básicamente información en cuatro módulos: clima, suelo, cultivo y manejo, pero con diferente nivel de detalle. Lo anterior implica el definir previamente el alcance de cada problema al que uno se enfrenta, ya sea investigativo o de diseño, a fin de seleccionar el paquete más adecuado. Además, como sucedió en este caso, muchas veces solo se cuenta con información de bibliografía por lo que los resultados deben ser evaluados con mayor detalle.

Un detalle importante de los paquetes de simulación es que se pueden simular diferentes sectores con diferentes cultivos. Esto resulta interesante cuando se habla de distritos de riego, en donde cada agricultor tiene su campo o parcela y realizan cultivos diferentes. Es decir, a partir de éstos paquetes y contando con la información de cada agricultor, se podrían establecer las necesidades hídricas de cada uno de ellos y en qué momentos la necesitan, y así realizar un mejor manejo del agua almacenada en los embalses y un diseño (o evaluación) adecuado de los canales de riego.

Dentro de los avances en equipamientos de riego se deduce que, tanto en el riego por aspersión como en el riego localizado, día a día los fabricantes logran mejoras apuntando a un riego inteligente que permita a los agricultores lograr un manejo integrado, reduciendo el consumo de agua y energía y aumentando los rendimientos.

Aunque en menor medida que los riegos mencionados anteriormente, en el riego por gravedad también se observaron algunos avances que permiten mejorar las eficiencias. De todas maneras, el agricultor debe estudiar previamente su situación a fin de seleccionar el tipo de riego más adecuado teniendo en cuenta, por ejemplo: tipos de cultivos, tipos de suelos y aspectos económicos (inversiones, ganancias, etc.).

El producto mexicano denominado “Lluvia sólida” resulta a priori una buena solución para reducir el agua a aplicar a los cultivos, sobretodo en lugares en donde la lluvia es muy escasa. No obstante, se debe tener cuidado con la aplicación del mismo resultando adecuado la utilización previa del producto en una pequeña parcela, para observar y comprar los resultados con los métodos antes utilizados y justificar si es necesaria su incorporación.

Sumado a los avances tecnológicos, los medidores de humedad son una herramienta fundamental para el manejo del agua en el suelo, resultando en un indicador clave del momento oportuno a aplicar la lámina de agua. Esto permite lograr un manejo adecuado tanto del agua en el suelo como en la fuente de abastecimiento, alcanzando mejoras en los rendimientos. Sin embargo, en algunos casos no se justifica utilizar estos dispositivos ya sea por contar con sistemas de riego muy antiguos, por el coste económicos que ello implica o por la dificultad que puede tener su interpretación.

Respecto a los resultados obtenido en el diseño se tiene:

- La información recopilada se considera adecuada para realizar el diseño. Si bien solo se contó con información real de topografía y clima, la información recopilada en bibliografía permitió resolver el problema de manera correcta y con resultados aceptables.
- El dato real más relevante que faltó fue la información del suelo, para la cual se utilizó cartografía existente y se seleccionaron los parámetros del suelo consultando en diferentes publicaciones. Se entiende que con el análisis de algunas muestras de suelo que permitan obtener las curvas tensión-humedad y la velocidad de infiltración los resultados hubieran sido más exactos, sobretodo en el diseño del paquete de aspersores.
- De los paquetes de simulación utilizados, modelo de Flinn y AquaCrop, se observó que los resultados son similares, por ejemplo, se concluye en ambos que es necesario aplicar láminas de riego en los cultivos de verano para obtener buenos rendimientos mientras que es posible evitar dicho riego durante el invierno. Sin embargo, el no contar con información que permita calibrar los modelos implica tener un cuidado especial en los valores de rendimiento final que arroja cada simulación, siendo más prudente comparar los porcentajes de aumento o disminución entre cada simulación.
- Resulta prudente dejar de utilizar el modelo de Flinn para diseño e incorporar algún paquete de simulación más reciente, como el *AquaCrop*. Esto es debido a que los nuevos paquetes de simulación de cultivos incorporan otros módulos, como el manejo de fertilizantes, y la posibilidad de ejecutar diferentes opciones los hace una herramienta más fuerte a la hora de diseñar o evaluar. De todas maneras, el modelo de Flinn obtiene buenos resultados utilizando muy pocos parámetros.
- El modelo de Temez, utilizado para determinar los escurrimientos medios en la cuenca donde se implantará el embalse, se considera es un modelo adecuado que brinda buenos resultados dado que se encuentra calibrado para todo el territorio uruguayo. Se podría haber utilizado otra metodología, pero la falta de información exacta como una cuenca aforada cercana, no lo permitió.
- El balance hídrico en el embalse se efectuó utilizando la metodología propuesta en diferentes libros de hidrología, en particular se utilizaron las notas del libro *Fundamentos de Hidrología de Superficie* de Aparicio, J. (1992). Teniendo en cuenta que se contó con información topográfica adecuada del vaso del embalse, los resultados obtenidos son correctos y permiten resolver el ejercicio con

fiabilidad. Cabe destacar que se utilizó un Índice de Satisfacción de la Demanda (ISD), el cual se calculó con los resultados del balance imponiendo diferentes demandas, que sirvió para determinar el área adecuada a regar.

- Los resultados obtenidos en el diseño del pivote central, si bien son adecuados según los criterios mencionados la falta de información, detallada al final del capítulo anterior, indican que el equipo seleccionado no sería el definitivo siendo necesario ajustar el diseño a partir de información real más concreta, como un análisis de suelos. De todas maneras, se dejaron claros los pasos a seguir y los criterios a tener en cuenta para un correcto diseño.

No se realizó un diseño total del embalse debido a que no fue objetivo de estudio, sino que solo se determinó el volumen del mismo con el fin de seleccionar el área que es posible regar. No obstante, se recomienda evaluar la posibilidad de construir un “canal vertedero” que permita erogar los excesos de agua frente a una avenida extraordinaria de 100 años de período de retorno, aplicando el modelo de tránsito en vasos. La elección de un canal de salida se debe a que la presa es “pequeña” y de tierra, además de que la cuenca de aporte también es chica. Por otro lado, utilizando los criterios de Bureau of Reclamation (1987), es posible determinar la altura final del embalse.

Además, se deben tener en cuenta diversos aspectos constructivos como estabilidad de taludes, colocación y control de materiales, compactación de suelos, etc. Para ello, existen diversas publicaciones que permiten realizar los cálculos pertinentes, sin embargo, se recomienda la lectura de una tesis de Maestría de la UNAM denominada *Diseño de Pequeñas Presas*, elaborada por Figueras Corte, M. (2008).

No se consideró oportuno realizar un anteproyecto debido a los siguientes aspectos:

- El nivel de detalle de diseño. Si bien los resultados obtenidos son adecuados, se debería diseñar totalmente el embalse (el cual quizás debería ser más chico), evaluar el proyecto para distintas áreas de riego y afinar el diseño del pivote central.
- No se cuenta con información de precios, tanto del costo de implantación de todo el proyecto, del costo del mantenimiento y operación del mismo, como de las ganancias que podrían generar los cultivos.

Cabe aclarar que durante todo el trabajo se habla del agua como el factor limitante de los cultivos, algo que es cierto, pero no se hace hincapié en que sucede con la utilización de fertilizantes que mejoran la calidad de la tierra y facilitan el crecimiento de las plantas. Dichas sustancias hoy en día se utilizan en la mayoría de los cultivos, por lo que su inclusión en los modelos de simulación resulta prudente. No obstante, se entiende deberían usarse modelos calibrados a fin de no introducir mayores errores al resultado.

Otro aspecto que no fue considerado es el flujo de agua en los cauces intervinientes, en particular, el gasto base de los mismos. Se entiende que, en épocas de sequía cuando por los cauces fluya el gasto base, el aporte del embalse a los mismos puede ser

significativo, al menos en el tramo entre la presa y la toma de agua para riego. Se podría realizar un estudio de los caudales base en ambos cauces y realizar comparaciones con el flujo de entrada a los mismos una vez abierta la obra de toma del embalse.

Finalmente, se considera se establecieron los lineamientos básicos para poder introducirse al tema y resolver proyectos de este tipo.

13 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Ya es sabido que el agua es fundamental para la vida y de suma utilidad para las actividades agropecuarias. Sin embargo, al ser un recurso escaso en muchas partes del mundo, se requiere de un aprovechamiento óptimo del mismo. Hoy en día la introducción de nuevas tecnologías permite que los sistemas de riego y almacenamiento posibiliten el uso efectivo del agua asegurando una producción de calidad. Es por ello que la presente tesis se concentró en el agua como factor limitante de los cultivos, intentando dar conocimiento de las nuevas herramientas para el diseño o evaluación de cultivos y sistemas de riego, y los avances tecnológicos en equipamientos de irrigación.

En la actualidad, tanto los pequeños como grandes productores pueden acceder a algún sistema de riego con el fin de obtener mejores rendimientos disminuyendo los costos energéticos y de mano de obra, y ahorrando la mayor cantidad de agua posible. Es por ello que se consideró que el presente trabajo está enfocado a cualquier tipo de proyectos de esta índole.

Los paquetes de simulación numérica de cultivos son importantes herramientas que le permiten al usuario poder modelar diferentes tipos de cultivos en diferentes condiciones, para poder tomar decisiones en base a sus resultados. Hoy en día la oferta en estas herramientas es buena y variada, existiendo varios paquetes de simulación gratuitos enfocados a diferentes objetivos. No obstante, se debe tener cuidado con la elección del paquete a utilizar, definiendo previamente los objetivos e información con la que se cuenta, de manera de lograr resultados adecuados.

Dado que en la mayoría de los casos no se accede a resultados de campo que permitan calibrar los modelos, se recomienda informarse acerca ellos, dado que la mayoría ya cuentan con datos de cultivos y suelos calibrados en alguna parte del mundo. Esto puede resultar de ayuda en muchos casos, sobretodo sabiendo que algunos parámetros son conservativos, es decir, que no varían según su localización geográfica y clima.

Teniendo en cuenta que en México predominan los distritos de riego por gravedad, los modelos de simulación de cultivos permiten determinar los requerimientos hídricos de cada agricultor o parcela. Esto admite mejorar el manejo del agua en el sistema y realizar un diseño más adecuado de los canales de distribución, o evaluar los existentes, con el fin de lograr mejoras en la distribución y por lo tanto en la eficiencia.

Respecto a los avances tecnológicos en los equipos de riego, se concluye que los fabricantes apuntan a mejoras que permitan a los agricultores contar con riegos inteligentes. Eso quiere decir que los nuevos equipos cuentan con la capacidad de ser operados por medio de computadoras y celulares en cualquier parte del mundo y de manera eficiente. Además, las nuevas tecnologías permiten aplicar el agua en el suelo con mayor uniformidad, lo que permite aumentar las eficiencias y, por ende, ahorrar agua. También se apunta a trabajar con sistemas que funcionen con presiones más bajas de

manera de tener ahorros energéticos. Todo esto lleva a mejorar día a día los rendimientos de los cultivos.

Sumado al párrafo anterior, los medidores de humedad son herramientas muy importantes para controlar el agua en el suelo y determinar con precisión el momento oportuno de riego, y así evitar el estrés de los cultivos que llevan a una disminución del rendimiento.

Otra herramienta importante que se comienza a utilizar son las observaciones de la Tierra mediante sensores a bordo de satélites, que proporcionan imágenes de la superficie terrestre para hacer un seguimiento y poder establecer mapas de necesidades hídricas de los cultivos. Estos instrumentos permiten conseguir una mejor eficiencia en el uso del agua para riego, permitiendo dar un seguimiento detallado y preciso de los cultivos disminuyendo costos.

Respecto al producto mexicano “Lluvia sólida” parece, a priori, ser adecuado para ciertos casos, sobretodo en lugares donde el agua es escasa. En la actualidad se utiliza con mucho cuidado debido a que no se conoce con exactitud si su utilización tiene desventajas, además de que aún no es muy conocido y solo existe en pocos países del mundo. No obstante, resulta prudente realizar experimentos en cada caso, con el fin de demostrar si existen mejorías y así justificar su utilización.

El desarrollo del diseño del sistema de riego intenta dar conocimiento de los pasos a seguir en proyectos de ésta índole. Dejando en claro la información necesaria, los modelos y programas que existen en la actualidad, así como los criterios a tener en cuenta.

Se considera que la información recopilada para la resolución del problema es adecuada, arrojando resultados coherentes. No obstante, resulta necesario conseguir información adicional que permita afinar el cálculo y poder realizar a posteriori un análisis económico que defina la viabilidad del proyecto.

El modelo de Temez fue utilizado en este caso debido a que se encuentra calibrado para todo el territorio uruguayo, sin embargo, existen otros procedimientos detallados en los libros de hidrología que permiten obtener los escurrimientos en la cuenca. Sin embargo, dada la falta de información y la aceptación de dicho modelo (en Uruguay), no se consideró pertinente obtener resultados con otra metodología.

Para el balance hídrico se utilizó la metodología trillada en los libros de hidrología. Para ello se consideró como parámetros de entrada los escurrimientos obtenidos en el modelo de Temez y la precipitación, y como parámetros de salida la evaporación y las demandas de los cultivos. Las demandas se calculan a partir de los paquetes de simulación estableciendo diferentes condiciones, y se analizaron los resultados por medio del ISD. Dicho parámetro indica la cantidad de agua que se le puede dar al cultivo en relación con la que el cultivo demanda, permitiendo definir un área a regar. Si bien los resultados son buenos, se recomienda estudiar más variantes de cultivos y con diferentes condiciones, a fin de obtener mayores resultados que resulten en un análisis más completo del área a

regar. Además, dicha área también va a estar condicionada al aspecto económico, por lo que se sugiere tenerlo en cuenta a la hora del diseño final.

La selección de un sistema de riego por aspersión de pivote central se tuvo en cuenta dadas las condiciones actuales de la zona el terreno en Uruguay, la cual es de las más fértiles del país, lo que indicaría la rentabilidad de contar con ese tipo de sistema. Por otro lado, se intentó dejar conocimiento del procedimiento a seguir y los criterios a considerar en el sistema de riego de punta en la actualidad. Si bien ya se mencionó que los resultados se deben ajustar considerando otros factores ya descritos, los mismos son adecuados y permitieron completar el ejercicio.

Uno de los factores más importantes en la selección de éste tipo de equipos es la continua comunicación con los fabricantes y/o proveedores de los mismos, dado que ellos cuentan con la información y capacitación necesaria para ayudar a la toma de decisiones. Es por ello que se recomienda ponerse en contacto con diferentes proveedores y solicitar la información adecuada para mejor el diseño, además de consultar los costos e incluirlos en el estudio de viabilidad.

Se entiende que el estudio de viabilidad del proyecto es de suma importancia, pero la falta de información y los objetivos del presente trabajo hicieron que no se tuviera en cuenta. De todas maneras, se recomienda la lectura de bibliografía a fin de establecer los aspectos a considerar y los procedimientos de cálculo a utilizar, dado que a partir de éste análisis se establecen las condiciones finales para que el proyecto sea viable.

El riego es un arte compuesto por muchísimos factores que se deben tener en cuenta. El introducirse en el diseño de los sistemas de riego, la simulación numérica de los cultivos y la evaluación de un sinnúmero de condiciones implica tener un mínimo de conocimiento al respecto, tanto ingenieriles como agrícolas, de manera de asegurar que las condiciones impuestas en los modelos dan resultados coherentes. Este mundo fascinante compuesto por muchos factores, sigue evolucionando con el correr de los días y, tanto los diseñadores como los agricultores no se deben quedar conformes con los conocimientos adquiridos, sino que constantemente deben estar investigando en el tema.

En el presente trabajo se intentó dejar en evidencia los diferentes factores que intervienen, por lo que se entiende que en muchos de ellos es necesario introducirse con mayor detalle. Por lo tanto, se recomienda la lectura del presente trabajo y luego la búsqueda de información adicional que permita al lector aumentar su conocimiento en el tema y, de esa manera, realizar su trabajo con mayor confianza.

Por último, vale la pena destacar nuevamente la importancia que tiene no solo determinar el volumen de riego sino la oportunidad de aplicación, lo cual es relevante cuando el agua es limitada, como en la mayoría de los casos en México y el mundo. Es por ello que surge la necesidad de desarrollar trabajos como el presentado aquí, donde se intenta obtener el mayor beneficio con el agua disponible.

14 BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ÁLVAREZ, W. & DE SOUZA ROCHA, R. (2010). *Ficha temática 2 – El clima de Uruguay*. Editorial Santillana. Montevideo, Uruguay.
- [2]. APARICIO MIJARES, J. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Editorial Limusa. México.
- [3]. APSIM INITIATIVE, [en línea]. *APSIM Model*. Visualizado el 20 de agosto de 2016 en <<http://www.apsim.info/AboutUs/APSIMModel.aspx>>
- [4]. BUREAU OF RECLAMATION (1987). *Design of small dams. Third edition. P. 258*. Estados Unidos.
- [5]. CALERA, A. et al. (2003). *Aplicación de las tecnologías de Observación de la Tierra a los servicios de Asesoramiento de Riego*. Revista agropecuaria Agricultura, número 852, pág. 410-420. España.
- [6]. DSSAT, [en línea]. *DSSAT Overview – About DSSAT*. Visualizado el 29 de abril de 2016 en <<http://dssat.net/about>>
- [7]. DURÁN, A. (1996). *Clasificación en Grupos Hidrológicos de los suelos del Uruguay*. Facultad de Agronomía. Departamento de Suelos y Aguas. Uruguay.
- [8]. EDUCA PRADO, [en línea]. *Agricultura*. Visualizado el 29 de mayo de 2016 en <<http://www.duplex.com.uy/educaprado/cultivos.htm>>
- [9]. EL CONFIDENCIAL, [en línea]. *Lluvia sólida, el “milagro” que promete mitigar las sequías y escasez de alimento*. Visualizado el 11 de octubre de 2016 en <<http://www.elconfidencial.com/>>
- [10]. ERRO (2014). *Soja-Maíz. Catálogo 2014*. Uruguay.
- [11]. FONDO FINANCIERO DE PROYECTOS DE DESARROLLO (FONADE) E INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM). FERNÁNDEZ ESPERANZA, M. (2013). *Diagnóstico de modelos agroclimáticos. Evaluación del riesgo agroclimático por sectores*. Colombia.
- [12]. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS -FAO- (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Roma, Italia.
- [13]. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS -FAO- (2012). *Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua*. Roma, Italia.
- [14]. GARCÍA, F. (2005). *Desafíos para o manejo sustentável dos nutrientes em sistemas de produção de soja. Gargalos e perspectivas para o Cone Sul*. VII Congresso Brasileiro de Soja. Brasil.

- [15]. GLOBAL YIELD GAP ATLAS, [en línea]. *Global Yield Gap Atlas*. Visualizado el 30 de mayo de 2016 en <<http://www.yieldgap.org/gygamaps/app/index.html>>
- [16]. GRACIA SANCHEZ, J. (2002) *Introducción al Diseño de Zonas de Riego y Drenaje*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
- [17]. GUARÍN GIRALDO, G. W. (2011). *Impacto de la variabilidad climática en la producción de banano en Urabá Antioqueño*. Medellín, Colombia.
- [18]. INRA SCIENCE & IMPACT, [en línea]. *STICS*. Visualizado el 29 de abril de 2016 en <<http://www.inra.fr/en/Scientists-Students/Agricultural-systems/All-reports/Modelling-and-agrosystems/STICS-an-agronomy-dynamo>>
- [19]. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN AGRARIA Y PESQUERA (2010). *Manual de riego para agricultores. Módulo 2: Riego por superficie*. Sevilla, España.
- [20]. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN AGRARIA Y PESQUERA (2010). *Manual de riego para agricultores. Módulo 3: Riego por aspersión*. Sevilla, España.
- [21]. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y FORMACIÓN AGRARIA Y PESQUERA (2010). *Manual de riego para agricultores. Módulo 4: Riego localizado*. Sevilla, España.
- [22]. INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS (INIFAP), CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL DEL NOROESTE Y CAMPO EXPERIMENTAL VALLE DEL YAQUI (2009). *Horas frío en relación al rendimiento del trigo. Áreas de producción del estado de Sonora*. México.
- [23]. KRISHNA MURTY, V. R. (2003). *Crop growth modeling and its applications in agricultural meteorology*. Hyderabad, India.
- [24]. LA NACIÓN, [en línea]. *Guía para el buen cultivo de cebada*. Visualizado el 30 de mayo de 2016 en <<http://www.lanacion.com.ar/607381-guia-para-el-buen-cultivo-de-cebada>>
- [25]. LINK, E. J. (2005). *Investigation and Modeling of the optimization Potential of adapted Nitrogen Fertilization Strategies in Corn Cropping Systems with Regard to Minimize Nitrogen Losses*. Stuttgart, Alemania.
- [26]. LLUVIA SÓLIDA, [en línea]. *Lluvia sólida*. Visualizado el 11 de octubre de 2016 en <<http://lluviasolida.mx/>>
- [27]. MARTIN, E. (2010). *Métodos para medir la humedad del suelo para la programación del suelo ¿Cuándo?* Arizona, Estados Unidos
- [28]. MIGLIETA, F. & BINDI, M. (1993). *Crop growth simulation models for research, farm management and agrometeorology*. Florencia, Italia.
- [29]. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA (1967). *Carta de Reconocimiento de Suelos de Uruguay*. Montevideo, Uruguay.
- [30]. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA (1996). *Carta de Reconocimiento de Suelos*. Departamento de Soriano. Uruguay.

- [31]. MINISTERIO DE VIVIENDA, ORDENAMIENTO TERRITORIAL Y MEDIO AMBIENTE (MVTOMA), DIRECCIÓN NACIONAL DE AGUA (DINAGUA) E INSTITUTO DE MECÁNICA DE LOS FLUIDOS (IMFIA) (2011). *Manual de diseño y construcción de pequeñas presas. Segunda edición*. Montevideo, Uruguay.
- [32]. MOLFINO, J. & CALIFRA, A. (2001). *Agua disponible de las tierras de Uruguay. Segunda aproximación*. Uruguay.
- [33]. OSPINA, J. (2006). *Validación del modelo DSSAT en diferentes condiciones agroecológicas de Colombia, una herramienta para optimizar las prácticas de manejo del cultivo del maíz*. Medellín, Colombia.
- [34]. QUINTANILLA, A. et al (2007). *Aplicación de tecnologías solap/web para el asesoramiento de riego por satélite*. Albacete, España.
- [35]. RAMOS HERNÁNDEZ, J. G. et al. (2015). *Mediciones de humedad de suelo en un ecosistema riveroño (humedales) para la validación de los productos SMAP L4SM. Parte II. Informe final del proyecto 4354*. Ciudad de México, México.
- [36]. RODRIGUEZ ARVIZU, M. (2008). *Modelos de simulación para cereales forrajeros en el sur de Nuevo León, México*. Coahuila, México.
- [37]. SANTOS PEREIRA, L. et al. (2004). *El riego y sus tecnologías*. Lisboa, Portugal.
- [38]. SILOS DE AGUA, [en línea]. *Silos de agua*. Visualizado el 11 de octubre de 2016 en <<http://silosdeagua.cl/>>
- [39]. STEDUTO, P. (2006). *Biomass Water-Productivity. Comparing the growth-engines of crop models*. Roma, Italia.
- [40]. TORO (2014). *Manual de usuario – AquaFlow*. Estados Unidos.
- [41]. TULLER, M. & OR, D. (2003). *Retention of water in soil and the soil water characteristic curve*. USA.
- [42]. UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA - FACULTAD DE AGRONOMÍA (2013). *Agua en el suelo*. Uruguay.
- [43]. UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA – FACULTAD DE AGRONOMÍA (2013). *Opciones de manejo en Uruguay para cultivos de maíz, soja y trigo*. Uruguay.
- [44]. UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA – FACULTAD DE AGRONOMÍA (2015). *Necesidades hídricas de los cultivos*. Uruguay.
- [45]. VEN TE CHOW (1988). *Applied Hydrology*. Editorial McGraw-Hill. New York, Estados Unidos.
- [46]. WASHINGTON STATE UNIVERSITY, [en línea]. *CS Suite CropSyst*. Visualizado el 29 de abril de 2016 en <http://modeling.bsyse.wsu.edu/CS_Suite_4/CropSyst/index.html>

15 ANEXO**15.1 Anexo 1**

A continuación, se presentan los grupos hidrológicos de los diferentes tipos de suelos de Uruguay.

Unidad Cartográfica de Suelos		Grupo	Unidad Cartográfica de Suelos		Grupo
Alfarez	AF	C	Lechiguana	Le	D
Algorta	Al	C/D	Libertad	Li	C
Andresito	An	B	Los Mimbres	LM	C
Angostura	Ag	A/D	Manuel Oribe	MO	C
Aparicio Saravia	AS	C	Masoller	Ma	C
Arapey	Ay	D	Montecoral	Mc	D
Arroyo Blanco	AB	C	Palleros	PII	C/D
Arroyo Hospital	AH	C	Paso Cohelo	PC	D
Bacacué	Ba	B	Paso Palmar	PP	B
Balneario Jaureguiberry	BJ	A/D	Pueblo el Barro	PB	D
Bañado de Farrapos	BF	D	Puntas de Herrera	PdH	C
Bañada de Oro	BO	C	Queguay Chico	QCh	D
Baygorria	By	C	Rincón de la Urbana	RU	C
Bellaco	Bc	D	Rincón de Ramirez	RR	D
Bequeló	Bq	C	Rincón Zamora	RZ	B/C
Blanquillo	Bl	C	Río Branco	RB	D
Cañada Nieto	CñN	D	Río Tacuarembó	RT	D
Capilla de Farruco	CF	B/D	Risso	Ri	D
Carapé	Ca	B	Rivera	Rv	B
Carpintería	Cpt	D	Salto	St	D
Cebollatí	Cb	C	San Carlos	SC	C
Cerro Chato	CCh	B	San Gabriel - Guaycurú	SG-G	B
Colonia Palma	CP	C	San Jacinto	SJc	C
Constitución	Ct	A	San Jorge	SJo	C
Cuaró	Cr	D	San Luis	SL	D
Cuchilla Caraguatá	Cca	C	San Manuel	SM	C
Cuchilla Corrales	Cco	C	San Ramón	SR	D
Cuchilla de Corralito	CC	C/D	Santa Clara	SCI	B
Cuchilla de Haedo - P. de los Toros	CH-PT	D	Sarandí de Tejera	SdT	B/C
Cuchilla Mangueras	CM	C	Sierra de Aiguá	SA g	D
Cuchilla Santa Ana	CSA	C	Sierra de Animas	SA	B
Curtina	Cu	D	Sierra de Mahoma	SMh	B
Chapicuy	Ch	B	Sierra de Polanco	SP	B/C
Ecilda Paullier - Las Brujas	EP-LB	C	Tacuarembó	Ta	C

El Ceibo	EC	D	Tala - Rodriguez	TI-Rd	C/D
El Palmito	Epa	C	Toeldo	Tol	C
Espinillar	Ep	C	Tres Bocas	TB	C
Fraile Muerto	FM	C	Tres Cerros	TC	B/C
Fray Bentos	FB	C	Tres Islas	TI-Rd	B
India Muerta	Imu	D	Tres Puentes	TP	B/C
Isla Mala	IM	C	Trinidad	Tr	C/D
Islas del Uruguay	IU	D	Valle Aiguá	VA	C
Itapebi - Tres Árboles	I-TA	D	Valle Fuentes	VF	C
José Pedro Varela	JPV	C	Vergara	Ve	D
Kiyú	Ky	C/D	Villa Soriano	VS	C
La Carolina	LC	C/D	Yí	TI-Rd	B/C
La Charqueada	LCh	D	Young	Yg	C
Laguna Merín	Lme	D	Zapallar	Zp	C
Las Toscas	LT	B	Zapicán	Za	C
Lascano	La	D			

Tabla 29 - Grupo hidrológico (según NRCS) de los suelos de Uruguay (Durán, 1996)

NUMERO DE CURVA PARA LAS DIFERENTES COMBINACIONES HIDROLÓGICAS DE SUELO - VEGETACIÓN						
Uso de suelo hidrológico y cubierta	Tratamiento o método	Condición Hidrológica	Grupo hidrológico del suelo			
			A	B	C	D
Barbecho	SR		77	86	91	94
Cultivos en hileras (maíz, sorgo. Soya, tomates, remolacha azucarera)	SR	Mala	72	81	88	91
	SR	Buena	67	78	85	89
	C	Mala	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	CyT	Mala	66	74	80	82
	CyT	Buena	62	71	78	81
Granos pequeños (trigo, avena, lino, cebada)	SR	Mala	65	76	84	88
	SR	Buena	63	75	83	87
	C	Mala	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	CyT	Mala	61	72	79	82
	CyT	Buena	59	70	78	81
Legumbres tupidas ¹ o rotación de praderas (Alfalfa)	SR	Mala	66	77	85	89
	SR	Buena	58	72	81	85
	C	Mala	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	CyT	Mala	63	73	80	83
	CyT	Buena	51	67	76	80

Pradera o pastizal (césped, parques ² , campos de golf ³)		Mala	68	79	86	89
		Regular	49	69	79	84
		Buena	39	61	74	80
	C	Mala	47	67	81	88
	C	Regular	25	59	75	83
	C	Buena	6	35	70	79
Hierba con baja densidad y arbustos			30	58	71	78
Bosques cubierta pobre ⁴ cubierta buena ⁵		Mala	45	66	77	83
		Regular	36	60	73	79
		Buena	25	55	80	77
Cascos de los ranchos			59	74	82	86
Parqueadores pavimentados, techos			98	98	98	98
Calles y carreteras: Pavimentadas con cunetas y alcant. Grava Tierra			98	98	98	98
			76	95	89	91
			72	82	87	89
Áreas comerciales (85% impermeable)			89	92	94	85
Distritos industriales (72% impermeables)			81	88	94	93
Residencial: <0.05 ha 65% impermeable 0.1 ha 38% impermeable 0.13 ha 30% impermeable 0.2 ha 25% impermeable 0.4 ha 20% impermeable			77	85	90	92
			61	75	83	87
			57	72	81	86
			54	70	80	85
			51	68	79	84

SR = Hileras rectas / C = Por líneas de nivel / CyT = Terrazas a nivel

1 Sembrados juntos o a boleo / 2 Condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%

3 Óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más / 4 Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas

5 Una cubierta buena está protegida del pastizaje, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo

Tabla 30 - Números de curva del Método NRCS (MVOTMA, DINAGUA e IMFIA, 2011)

Unidad Cartográfica de Suelos		Agua Disponible (mm)	Unidad Cartográfica de Suelos		Agua Disponible (mm)
Alfarez	AF	124.7	Lechiguana	Le	113.3
Algorta	Al	123.7	Libertad	Li	146.7
Andresito	An	63.7	Los Mimbres	LM	100.1
Angostura	Ag	155.1	Manuel Oribe	MO	145.8
Aparicio Saravia	AS	139.7	Masoller	Ma	52.1
Arapey	Ay	136.8	Montecoral	Mc	84.7
Arroyo Blanco	AB	101	Palleros	PII	116.5
Arroyo Hospital	AH	86.1	Paso Cohelo	PC	147.4

Bacacúa	Ba	97.1	Paso Palmar	PP	88.2
Balneario Jaureguiberry	BJ	134.5	Pueblo el Barro	PB	131.6
Bañado de Farrapos	BF	178.7	Puntas de Herrera	PdH	85.8
Bañada de Oro	BO	89	Queguay Chico	QCh	32.7
Baygorria	By	110.5	Rincón de la Urbana	RU	131.1
Bellaco	Bc	146.2	Rincón de Ramirez	RR	73.3
Bequeló	Bq	138.2	Rincón Zamora	RZ	148.3
Blanquillo	Bl	114.6	Río Branco	RB	102
Cañada Nieto	CñN	146.4	Río Tacuarembó	RT	161
Capilla de Farruco	CF	35.4	Risso	Ri	150.6
Carapé	Ca	41.5	Rivera	Rv	179.6
Carpintería	Cpt	139	Salto	St	107.2
Cebollatí	Cb	167.6	San Carlos	SC	78
Cerro Chato	CCh	78.6	San Gabriel - Guaycurú	SG-G	92.4
Colonia Palma	CP	108.9	San Jacinto	SJc	83.1
Constitución	Ct	73.6	San Jorge	SJo	141.2
Cuaró	Cr	93.2	San Luis	SL	176.2
Cuchilla Caraguatá	Cca	71.2	San Manuel	SM	117.3
Cuchilla Corrales	Cco	160.6	San Ramón	SR	152.7
Cuchilla de Corralito	CC	119.8	Santa Clara	SCI	63.6
Cuchilla de Haedo - P. de los Toros	CH-PT	21.5	Sarandí de Tejera	SdT	50
Cuchilla Mangueras	CM	150.2	Sierra de Aiguá	SA g	42.6
Cuchilla Santa Ana	CSA	51.8	Sierra de Animas	SA	50.1
Curtina	Cu	55.2	Sierra de Mahoma	SMh	43.9
Chapicuy	Ch	100.1	Sierra de Polanco	SP	73
Ecilda Paullier - Las Brujas	EP-LB	136.7	Tacuarembó	Ta	168.4
El Ceibo	EC	78.6	Tala - Rodriguez	TI-Rd	130.9
El Palmito	Epa	142.3	Toeldo	Tol	118.7
Espinillar	Ep	141	Tres Bocas	TB	110.8
Fraile Muerto	FM	133.4	Tres Cerros	TC	85.1
Fray Bentos	FB	115.4	Tres Islas	TI-Rd	96.6
India Muerta	Imu	171.1	Tres Puentes	TP	103.4
Isla Mala	IM	102.1	Trinidad	Tr	148.4
Islas del Uruguay	IU	183	Valle Aiguá	VA	102.8
Itapebi - Tres Árboles	I-TA	124.2	Valle Fuentes	VF	131.4
José Pedro Varela	JPV	87.2	Vergara	Ve	117.1
Kiyú	Ky	154.7	Villa Soriano	VS	173.3
La Carolina	LC	156.1	Yí	TI-Rd	71
La Charqueada	LCh	95.2	Young	Yg	145

Laguna Merín	Lme	169.3	Zapallar	Zp	153.2
Las Toscas	LT	177.5	Zapicán	Za	84.8
Lascano	La	126.4			

Tabla 31 - Agua Disponible de los suelos del Uruguay (Molano y Califa, 2001)

15.2 Anexo 2

Resultado de simulación de cultivo (soja) con el método de Flinn (UNAM).

Día	Fecha	I (mm)	Q (mm)	Y (mm)	Eo (mm)	ETPo (mm)	Kc	ETP (mm)	R	h ini (mm)	Σh	W	ψ	Ea	h fin (mm)	Ea/Etp	P
1	24-Oct	0.00	0.00	0.00	6.80	4.6	0.40	1.82	177.89	177.89	177.89	27.85	33.00	1.821	176.07	1.00	1.00
2	25-Oct	0.00	0.00	0.00	3.10	2.1	0.40	0.83	0.00	176.07	176.07	27.71	33.69	0.831	175.24	1.00	1.00
3	26-Oct	0.00	0.00	0.00	5.90	4.0	0.40	1.58	0.00	175.24	175.24	27.64	34.01	1.580	173.66	1.00	1.00
4	27-Oct	0.00	0.00	0.00	6.50	4.4	0.40	1.74	0.00	173.66	173.66	27.52	34.63	1.741	171.92	1.00	1.00
5	28-Oct	0.00	0.00	0.00	4.10	2.7	0.40	1.10	0.00	171.92	171.92	27.38	35.33	1.099	170.82	1.00	1.00
6	29-Oct	11.40	1.00	10.40	5.90	4.0	0.40	1.58	0.00	170.82	177.89	27.29	35.78	1.580	176.31	1.00	1.00
7	30-Oct	0.00	0.00	0.00	7.30	4.9	0.40	1.96	0.00	176.31	176.31	27.73	33.60	1.954	174.36	1.00	1.00
8	31-Oct	0.00	0.00	0.00	4.60	3.1	0.40	1.23	0.00	174.36	174.36	27.57	34.35	1.232	173.13	1.00	1.00
9	1-Nov	0.00	0.00	0.00	9.10	6.1	0.40	2.44	0.00	173.13	173.13	27.47	34.84	2.434	170.69	1.00	1.00
10	2-Nov	0.00	0.00	0.00	7.00	4.7	0.40	1.88	0.00	170.69	170.69	27.28	35.83	1.874	168.82	1.00	1.00
11	3-Nov	0.00	0.00	0.00	7.20	4.8	0.40	1.93	0.00	168.82	168.82	27.13	36.63	1.927	166.89	1.00	1.00
12	4-Nov	0.00	0.00	0.00	7.70	5.2	0.40	2.06	0.00	166.89	166.89	26.97	37.46	2.060	164.83	1.00	1.00
13	5-Nov	0.00	0.00	0.00	9.20	6.2	0.40	2.47	0.00	164.83	164.83	26.81	38.39	2.459	162.37	1.00	1.00
14	6-Nov	0.00	0.00	0.00	7.70	5.2	0.40	2.06	0.00	162.37	162.37	26.61	39.53	2.059	160.31	1.00	1.00
15	7-Nov	0.00	0.00	0.00	12.90	8.6	0.40	3.46	0.00	160.31	160.31	26.45	40.53	3.436	156.88	0.99	0.99
16	8-Nov	0.00	0.00	0.00	5.90	4.0	0.40	1.58	0.00	156.88	156.88	26.17	42.26	1.580	155.30	1.00	1.00
17	9-Nov	3.60	3.51	0.09	2.80	1.9	0.40	0.75	0.00	155.30	155.39	26.05	43.09	0.750	154.64	1.00	1.00
18	10-Nov	0.50	5.02	0.00	3.60	2.4	0.40	0.96	0.00	154.64	154.64	25.99	43.44	0.965	153.67	1.00	1.00
19	11-Nov	0.20	5.19	0.00	7.00	4.7	0.40	1.88	0.00	153.67	153.67	25.92	43.97	1.873	151.80	1.00	1.00
20	12-Nov	0.00	0.00	0.00	7.40	5.0	0.40	1.98	0.00	151.80	151.80	25.77	45.01	1.978	149.82	1.00	1.00
21	13-Nov	0.00	0.00	0.00	9.10	6.1	0.42	2.57	0.00	149.82	149.82	25.61	46.15	2.560	147.26	1.00	0.99
22	14-Nov	0.00	0.00	0.00	8.40	5.6	0.44	2.49	0.00	147.26	147.26	25.40	47.68	2.483	144.78	1.00	0.99
23	15-Nov	0.00	0.00	0.00	9.20	6.2	0.46	2.86	0.00	144.78	144.78	25.21	49.24	2.847	141.93	0.99	0.99

24	16-Nov	0.00	0.00	0.00	9.20	6.2	0.49	2.99	0.00	141.93	141.93	24.98	51.10	2.975	138.96	0.99	0.99
25	17-Nov	0.00	0.00	0.00	7.50	5.0	0.51	2.55	0.00	138.96	138.96	24.74	53.16	2.536	136.42	0.99	0.99
26	18-Nov	53.00	7.33	45.67	5.80	3.9	0.53	2.05	0.00	136.42	177.89	24.54	55.00	2.046	175.85	1.00	0.99
27	19-Nov	0.00	0.00	0.00	7.90	5.3	0.55	2.91	0.00	175.85	175.85	27.69	33.77	2.904	172.94	1.00	0.99
28	20-Nov	0.00	0.00	0.00	13.50	9.0	0.57	5.17	0.00	172.94	172.94	27.46	34.91	5.049	167.89	0.98	0.95
29	21-Nov	0.00	0.00	0.00	4.60	3.1	0.59	1.83	0.00	167.89	167.89	27.06	37.02	1.825	166.07	1.00	1.00
30	22-Nov	15.40	5.14	10.26	6.60	4.4	0.61	2.72	0.00	166.07	176.33	26.91	37.83	2.709	173.62	1.00	0.99
31	23-Nov	0.00	0.00	0.00	9.60	6.4	0.64	4.09	0.00	173.62	173.62	27.51	34.64	4.052	169.57	0.99	0.98
32	24-Nov	0.00	0.00	0.00	9.80	6.6	0.66	4.31	0.00	169.57	169.57	27.19	36.31	4.265	165.30	0.99	0.98
33	25-Nov	0.00	0.00	0.00	7.40	5.0	0.68	3.36	0.00	165.30	165.30	26.85	38.17	3.348	161.95	1.00	0.99
34	26-Nov	0.00	0.00	0.00	10.20	6.8	0.70	4.78	0.00	161.95	161.95	26.58	39.73	4.686	157.27	0.98	0.96
35	27-Nov	0.00	0.00	0.00	9.70	6.5	0.72	4.69	0.00	157.27	157.27	26.20	42.06	4.591	152.68	0.98	0.96
36	28-Nov	0.00	0.00	0.00	8.30	5.6	0.74	4.13	0.00	152.68	152.68	25.84	44.52	4.069	148.61	0.98	0.97
37	29-Nov	10.00	1.32	8.68	3.90	2.6	0.76	2.00	0.00	148.61	157.28	25.51	46.87	1.992	155.29	1.00	0.99
38	30-Nov	2.70	3.91	0.00	8.70	5.8	0.79	4.58	0.00	155.29	155.29	26.05	43.09	4.488	150.80	0.98	0.96
39	1-Dec	0.00	0.00	0.00	13.80	9.2	0.81	7.46	0.00	150.80	150.80	25.69	45.58	5.113	145.69	0.69	0.37
40	2-Dec	6.00	2.55	3.45	7.60	5.1	0.83	4.22	0.00	145.69	149.14	25.28	48.66	4.138	145.01	0.98	0.96
41	3-Dec	0.00	0.00	0.00	5.40	3.6	0.85	3.08	0.00	145.01	145.01	25.22	49.09	3.056	141.95	0.99	0.99
42	4-Dec	0.00	0.00	0.00	10.00	6.7	0.87	5.84	0.00	141.95	141.95	24.98	51.09	5.158	136.79	0.88	0.77
43	5-Dec	5.50	2.73	2.77	8.50	5.7	0.89	5.08	0.00	136.79	139.56	24.57	54.73	4.828	134.73	0.95	0.90
44	6-Dec	54.40	7.91	46.49	7.50	5.0	0.91	4.59	0.00	134.73	177.89	24.40	56.28	4.438	173.45	0.97	0.93
45	7-Dec	0.00	0.00	0.00	9.10	6.1	0.94	5.71	0.00	173.45	173.45	27.50	34.71	5.442	168.01	0.95	0.91
46	8-Dec	0.00	0.00	0.00	11.40	7.6	0.96	7.31	0.00	168.01	168.01	27.06	36.97	4.572	163.44	0.63	0.25
47	9-Dec	0.00	0.00	0.00	11.70	7.8	0.98	7.67	0.00	163.44	163.44	26.70	39.03	6.541	156.90	0.85	0.71
48	10-Dec	16.30	5.75	10.55	8.10	5.4	1.00	5.43	0.00	156.90	167.45	26.18	42.25	5.180	162.27	0.95	0.91
49	11-Dec	0.00	0.00	0.00	7.00	4.7	1.02	4.79	0.00	162.27	162.27	26.60	39.58	4.693	157.57	0.98	0.96
50	12-Dec	0.00	0.00	0.00	10.30	6.9	1.04	7.20	0.00	157.57	157.57	26.23	41.90	2.774	154.80	0.39	0.00
51	13-Dec	0.00	0.00	0.00	10.00	6.7	1.06	7.13	0.00	154.80	154.80	26.01	43.36	1.750	153.05	0.25	0.00

52	14-Dec	2.00	4.25	0.00	8.00	5.4	1.09	5.82	0.00	153.05	153.05	25.87	44.31	5.310	147.74	0.91	0.83
53	15-Dec	0.00	0.00	0.00	1.60	1.1	1.11	1.19	0.00	147.74	147.74	25.44	47.39	1.186	146.55	1.00	1.00
54	16-Dec	3.20	3.68	0.00	2.20	1.5	1.13	1.66	0.00	146.55	146.55	25.35	48.12	1.662	144.89	1.00	1.00
55	17-Dec	29.30	0.57	28.73	3.00	2.0	1.15	2.31	0.00	144.89	173.62	25.21	49.17	2.303	171.31	1.00	0.99
56	18-Dec	4.00	0.62	3.38	4.10	2.7	1.15	3.16	0.00	171.31	174.70	27.33	35.58	3.148	171.55	1.00	0.99
57	19-Dec	92.10	54.01	38.09	5.30	3.6	1.15	4.08	0.00	171.55	177.89	27.35	35.48	4.045	173.85	0.99	0.98
58	20-Dec	0.00	0.00	0.00	7.40	5.0	1.15	5.70	0.00	173.85	173.85	27.53	34.55	5.442	168.40	0.95	0.91
59	21-Dec	0.00	0.00	0.00	11.40	7.6	1.15	8.78	0.00	168.40	168.40	27.10	36.80	8.576	159.83	0.98	0.95
60	22-Dec	0.00	0.00	0.00	9.00	6.0	1.15	6.93	0.00	159.83	159.83	26.41	40.76	0.001	159.83	0.00	0.00
61	23-Dec	0.00	0.00	0.00	12.80	8.6	1.15	9.86	0.00	159.83	159.83	26.41	40.76	9.747	150.08	0.99	0.98
62	24-Dec	0.00	0.00	0.00	6.90	4.6	1.15	5.32	0.00	150.08	150.08	25.63	46.00	5.067	145.01	0.95	0.91
63	25-Dec	3.60	3.51	0.09	8.20	5.5	1.15	6.32	0.00	145.01	145.11	25.22	49.09	4.567	140.54	0.72	0.45
64	26-Dec	0.00	0.00	0.00	7.60	5.1	1.15	5.86	0.00	140.54	140.54	24.87	52.05	5.131	135.41	0.88	0.75
65	27-Dec	0.00	0.00	0.00	8.20	5.5	1.15	6.32	0.00	135.41	135.41	24.46	55.76	4.227	131.18	0.67	0.34
66	28-Dec	0.00	0.00	0.00	9.90	6.6	1.15	7.63	0.00	131.18	131.18	24.12	59.10	5.271	125.91	0.69	0.38
67	29-Dec	0.00	0.00	0.00	11.10	7.4	1.15	8.55	0.00	125.91	125.91	23.70	63.65	7.812	118.10	0.91	0.83
68	30-Dec	0.00	0.00	0.00	11.60	7.8	1.15	8.94	0.00	118.10	118.10	23.07	71.35	8.294	109.81	0.93	0.86
69	31-Dec	26.00	0.21	25.79	8.00	5.4	1.15	6.16	0.00	109.81	135.60	22.41	80.99	3.693	131.91	0.60	0.20
70	1-Jan	0.00	0.00	0.00	6.80	4.6	1.15	5.24	0.00	131.91	131.91	24.18	58.51	4.885	127.02	0.93	0.86
71	2-Jan	0.00	0.00	0.00	8.00	5.4	1.15	6.16	0.00	127.02	127.02	23.79	62.66	4.401	122.62	0.71	0.43
72	3-Jan	0.00	0.00	0.00	12.90	8.6	1.15	9.94	0.00	122.62	122.62	23.43	66.75	9.648	112.97	0.97	0.94
73	4-Jan	37.00	10.79	26.21	6.40	4.3	1.15	4.93	0.00	112.97	139.18	22.66	77.11	4.523	134.66	0.92	0.83
74	5-Jan	0.00	0.00	0.00	7.70	5.2	1.15	5.93	0.00	134.66	134.66	24.40	56.34	4.978	129.68	0.84	0.68
75	6-Jan	0.00	0.00	0.00	6.20	4.2	1.15	4.78	0.00	129.68	129.68	24.00	60.35	4.560	125.12	0.95	0.91
76	7-Jan	0.00	0.00	0.00	6.40	4.3	1.15	4.93	0.00	125.12	125.12	23.63	64.38	4.640	120.48	0.94	0.88
77	8-Jan	0.00	0.00	0.00	8.80	5.9	1.15	6.78	0.00	120.48	120.48	23.26	68.87	0.533	119.95	0.08	0.00
78	9-Jan	0.00	0.00	0.00	8.50	5.7	1.15	6.55	0.00	119.95	119.95	23.22	69.41	2.219	117.73	0.34	0.00
79	10-Jan	0.00	0.00	0.00	12.30	8.2	1.15	9.48	0.00	117.73	117.73	23.04	71.74	9.037	108.69	0.95	0.91

80	11-Jan	0.00	0.00	0.00	10.00	6.7	1.15	7.71	0.00	108.69	108.69	22.32	82.42	4.522	104.17	0.59	0.17
81	12-Jan	0.00	0.00	0.00	10.50	7.0	1.15	8.09	71.16	104.17	175.33	21.96	88.60	5.946	169.38	0.73	0.47
82	13-Jan	0.00	0.00	0.00	7.20	4.8	1.15	5.55	0.00	169.38	169.38	27.17	36.38	5.325	164.06	0.96	0.92
83	14-Jan	0.00	0.00	0.00	9.40	6.3	1.15	7.24	0.00	164.06	164.06	26.75	38.74	3.651	160.41	0.50	0.01
84	15-Jan	0.00	0.00	0.00	7.40	5.0	1.15	5.70	0.00	160.41	160.41	26.46	40.48	5.351	155.06	0.94	0.88
85	16-Jan	10.50	1.20	9.30	7.00	4.7	1.15	5.39	0.00	155.06	164.35	26.03	43.22	5.147	159.21	0.95	0.91
86	17-Jan	5.00	2.92	2.08	8.50	5.7	1.15	6.55	0.00	159.21	161.28	26.36	41.07	3.891	157.39	0.59	0.19
87	18-Jan	0.00	0.00	0.00	6.10	4.1	1.15	4.70	0.00	157.39	157.39	26.21	41.99	4.601	152.79	0.98	0.96
88	19-Jan	0.00	0.00	0.00	8.10	5.4	1.15	6.24	0.00	152.79	152.79	25.85	44.46	4.998	147.79	0.80	0.60
89	20-Jan	0.00	0.00	0.00	9.30	6.2	1.15	7.17	0.00	147.79	147.79	25.45	47.36	1.974	145.82	0.28	0.00
90	21-Jan	0.00	0.00	0.00	8.40	5.6	1.15	6.47	0.00	145.82	145.82	25.29	48.58	3.887	141.93	0.60	0.20
91	22-Jan	0.00	0.00	0.00	9.40	6.3	1.15	7.24	0.00	141.93	141.93	24.98	51.11	2.671	139.26	0.37	0.00
92	23-Jan	0.00	0.00	0.00	5.80	3.9	1.15	4.47	0.00	139.26	139.26	24.76	52.95	4.347	134.91	0.97	0.95
93	24-Jan	0.00	0.00	0.00	10.50	7.0	1.15	8.09	0.00	134.91	134.91	24.42	56.14	7.067	127.85	0.87	0.75
94	25-Jan	0.00	0.00	0.00	8.90	6.0	1.15	6.86	0.00	127.85	127.85	23.85	61.93	0.183	127.66	0.03	0.00
95	26-Jan	0.00	0.00	0.00	11.00	7.4	1.15	8.48	0.00	127.66	127.66	23.84	62.09	7.709	119.95	0.91	0.82
96	27-Jan	0.00	0.00	0.00	10.80	7.2	1.15	8.32	0.00	119.95	119.95	23.22	69.41	7.214	112.74	0.87	0.73
97	28-Jan	0.00	0.00	0.00	12.00	8.0	1.15	9.25	0.00	112.74	112.74	22.64	77.38	8.653	104.09	0.94	0.87
98	29-Jan	0.00	0.00	0.00	10.90	7.3	1.15	8.40	71.16	104.09	175.25	21.95	88.73	6.855	168.39	0.82	0.63
99	30-Jan	0.00	0.00	0.00	7.20	4.8	1.15	5.55	0.00	168.39	168.39	27.09	36.81	5.320	163.07	0.96	0.92
100	31-Jan	0.00	0.00	0.00	14.20	9.5	1.15	10.94	0.00	163.07	163.07	26.67	39.20	10.877	152.19	0.99	0.99
101	1-Feb	15.10	0.37	14.73	8.50	5.7	1.15	6.55	0.00	152.19	166.92	25.80	44.79	3.614	163.31	0.55	0.10
102	2-Feb	0.00	0.00	0.00	10.50	7.0	1.15	8.09	0.00	163.31	163.31	26.69	39.09	7.560	155.75	0.93	0.87
103	3-Feb	0.00	0.00	0.00	8.30	5.6	1.15	6.40	0.00	155.75	155.75	26.08	42.85	4.631	151.12	0.72	0.45
104	4-Feb	0.00	0.00	0.00	9.20	6.2	1.15	7.09	0.00	151.12	151.12	25.71	45.40	1.089	150.03	0.15	0.00
105	5-Feb	0.00	0.00	0.00	10.00	6.7	1.15	7.71	0.00	150.03	150.03	25.63	46.03	6.318	143.71	0.82	0.64
106	6-Feb	0.00	0.00	0.00	9.90	6.6	1.15	7.63	0.00	143.71	143.71	25.12	49.93	5.782	137.93	0.76	0.52
107	7-Feb	0.00	0.00	0.00	10.30	6.9	1.15	7.94	0.00	137.93	137.93	24.66	53.90	6.738	131.19	0.85	0.70

108	8-Feb	0.00	0.00	0.00	10.20	6.8	1.15	7.86	0.00	131.19	131.19	24.12	59.09	6.282	124.91	0.80	0.60
109	9-Feb	0.00	0.00	0.00	9.10	6.1	1.15	7.01	0.00	124.91	124.91	23.62	64.58	0.148	124.76	0.02	0.00
110	10-Feb	0.00	0.00	0.00	8.30	5.6	1.15	6.40	0.00	124.76	124.76	23.60	64.72	3.422	121.34	0.54	0.07
111	11-Feb	0.00	0.00	0.00	11.80	7.9	1.15	9.09	0.00	121.34	121.34	23.33	68.01	8.571	112.77	0.94	0.89
112	12-Feb	5.00	2.92	2.08	2.30	1.5	1.15	1.77	0.00	112.77	114.84	22.64	77.35	1.765	113.08	1.00	0.99
113	13-Feb	4.00	3.33	0.67	6.80	4.6	1.15	5.24	0.00	113.08	113.74	22.67	76.98	4.655	109.09	0.89	0.78
114	14-Feb	1.50	4.50	0.00	8.30	5.6	1.15	6.40	0.00	109.09	109.09	22.35	81.91	2.673	106.42	0.42	0.00
115	15-Feb	0.00	0.00	0.00	10.40	7.0	1.15	8.01	71.16	106.42	177.57	22.14	85.46	5.785	171.79	0.72	0.44
116	16-Feb	25.50	0.17	25.33	5.80	3.9	1.12	4.37	0.00	171.79	177.89	27.37	35.38	4.318	173.57	0.99	0.98
117	17-Feb	0.00	0.00	0.00	5.20	3.5	1.10	3.83	0.00	173.57	173.57	27.51	34.66	3.801	169.77	0.99	0.99
118	18-Feb	0.00	0.00	0.00	0.90	0.6	1.07	0.65	0.00	169.77	169.77	27.21	36.22	0.646	169.13	1.00	1.00
119	19-Feb	8.60	0.00	8.60	1.60	1.1	1.05	1.12	0.00	169.13	177.72	27.15	36.49	1.121	176.60	1.00	1.00
120	20-Feb	6.50	0.14	6.36	5.20	3.5	1.02	3.55	0.00	176.60	177.89	27.75	33.48	3.538	174.35	1.00	0.99
121	21-Feb	0.60	1.92	0.00	7.90	5.3	0.99	5.26	0.00	174.35	174.35	27.57	34.35	5.130	169.22	0.98	0.95
122	22-Feb	0.00	0.00	0.00	7.30	4.9	0.97	4.73	0.00	169.22	169.22	27.16	36.45	4.657	164.57	0.98	0.97
123	23-Feb	0.30	5.13	0.00	1.30	0.9	0.94	0.82	0.00	164.57	164.57	26.79	38.51	0.820	163.75	1.00	1.00
124	24-Feb	19.30	0.03	19.27	6.80	4.6	0.92	4.17	0.00	163.75	177.89	26.72	38.89	4.123	173.77	0.99	0.98
125	25-Feb	0.00	0.00	0.00	6.30	4.2	0.89	3.76	0.00	173.77	173.77	27.52	34.58	3.734	170.03	0.99	0.99
126	26-Feb	0.00	0.00	0.00	5.80	3.9	0.86	3.36	0.00	170.03	170.03	27.23	36.11	3.343	166.69	1.00	0.99
127	27-Feb	0.00	0.00	0.00	8.00	5.4	0.84	4.49	0.00	166.69	166.69	26.96	37.55	4.428	162.26	0.99	0.97
128	28-Feb	0.00	0.00	0.00	4.00	2.7	0.81	2.18	0.00	162.26	162.26	26.60	39.58	2.171	160.09	1.00	1.00
129	1-Mar	47.00	5.05	41.95	1.00	0.7	0.79	0.53	0.00	160.09	177.89	26.43	40.63	0.527	177.37	1.00	1.00
130	2-Mar	2.00	1.28	0.72	2.50	1.7	0.76	1.27	0.00	177.37	177.89	27.81	33.20	1.273	176.62	1.00	1.00
131	3-Mar	0.00	0.00	0.00	5.60	3.8	0.73	2.75	0.00	176.62	176.62	27.75	33.48	2.748	173.87	1.00	1.00
132	4-Mar	0.00	0.00	0.00	4.90	3.3	0.71	2.32	0.00	173.87	173.87	27.53	34.54	2.320	171.55	1.00	1.00
133	5-Mar	0.00	0.00	0.00	6.90	4.6	0.68	3.15	0.00	171.55	171.55	27.35	35.48	3.142	168.41	1.00	0.99
134	6-Mar	0.00	0.00	0.00	6.70	4.5	0.66	2.94	0.00	168.41	168.41	27.10	36.80	2.935	165.47	1.00	0.99
135	7-Mar	0.00	0.00	0.00	6.90	4.6	0.63	2.91	0.00	165.47	165.47	26.86	38.10	2.903	162.57	1.00	0.99

136	8-Mar	0.00	0.00	0.00	9.80	6.6	0.60	3.97	0.00	162.57	162.57	26.63	39.44	3.927	158.65	0.99	0.98
137	9-Mar	22.50	0.02	22.48	6.00	4.0	0.58	2.32	0.00	158.65	177.89	26.32	41.36	2.317	175.57	1.00	0.99
138	10-Mar	0.00	0.00	0.00	4.70	3.1	0.55	1.74	0.00	175.57	175.57	27.67	33.88	1.737	173.84	1.00	1.00
139	11-Mar	0.20	5.19	0.00	2.00	1.3	0.53	0.70	0.00	173.84	173.84	27.53	34.56	0.705	173.13	1.00	1.00
140	12-Mar	0.00	0.00	0.00	5.00	3.4	0.50	1.68	0.00	173.13	173.13	27.47	34.84	1.674	171.46	1.00	1.00

Tabla 32 - Simulación completa para soja con una política igual al 40% de la humedad aprovechable

15.3 Anexo 3 – Modelo de Temez

En la tabla siguiente se aprecia el cálculo del modelo de Temez mes a mes, en el período 1981-2015.

AÑO	MES	Días (t)	P (mm)	ETP (mm)	Po (mm)	δ (mm)	T (mm)	ETR (mm)	H (mm)	I (mm)	V	Asub (mm)	Asup (mm)	Atotal (mm)	V (Hm3)
<i>Dato inicial</i>									0		0				
1981	ENE	31	199	199.00	36.87	321.91	58.78	140.22	0.00	51.01	15.35	35.67	7.77	43.44	0.037
1981	FEB	28	106.5	106.50	36.87	229.41	18.49	88.01	0.00	17.65	7.71	25.28	0.85	26.12	0.022
1981	MAR	31	17	17.00	36.87	139.91	0.00	17.00	0.00	0.00	0.70	7.02	0.00	7.02	0.006
1981	ABR	30	108.5	108.50	36.87	231.41	19.27	89.23	0.00	18.36	5.81	13.25	0.92	14.16	0.012
1981	MAY	31	308.2	308.20	36.87	431.11	110.61	197.59	0.00	85.97	26.39	65.39	24.64	90.03	0.077
1981	JUN	30	25	25.00	36.87	147.91	0.00	25.00	0.00	0.00	2.58	23.81	0.00	23.81	0.020
1981	JUL	31	62.5	62.50	36.87	185.41	3.77	58.73	0.00	3.73	1.36	4.96	0.04	4.99	0.004
1981	AGO	31	78	78.00	36.87	200.91	8.24	69.76	0.00	8.07	2.55	6.88	0.17	7.05	0.006
1981	SEP	30	66	66.00	36.87	188.91	4.68	61.32	0.00	4.63	1.70	5.48	0.06	5.54	0.005
1981	OCT	31	17.5	17.50	36.87	140.41	0.00	17.50	0.00	0.00	0.15	1.54	0.00	1.54	0.001
1981	NOV	30	32.6	32.60	36.87	155.51	0.00	32.60	0.00	0.00	0.02	0.14	0.00	0.14	0.000
1981	DIC	31	72.5	72.50	36.87	195.41	6.54	65.96	0.00	6.43	1.93	4.51	0.11	4.62	0.004
1982	ENE	31	44	44.00	36.87	166.91	0.37	43.63	0.00	0.37	0.29	2.02	0.00	2.02	0.002
1982	FEB	28	125.5	125.50	36.87	248.41	26.17	99.33	0.00	24.51	8.31	16.48	1.66	18.14	0.016

1982	MAR	31	108.3	108.30	36.87	231.21	19.20	89.10	0.00	18.29	6.25	20.35	0.91	21.26	0.018
1982	ABR	30	59	59.00	36.87	181.91	2.93	56.07	0.00	2.91	1.52	7.64	0.02	7.66	0.007
1982	MAY	31	134.4	134.40	36.87	257.31	29.91	104.49	0.00	27.76	8.49	20.79	2.15	22.94	0.020
1982	JUN	30	118.1	118.10	36.87	241.01	23.12	94.98	0.00	21.81	7.65	22.65	1.31	23.96	0.021
1982	JUL	31	89.4	89.40	36.87	212.31	12.10	77.30	0.00	11.73	4.22	15.16	0.37	15.53	0.013
1982	AGO	31	94.4	94.40	36.87	217.31	13.91	80.49	0.00	13.42	4.42	13.23	0.48	13.71	0.012
1982	SEP	30	101.8	101.80	36.87	224.71	16.68	85.12	0.00	15.99	5.43	14.97	0.69	15.67	0.013
1982	OCT	31	116	116.00	36.87	238.91	22.27	93.73	0.00	21.05	6.82	19.66	1.21	20.87	0.018
1982	NOV	30	0	0.00	36.87	122.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.67	6.16	0.00	6.16	0.005
1982	DIC	31	40.5	40.50	36.87	163.41	0.10	40.40	0.00	0.10	0.09	0.68	0.00	0.68	0.001
1983	ENE	31	119.5	119.50	36.87	242.41	23.69	95.81	0.00	22.32	6.72	15.69	1.37	17.06	0.015
1983	FEB	28	249	249.00	36.87	371.91	82.24	166.76	0.00	67.79	23.68	50.84	14.44	65.28	0.056
1983	MAR	31	69.5	69.50	36.87	192.41	5.66	63.84	0.00	5.58	3.82	25.43	0.08	25.51	0.022
1983	ABR	30	136.2	136.20	36.87	259.11	30.68	105.52	0.00	28.42	9.26	22.98	2.26	25.24	0.022
1983	MAY	31	43.2	43.20	36.87	166.11	0.30	42.90	0.00	0.29	0.93	8.63	0.00	8.63	0.007
1983	JUN	30	30.5	30.50	36.87	153.41	0.00	30.50	0.00	0.00	0.09	0.84	0.00	0.84	0.001
1983	JUL	31	25	25.00	36.87	147.91	0.00	25.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.08	0.000
1983	AGO	31	235.5	235.50	36.87	358.41	75.85	159.65	0.00	63.39	19.07	44.33	12.46	56.78	0.049
1983	SEP	30	125.5	125.50	36.87	248.41	26.17	99.33	0.00	24.51	9.53	34.05	1.66	35.71	0.031
1983	OCT	31	104.5	104.50	36.87	227.41	17.71	86.79	0.00	16.94	5.96	20.51	0.78	21.28	0.018
1983	NOV	30	48.2	48.20	36.87	171.11	0.88	47.32	0.00	0.88	0.86	5.98	0.00	5.98	0.005
1983	DIC	31	82.5	82.50	36.87	205.41	9.72	72.78	0.00	9.48	2.93	7.41	0.24	7.65	0.007
1984	ENE	31	282.5	282.50	36.87	405.41	98.23	184.27	0.00	78.31	23.82	57.41	19.93	77.34	0.066
1984	FEB	29	647.5	647.50	36.87	770.41	277.39	370.11	0.00	161.40	54.98	130.24	115.99	246.23	0.211
1984	MAR	31	99	99.00	36.87	221.91	15.62	83.38	0.00	15.01	9.49	60.50	0.61	61.11	0.052
1984	ABR	30	66	66.00	36.87	188.91	4.68	61.32	0.00	4.63	2.37	11.74	0.06	11.80	0.010
1984	MAY	31	106	106.00	36.87	228.91	18.30	87.70	0.00	17.47	5.47	14.37	0.83	15.20	0.013
1984	JUN	30	76	76.00	36.87	198.91	7.61	68.39	0.00	7.46	2.87	10.06	0.15	10.21	0.009

1984	JUL	31	107	107.00	36.87	229.91	18.69	88.31	0.00	17.82	5.62	15.07	0.86	15.93	0.014
1984	AGO	31	8.5	8.50	36.87	131.41	0.00	8.50	0.00	0.00	0.51	5.11	0.00	5.11	0.004
1984	SEP	30	121.5	121.50	36.87	244.41	24.51	96.99	0.00	23.05	7.26	16.30	1.46	17.76	0.015
1984	OCT	31	296.5	296.50	36.87	419.41	104.97	191.53	0.00	82.52	25.48	64.30	22.44	86.74	0.074
1984	NOV	30	139.8	139.80	36.87	262.71	32.22	107.58	0.00	29.74	11.79	43.43	2.48	45.91	0.039
1984	DIC	31	49	49.00	36.87	171.91	1.00	48.00	0.00	1.00	1.37	11.42	0.00	11.42	0.010
1985	ENE	31	141	141.00	36.87	263.91	32.74	108.26	0.00	30.18	9.20	22.34	2.56	24.90	0.021
1985	FEB	28	78	78.00	36.87	200.91	8.24	69.76	0.00	8.07	3.78	13.50	0.17	13.67	0.012
1985	MAR	31	132.5	132.50	36.87	255.41	29.11	103.39	0.00	27.07	8.48	22.36	2.04	24.40	0.021
1985	ABR	30	177.5	177.50	36.87	300.41	48.93	128.57	0.00	43.42	14.41	37.50	5.50	43.00	0.037
1985	MAY	31	232	232.00	36.87	354.91	74.19	157.81	0.00	62.23	20.02	56.62	11.96	68.58	0.059
1985	JUN	30	147	147.00	36.87	269.91	35.34	111.66	0.00	32.38	12.08	40.32	2.96	43.28	0.037
1985	JUL	31	65	65.00	36.87	187.91	4.42	60.58	0.00	4.37	2.41	14.04	0.05	14.09	0.012
1985	AGO	31	63.6	63.60	36.87	186.51	4.05	59.55	0.00	4.01	1.42	4.99	0.04	5.03	0.004
1985	SEP	30	91.5	91.50	36.87	214.41	12.85	78.65	0.00	12.44	4.03	9.83	0.41	10.25	0.009
1985	OCT	31	302.5	302.50	36.87	425.41	107.86	194.64	0.00	84.30	25.72	62.61	23.56	86.16	0.074
1985	NOV	30	84	84.00	36.87	206.91	10.23	73.77	0.00	9.96	5.63	30.06	0.26	30.32	0.026
1985	DIC	31	96	96.00	36.87	218.91	14.50	81.50	0.00	13.97	4.71	14.89	0.52	15.41	0.013
1986	ENE	31	188.5	188.50	36.87	311.41	53.95	134.55	0.00	47.33	14.66	37.38	6.62	43.99	0.038
1986	FEB	28	70	70.00	36.87	192.91	5.80	64.20	0.00	5.71	3.61	16.77	0.09	16.86	0.014
1986	MAR	31	147.5	147.50	36.87	270.41	35.56	111.94	0.00	32.56	10.12	26.04	3.00	29.04	0.025
1986	ABR	30	134	134.00	36.87	256.91	29.74	104.26	0.00	27.61	9.62	28.11	2.13	30.24	0.026
1986	MAY	31	77	77.00	36.87	199.91	7.92	69.08	0.00	7.77	3.21	14.18	0.16	14.34	0.012
1986	JUN	30	86.5	86.50	36.87	209.41	11.08	75.42	0.00	10.78	3.68	10.30	0.31	10.61	0.009
1986	JUL	31	46.5	46.50	36.87	169.41	0.65	45.85	0.00	0.65	0.53	3.80	0.00	3.81	0.003
1986	AGO	31	310	310.00	36.87	432.91	111.48	198.52	0.00	86.50	26.07	60.96	24.98	85.94	0.074
1986	SEP	30	98	98.00	36.87	220.91	15.24	82.76	0.00	14.66	7.13	33.60	0.58	34.17	0.029
1986	OCT	31	236.5	236.50	36.87	359.41	76.32	160.18	0.00	63.72	19.81	51.04	12.60	63.64	0.054

1986	NOV	30	280.5	280.50	36.87	403.41	97.27	183.23	0.00	77.69	26.23	71.28	19.58	90.85	0.078
1986	DIC	31	44	44.00	36.87	166.91	0.37	43.63	0.00	0.37	2.49	24.12	0.00	24.12	0.021
1987	ENE	31	113	113.00	36.87	235.91	21.06	91.94	0.00	19.97	6.23	16.22	1.09	17.31	0.015
1987	FEB	28	137	137.00	36.87	259.91	31.02	105.98	0.00	28.71	10.41	24.53	2.31	26.84	0.023
1987	MAR	31	196	196.00	36.87	318.91	57.40	138.60	0.00	49.97	15.97	44.41	7.43	51.84	0.044
1987	ABR	30	113	113.00	36.87	235.91	21.06	91.94	0.00	19.97	7.81	28.14	1.09	29.23	0.025
1987	MAY	31	19.5	19.50	36.87	142.41	0.00	19.50	0.00	0.00	0.71	7.10	0.00	7.10	0.006
1987	JUN	30	0	0.00	36.87	122.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.64	0.00	0.64	0.001
1987	JUL	31	171	171.00	36.87	293.91	45.99	125.01	0.00	41.09	12.37	28.79	4.90	33.69	0.029
1987	AGO	31	127.5	127.50	36.87	250.41	27.00	100.50	0.00	25.24	8.71	28.89	1.77	30.66	0.026
1987	SEP	30	61.5	61.50	36.87	184.41	3.52	57.98	0.00	3.49	1.94	10.26	0.03	10.29	0.009
1987	OCT	31	106.5	106.50	36.87	229.41	18.49	88.01	0.00	17.65	5.48	14.10	0.85	14.95	0.013
1987	NOV	30	102	102.00	36.87	224.91	16.75	85.25	0.00	16.06	5.56	15.98	0.70	16.68	0.014
1987	DIC	31	170	170.00	36.87	292.91	45.54	124.46	0.00	40.73	12.76	33.53	4.81	38.34	0.033
1988	ENE	31	95.5	95.50	36.87	218.41	14.31	81.19	0.00	13.80	5.31	21.25	0.51	21.76	0.019
1988	FEB	29	143	143.00	36.87	265.91	33.60	109.40	0.00	30.91	10.61	25.61	2.69	28.30	0.024
1988	MAR	31	318.5	318.50	36.87	441.41	115.59	202.91	0.00	88.95	27.72	71.84	26.64	98.48	0.084
1988	ABR	30	24.5	24.50	36.87	147.41	0.00	24.50	0.00	0.00	2.71	25.01	0.00	25.01	0.021
1988	MAY	31	1	1.00	36.87	123.91	0.00	1.00	0.00	0.00	0.25	2.47	0.00	2.47	0.002
1988	JUN	30	17	17.00	36.87	139.91	0.00	17.00	0.00	0.00	0.02	0.22	0.00	0.22	0.000
1988	JUL	31	42	42.00	36.87	164.91	0.20	41.80	0.00	0.20	0.06	0.16	0.00	0.16	0.000
1988	AGO	31	27	27.00	36.87	149.91	0.00	27.00	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.06	0.000
1988	SEP	30	54	54.00	36.87	176.91	1.87	52.13	0.00	1.86	0.58	1.28	0.01	1.29	0.001
1988	OCT	31	88.5	88.50	36.87	211.41	11.78	76.72	0.00	11.44	3.49	8.52	0.35	8.87	0.008
1988	NOV	30	64.5	64.50	36.87	187.41	4.28	60.22	0.00	4.24	1.67	6.06	0.05	6.11	0.005
1988	DIC	31	97.5	97.50	36.87	220.41	15.05	82.45	0.00	14.49	4.51	11.65	0.57	12.21	0.010
1989	ENE	31	29.5	29.50	36.87	152.41	0.00	29.50	0.00	0.00	0.41	4.10	0.00	4.10	0.004
1989	FEB	28	152	152.00	36.87	274.91	37.53	114.47	0.00	34.20	11.60	23.01	3.33	26.33	0.023

1989	MAR	31	78.5	78.50	36.87	201.41	8.40	70.10	0.00	8.23	3.52	16.30	0.18	16.48	0.014
1989	ABR	30	82	82.00	36.87	204.91	9.55	72.45	0.00	9.32	3.26	9.59	0.23	9.82	0.008
1989	MAY	31	20.5	20.50	36.87	143.41	0.00	20.50	0.00	0.00	0.29	2.96	0.00	2.96	0.003
1989	JUN	30	34.5	34.50	36.87	157.41	0.00	34.50	0.00	0.00	0.03	0.27	0.00	0.27	0.000
1989	JUL	31	42	42.00	36.87	164.91	0.20	41.80	0.00	0.20	0.06	0.16	0.00	0.16	0.000
1989	AGO	31	94	94.00	36.87	216.91	13.76	80.24	0.00	13.29	4.00	9.35	0.47	9.82	0.008
1989	SEP	30	59.5	59.50	36.87	182.41	3.04	56.46	0.00	3.02	1.34	5.69	0.02	5.71	0.005
1989	OCT	31	23.5	23.50	36.87	146.41	0.00	23.50	0.00	0.00	0.12	1.21	0.00	1.21	0.001
1989	NOV	30	111	111.00	36.87	233.91	20.26	90.74	0.00	19.25	6.03	13.34	1.01	14.35	0.012
1989	DIC	31	74	74.00	36.87	196.91	6.99	67.01	0.00	6.87	2.61	10.29	0.12	10.41	0.009
1990	ENE	31	181	181.00	36.87	303.91	50.52	130.48	0.00	44.67	13.67	33.61	5.85	39.46	0.034
1990	FEB	28	154.5	154.50	36.87	277.41	38.63	115.87	0.00	35.12	13.43	35.36	3.51	38.88	0.033
1990	MAR	31	179.6	179.60	36.87	302.51	49.88	129.72	0.00	44.17	14.50	43.10	5.71	48.81	0.042
1990	ABR	30	174.5	174.50	36.87	297.41	47.57	126.93	0.00	42.35	14.66	42.19	5.22	47.41	0.041
1990	MAY	31	56	56.00	36.87	178.91	2.27	53.73	0.00	2.26	2.01	14.91	0.01	14.93	0.013
1990	JUN	30	0	0.00	36.87	122.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	1.81	0.00	1.81	0.002
1990	JUL	31	33	33.00	36.87	155.91	0.00	33.00	0.00	0.00	0.02	0.18	0.00	0.18	0.000
1990	AGO	31	17	17.00	36.87	139.91	0.00	17.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.000
1990	SEP	30	33	33.00	36.87	155.91	0.00	33.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
1990	OCT	31	209	209.00	36.87	331.91	63.42	145.58	0.00	54.47	16.39	38.08	8.95	47.03	0.040
1990	NOV	30	155	155.00	36.87	277.91	38.85	116.15	0.00	35.30	12.64	39.04	3.55	42.60	0.036
1990	DIC	31	110.5	110.50	36.87	233.41	20.06	90.44	0.00	19.07	6.88	24.83	0.99	25.82	0.022
1991	ENE	31	154	154.00	36.87	276.91	38.41	115.59	0.00	34.93	11.13	30.68	3.48	34.16	0.029
1991	FEB	28	29.5	29.50	36.87	152.41	0.00	29.50	0.00	0.00	1.27	9.86	0.00	9.86	0.008
1991	MAR	31	33.5	33.50	36.87	156.41	0.00	33.50	0.00	0.00	0.12	1.16	0.00	1.16	0.001
1991	ABR	30	135	135.00	36.87	257.91	30.17	104.83	0.00	27.98	8.76	19.34	2.19	21.52	0.018
1991	MAY	31	109	109.00	36.87	231.91	19.47	89.53	0.00	18.54	6.37	20.93	0.94	21.86	0.019
1991	JUN	30	174	174.00	36.87	296.91	47.34	126.66	0.00	42.17	13.81	34.73	5.17	39.90	0.034

1991	JUL	31	121.5	121.50	36.87	244.41	24.51	96.99	0.00	23.05	8.18	28.68	1.46	30.14	0.026
1991	AGO	31	53.5	53.50	36.87	176.41	1.77	51.73	0.00	1.76	1.27	8.67	0.01	8.68	0.007
1991	SEP	30	88	88.00	36.87	210.91	11.61	76.39	0.00	11.27	3.65	8.89	0.34	9.23	0.008
1991	OCT	31	189	189.00	36.87	311.91	54.18	134.82	0.00	47.51	14.62	36.53	6.67	43.20	0.037
1991	NOV	30	81	81.00	36.87	203.91	9.22	71.78	0.00	9.01	4.25	19.38	0.22	19.60	0.017
1991	DIC	31	277	277.00	36.87	399.91	95.60	181.40	0.00	76.62	23.43	57.43	18.98	76.41	0.065
1992	ENE	31	128	128.00	36.87	250.91	27.21	100.79	0.00	25.42	9.77	39.09	1.79	40.88	0.035
1992	FEB	29	125	125.00	36.87	247.91	25.96	99.04	0.00	24.32	8.94	25.15	1.64	26.79	0.023
1992	MAR	31	73	73.00	36.87	195.91	6.69	66.31	0.00	6.57	2.79	12.73	0.11	12.84	0.011
1992	ABR	30	139.5	139.50	36.87	262.41	32.09	107.41	0.00	29.63	9.54	22.88	2.46	25.34	0.022
1992	MAY	31	36.5	36.50	36.87	159.41	0.00	36.50	0.00	0.00	0.86	8.67	0.00	8.67	0.007
1992	JUN	30	129.5	129.50	36.87	252.41	27.84	101.66	0.00	25.97	8.20	18.63	1.87	20.50	0.018
1992	JUL	31	56	56.00	36.87	178.91	2.27	53.73	0.00	2.26	1.42	9.04	0.01	9.05	0.008
1992	AGO	31	111	111.00	36.87	233.91	20.26	90.74	0.00	19.25	5.92	14.75	1.01	15.76	0.013
1992	SEP	30	48	48.00	36.87	170.91	0.85	47.15	0.00	0.85	0.84	5.93	0.00	5.93	0.005
1992	OCT	31	114.5	114.50	36.87	237.41	21.66	92.84	0.00	20.51	6.25	15.11	1.15	16.26	0.014
1992	NOV	30	128	128.00	36.87	250.91	27.21	100.79	0.00	25.42	8.56	23.11	1.79	24.90	0.021
1992	DIC	31	54	54.00	36.87	176.91	1.87	52.13	0.00	1.86	1.33	9.08	0.01	9.09	0.008
1993	ENE	31	141.5	141.50	36.87	264.41	32.95	108.55	0.00	30.36	9.25	22.44	2.59	25.03	0.021
1993	FEB	28	130	130.00	36.87	252.91	28.05	101.95	0.00	26.15	9.89	25.51	1.90	27.41	0.023
1993	MAR	31	137	137.00	36.87	259.91	31.02	105.98	0.00	28.71	9.53	29.07	2.31	31.38	0.027
1993	ABR	30	204.5	204.50	36.87	327.41	61.33	143.17	0.00	52.92	17.48	44.97	8.41	53.38	0.046
1993	MAY	31	118	118.00	36.87	240.91	23.08	94.92	0.00	21.78	8.13	31.12	1.30	32.43	0.028
1993	JUN	30	64	64.00	36.87	186.91	4.15	59.85	0.00	4.11	2.08	10.16	0.04	10.21	0.009
1993	JUL	31	40	40.00	36.87	162.91	0.08	39.92	0.00	0.08	0.21	1.94	0.00	1.94	0.002
1993	AGO	31	73	73.00	36.87	195.91	6.69	66.31	0.00	6.57	2.00	4.79	0.11	4.90	0.004
1993	SEP	30	27	27.00	36.87	149.91	0.00	27.00	0.00	0.00	0.20	1.80	0.00	1.80	0.002
1993	OCT	31	175	175.00	36.87	297.91	47.80	127.20	0.00	42.53	12.81	29.91	5.27	35.18	0.030

1993	NOV	30	257	257.00	36.87	379.91	86.04	170.96	0.00	70.36	23.25	59.92	15.68	75.60	0.065
1993	DIC	31	244.5	244.50	36.87	367.41	80.10	164.40	0.00	66.34	22.06	67.53	13.77	81.30	0.070
1994	ENE	31	60.5	60.50	36.87	183.41	3.28	57.22	0.00	3.25	2.97	22.34	0.03	22.36	0.019
1994	FEB	28	86	86.00	36.87	208.91	10.91	75.09	0.00	10.61	3.93	9.66	0.30	9.96	0.009
1994	MAR	31	128	128.00	36.87	250.91	27.21	100.79	0.00	25.42	8.00	21.34	1.79	23.13	0.020
1994	ABR	30	112	112.00	36.87	234.91	20.66	91.34	0.00	19.61	6.91	20.70	1.05	21.75	0.019
1994	MAY	31	114	114.00	36.87	236.91	21.46	92.54	0.00	20.33	6.74	20.50	1.13	21.63	0.019
1994	JUN	30	10	10.00	36.87	132.91	0.00	10.00	0.00	0.00	0.66	6.08	0.00	6.08	0.005
1994	JUL	31	24.5	24.50	36.87	147.41	0.00	24.50	0.00	0.00	0.06	0.60	0.00	0.60	0.001
1994	AGO	31	24	24.00	36.87	146.91	0.00	24.00	0.00	0.00	0.01	0.05	0.00	0.05	0.000
1994	SEP	30	71	71.00	36.87	193.91	6.09	64.91	0.00	6.00	1.88	4.13	0.09	4.22	0.004
1994	OCT	31	112.5	112.50	36.87	235.41	20.86	91.64	0.00	19.79	6.12	15.54	1.07	16.61	0.014
1994	NOV	30	26	26.00	36.87	148.91	0.00	26.00	0.00	0.00	0.60	5.52	0.00	5.52	0.005
1994	DIC	31	160	160.00	36.87	282.91	41.07	118.93	0.00	37.12	11.22	26.50	3.95	30.44	0.026
1995	ENE	31	90	90.00	36.87	212.91	12.32	77.68	0.00	11.93	4.61	18.55	0.38	18.93	0.016
1995	FEB	28	44	44.00	36.87	166.91	0.37	43.63	0.00	0.37	0.65	4.32	0.00	4.32	0.004
1995	MAR	31	222.5	222.50	36.87	345.41	69.73	152.77	0.00	59.06	17.82	41.88	10.67	52.55	0.045
1995	ABR	30	95	95.00	36.87	217.91	14.13	80.87	0.00	13.63	6.00	25.45	0.50	25.95	0.022
1995	MAY	31	16	16.00	36.87	138.91	0.00	16.00	0.00	0.00	0.54	5.46	0.00	5.46	0.005
1995	JUN	30	37	37.00	36.87	159.91	0.00	37.00	0.00	0.00	0.05	0.49	0.00	0.49	0.000
1995	JUL	31	17.5	17.50	36.87	140.41	0.00	17.50	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.05	0.000
1995	AGO	31	0	0.00	36.87	122.91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
1995	SEP	30	33	33.00	36.87	155.91	0.00	33.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
1995	OCT	31	151.5	151.50	36.87	274.41	37.31	114.19	0.00	34.02	10.23	23.79	3.29	27.08	0.023
1995	NOV	30	176	176.00	36.87	298.91	48.25	127.75	0.00	42.89	14.41	38.71	5.36	44.07	0.038
1995	DIC	31	75	75.00	36.87	197.91	7.30	67.70	0.00	7.16	3.46	18.12	0.14	18.25	0.016
1996	ENE	31	95	95.00	36.87	217.91	14.13	80.87	0.00	13.63	4.41	12.67	0.50	13.17	0.011
1996	FEB	29	102	102.00	36.87	224.91	16.75	85.25	0.00	16.06	5.69	14.78	0.70	15.48	0.013

1996	MAR	31	58.2	58.20	36.87	181.11	2.75	55.45	0.00	2.73	1.33	7.08	0.02	7.10	0.006
1996	ABR	30	106	106.00	36.87	228.91	18.30	87.70	0.00	17.47	5.59	13.21	0.83	14.04	0.012
1996	MAY	31	39	39.00	36.87	161.91	0.04	38.96	0.00	0.04	0.52	5.11	0.00	5.11	0.004
1996	JUN	30	58.5	58.50	36.87	181.41	2.81	55.69	0.00	2.79	0.92	2.39	0.02	2.41	0.002
1996	JUL	31	29.5	29.50	36.87	152.41	0.00	29.50	0.00	0.00	0.08	0.84	0.00	0.84	0.001
1996	AGO	31	26.5	26.50	36.87	149.41	0.00	26.50	0.00	0.00	0.01	0.08	0.00	0.08	0.000
1996	SEP	30	110	110.00	36.87	232.91	19.87	90.13	0.00	18.89	5.91	12.99	0.97	13.96	0.012
1996	OCT	31	27.5	27.50	36.87	150.41	0.00	27.50	0.00	0.00	0.53	5.37	0.00	5.37	0.005
1996	NOV	30	110	110.00	36.87	232.91	19.87	90.13	0.00	18.89	5.96	13.47	0.97	14.44	0.012
1996	DIC	31	171.5	171.50	36.87	294.41	46.22	125.28	0.00	41.27	12.96	34.28	4.94	39.22	0.034
1997	ENE	31	134	134.00	36.87	256.91	29.74	104.26	0.00	27.61	9.48	31.09	2.13	33.22	0.028
1997	FEB	28	64.5	64.50	36.87	187.41	4.28	60.22	0.00	4.24	2.51	11.20	0.05	11.25	0.010
1997	MAR	31	70	70.00	36.87	192.91	5.80	64.20	0.00	5.71	1.95	6.28	0.09	6.37	0.005
1997	ABR	30	68.5	68.50	36.87	191.41	5.37	63.13	0.00	5.30	1.85	5.40	0.07	5.47	0.005
1997	MAY	31	107	107.00	36.87	229.91	18.69	88.31	0.00	17.82	5.53	14.14	0.86	15.00	0.013
1997	JUN	30	76	76.00	36.87	198.91	7.61	68.39	0.00	7.46	2.87	10.12	0.15	10.26	0.009
1997	JUL	31	23.5	23.50	36.87	146.41	0.00	23.50	0.00	0.00	0.26	2.61	0.00	2.61	0.002
1997	AGO	31	72	72.00	36.87	194.91	6.39	65.61	0.00	6.28	1.91	4.63	0.10	4.73	0.004
1997	SEP	30	34	34.00	36.87	156.91	0.00	34.00	0.00	0.00	0.19	1.73	0.00	1.73	0.001
1997	OCT	31	152	152.00	36.87	274.91	37.53	114.47	0.00	34.20	10.31	24.08	3.33	27.41	0.023
1997	NOV	30	187	187.00	36.87	309.91	53.26	133.74	0.00	46.80	15.64	41.47	6.46	47.92	0.041
1997	DIC	31	237	237.00	36.87	359.91	76.55	160.45	0.00	63.88	20.63	58.89	12.67	71.56	0.061
1998	ENE	31	257.5	257.50	36.87	380.41	86.28	171.22	0.00	70.52	23.08	68.07	15.76	83.83	0.072
1998	FEB	28	106.5	106.50	36.87	229.41	18.49	88.01	0.00	17.65	8.60	32.13	0.85	32.97	0.028
1998	MAR	31	142.5	142.50	36.87	265.41	33.39	109.11	0.00	30.73	10.02	29.30	2.66	31.96	0.027
1998	ABR	30	101	101.00	36.87	223.91	16.37	84.63	0.00	15.71	5.89	19.84	0.67	20.50	0.018
1998	MAY	31	64.5	64.50	36.87	187.41	4.28	60.22	0.00	4.24	1.81	8.32	0.05	8.37	0.007
1998	JUN	30	13	13.00	36.87	135.91	0.00	13.00	0.00	0.00	0.18	1.63	0.00	1.63	0.001

1998	JUL	31	153.3	153.30	36.87	276.21	38.10	115.20	0.00	34.68	10.45	24.41	3.42	27.83	0.024
1998	AGO	31	89	89.00	36.87	211.91	11.96	77.04	0.00	11.60	4.44	17.61	0.36	17.97	0.015
1998	SEP	30	61	61.00	36.87	183.91	3.40	57.60	0.00	3.37	1.49	6.32	0.03	6.35	0.005
1998	OCT	31	65	65.00	36.87	187.91	4.42	60.58	0.00	4.37	1.45	4.41	0.05	4.46	0.004
1998	NOV	30	123	123.00	36.87	245.91	25.13	97.87	0.00	23.59	7.52	17.52	1.54	19.06	0.016
1998	DIC	31	168	168.00	36.87	290.91	44.64	123.36	0.00	40.01	12.72	34.82	4.63	39.44	0.034
1999	ENE	31	170	170.00	36.87	292.91	45.54	124.46	0.00	40.73	13.40	40.05	4.81	44.85	0.038
1999	FEB	28	200.4	200.40	36.87	323.31	59.43	140.97	0.00	51.50	18.93	45.97	7.93	53.90	0.046
1999	MAR	31	188	188.00	36.87	310.91	53.72	134.28	0.00	47.16	15.90	50.19	6.56	56.75	0.049
1999	ABR	30	53	53.00	36.87	175.91	1.68	51.32	0.00	1.67	2.08	15.49	0.01	15.50	0.013
1999	MAY	31	41.5	41.50	36.87	164.41	0.16	41.34	0.00	0.16	0.24	2.00	0.00	2.00	0.002
1999	JUN	30	50	50.00	36.87	172.91	1.15	48.85	0.00	1.15	0.38	1.00	0.00	1.01	0.001
1999	JUL	31	86.3	86.30	36.87	209.21	11.02	75.28	0.00	10.71	3.26	7.84	0.31	8.14	0.007
1999	AGO	31	56	56.00	36.87	178.91	2.27	53.73	0.00	2.26	0.97	4.54	0.01	4.55	0.004
1999	SEP	30	16	16.00	36.87	138.91	0.00	16.00	0.00	0.00	0.10	0.88	0.00	0.88	0.001
1999	OCT	31	5	5.00	36.87	127.91	0.00	5.00	0.00	0.00	0.01	0.09	0.00	0.09	0.000
1999	NOV	30	15	15.00	36.87	137.91	0.00	15.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.000
1999	DIC	31	53	53.00	36.87	175.91	1.68	51.32	0.00	1.67	0.50	1.17	0.01	1.17	0.001
2000	ENE	31	29.5	29.50	36.87	152.41	0.00	29.50	0.00	0.00	0.05	0.46	0.00	0.46	0.000
2000	FEB	29	107.5	107.50	36.87	230.41	18.88	88.62	0.00	18.00	5.86	12.19	0.88	13.07	0.011
2000	MAR	31	82.5	82.50	36.87	205.41	9.72	72.78	0.00	9.48	3.38	11.96	0.24	12.19	0.010
2000	ABR	30	158.5	158.50	36.87	281.41	40.40	118.10	0.00	36.57	11.77	28.19	3.83	32.01	0.027
2000	MAY	31	287.3	287.30	36.87	410.21	100.54	186.76	0.00	79.76	25.06	66.47	20.78	87.25	0.075
2000	JUN	30	57.6	57.60	36.87	180.51	2.61	54.99	0.00	2.60	3.26	24.39	0.02	24.41	0.021
2000	JUL	31	96.8	96.80	36.87	219.71	14.79	82.01	0.00	14.25	4.58	12.93	0.55	13.47	0.012
2000	AGO	31	57	57.00	36.87	179.91	2.48	54.52	0.00	2.47	1.16	5.89	0.02	5.91	0.005
2000	SEP	30	196	196.00	36.87	318.91	57.40	138.60	0.00	49.97	15.74	35.38	7.43	42.81	0.037
2000	OCT	31	147	147.00	36.87	269.91	35.34	111.66	0.00	32.38	11.16	36.95	2.96	39.91	0.034

2000	NOV	30	153	153.00	36.87	275.91	37.97	115.03	0.00	34.57	11.90	33.83	3.40	37.23	0.032
2000	DIC	31	65	65.00	36.87	187.91	4.42	60.58	0.00	4.37	2.39	13.88	0.05	13.93	0.012
2001	ENE	31	198	198.00	36.87	320.91	58.32	139.68	0.00	50.66	15.46	37.60	7.65	45.25	0.039
2001	FEB	28	70	70.00	36.87	192.91	5.80	64.20	0.00	5.71	3.70	17.48	0.09	17.56	0.015
2001	MAR	31	174	174.00	36.87	296.91	47.34	126.66	0.00	42.17	13.02	32.85	5.17	38.02	0.033
2001	ABR	30	86.2	86.20	36.87	209.11	10.98	75.22	0.00	10.68	4.61	19.09	0.30	19.39	0.017
2001	MAY	31	71.5	71.50	36.87	194.41	6.24	65.26	0.00	6.14	2.26	8.49	0.10	8.59	0.007
2001	JUN	30	109.5	109.50	36.87	232.41	19.67	89.83	0.00	18.72	6.07	14.91	0.95	15.86	0.014
2001	JUL	31	45	45.00	36.87	167.91	0.47	44.53	0.00	0.47	0.69	5.86	0.00	5.86	0.005
2001	AGO	31	208.5	208.50	36.87	331.41	63.19	145.31	0.00	54.30	16.40	38.59	8.89	47.48	0.041
2001	SEP	30	87.2	87.20	36.87	210.11	11.33	75.87	0.00	11.01	5.04	22.36	0.32	22.68	0.019
2001	OCT	31	221	221.00	36.87	343.91	69.02	151.98	0.00	58.55	18.07	45.53	10.47	56.00	0.048
2001	NOV	30	112	112.00	36.87	234.91	20.66	91.34	0.00	19.61	7.90	29.78	1.05	30.83	0.026
2001	DIC	31	118	118.00	36.87	240.91	23.08	94.92	0.00	21.78	7.27	22.41	1.30	23.71	0.020
2002	ENE	31	165	165.00	36.87	287.91	43.30	121.70	0.00	38.93	12.37	33.83	4.37	38.19	0.033
2002	FEB	28	74.5	74.50	36.87	197.41	7.14	67.36	0.00	7.01	3.78	15.60	0.13	15.73	0.013
2002	MAR	31	408.5	408.50	36.87	531.41	159.44	249.06	0.00	112.84	34.29	82.33	46.61	128.94	0.110
2002	ABR	30	200.5	200.50	36.87	323.41	59.47	141.03	0.00	51.53	19.47	66.35	7.94	74.29	0.064
2002	MAY	31	120.2	120.20	36.87	243.11	23.98	96.22	0.00	22.58	8.55	33.49	1.40	34.89	0.030
2002	JUN	30	26	26.00	36.87	148.91	0.00	26.00	0.00	0.00	0.84	7.72	0.00	7.72	0.007
2002	JUL	31	79.2	79.20	36.87	202.11	8.63	70.57	0.00	8.44	2.62	6.66	0.19	6.85	0.006
2002	AGO	31	38	38.00	36.87	160.91	0.01	37.99	0.00	0.01	0.24	2.39	0.00	2.39	0.002
2002	SEP	30	110	110.00	36.87	232.91	19.87	90.13	0.00	18.89	5.93	13.20	0.97	14.17	0.012
2002	OCT	31	144.5	144.50	36.87	267.41	34.25	110.25	0.00	31.46	10.00	27.39	2.79	30.18	0.026
2002	NOV	30	113	113.00	36.87	235.91	21.06	91.94	0.00	19.97	7.22	22.75	1.09	23.84	0.020
2002	DIC	31	169.5	169.50	36.87	292.41	45.31	124.19	0.00	40.55	12.85	34.92	4.76	39.68	0.034
2003	ENE	31	65	65.00	36.87	187.91	4.42	60.58	0.00	4.37	2.48	14.74	0.05	14.79	0.013
2003	FEB	28	145.5	145.50	36.87	268.41	34.69	110.81	0.00	31.83	11.04	23.27	2.86	26.13	0.022

2003	MAR	31	183.7	183.70	36.87	306.61	51.75	131.95	0.00	45.63	14.73	41.94	6.12	48.06	0.041
2003	ABR	30	95	95.00	36.87	217.91	14.13	80.87	0.00	13.63	5.70	22.65	0.50	23.15	0.020
2003	MAY	31	121.5	121.50	36.87	244.41	24.51	96.99	0.00	23.05	7.45	21.30	1.46	22.76	0.019
2003	JUN	30	64.5	64.50	36.87	187.41	4.28	60.22	0.00	4.24	2.05	9.63	0.05	9.68	0.008
2003	JUL	31	44.6	44.60	36.87	167.51	0.43	44.17	0.00	0.43	0.32	2.17	0.00	2.17	0.002
2003	AGO	31	123.5	123.50	36.87	246.41	25.34	98.16	0.00	23.78	7.18	16.91	1.56	18.47	0.016
2003	SEP	30	154.2	154.20	36.87	277.11	38.50	115.70	0.00	35.01	11.65	30.54	3.49	34.03	0.029
2003	OCT	31	74.8	74.80	36.87	197.71	7.24	67.56	0.00	7.10	3.19	15.56	0.13	15.69	0.013
2003	NOV	30	187	187.00	36.87	309.91	53.26	133.74	0.00	46.80	14.95	35.05	6.46	41.50	0.036
2003	DIC	31	87.2	87.20	36.87	210.11	11.33	75.87	0.00	11.01	4.66	21.29	0.32	21.61	0.018
2004	ENE	31	87.5	87.50	36.87	210.41	11.43	76.07	0.00	11.10	3.76	12.01	0.33	12.33	0.011
2004	FEB	29	16.7	16.70	36.87	139.61	0.00	16.70	0.00	0.00	0.40	3.36	0.00	3.36	0.003
2004	MAR	31	27	27.00	36.87	149.91	0.00	27.00	0.00	0.00	0.04	0.36	0.00	0.36	0.000
2004	ABR	30	247	247.00	36.87	369.91	81.29	165.71	0.00	67.15	21.00	46.18	14.14	60.32	0.052
2004	MAY	31	48	48.00	36.87	170.91	0.85	47.15	0.00	0.85	2.16	19.70	0.00	19.70	0.017
2004	JUN	30	76	76.00	36.87	198.91	7.61	68.39	0.00	7.46	2.54	7.07	0.15	7.22	0.006
2004	JUL	31	35.5	35.50	36.87	158.41	0.00	35.50	0.00	0.00	0.23	2.31	0.00	2.31	0.002
2004	AGO	31	24.5	24.50	36.87	147.41	0.00	24.50	0.00	0.00	0.02	0.21	0.00	0.21	0.000
2004	SEP	30	59	59.00	36.87	181.91	2.93	56.07	0.00	2.91	0.91	2.02	0.02	2.04	0.002
2004	OCT	31	128.5	128.50	36.87	251.41	27.42	101.08	0.00	25.60	7.78	18.73	1.82	20.55	0.018
2004	NOV	30	107	107.00	36.87	229.91	18.69	88.31	0.00	17.82	6.33	19.27	0.86	20.14	0.017
2004	DIC	31	147.9	147.90	36.87	270.81	35.73	112.17	0.00	32.71	10.41	28.63	3.03	31.66	0.027
2005	ENE	31	145.5	145.50	36.87	268.41	34.69	110.81	0.00	31.83	10.52	31.72	2.86	34.58	0.030
2005	FEB	28	34.6	34.60	36.87	157.51	0.00	34.60	0.00	0.00	1.20	9.32	0.00	9.32	0.008
2005	MAR	31	107	107.00	36.87	229.91	18.69	88.31	0.00	17.82	5.47	13.55	0.86	14.42	0.012
2005	ABR	30	153	153.00	36.87	275.91	37.97	115.03	0.00	34.57	11.34	28.69	3.40	32.09	0.027
2005	MAY	31	67	67.00	36.87	189.91	4.95	62.05	0.00	4.89	2.50	13.74	0.06	13.80	0.012
2005	JUN	30	169.8	169.80	36.87	292.71	45.45	124.35	0.00	40.66	12.96	30.20	4.79	34.99	0.030

2005	JUL	31	47.1	47.10	36.87	170.01	0.73	46.37	0.00	0.73	1.39	12.30	0.00	12.30	0.011
2005	AGO	31	69	69.00	36.87	191.91	5.51	63.49	0.00	5.44	1.76	5.07	0.08	5.14	0.004
2005	SEP	30	73.7	73.70	36.87	196.61	6.90	66.80	0.00	6.78	2.29	6.25	0.12	6.37	0.005
2005	OCT	31	47.5	47.50	36.87	170.41	0.78	46.72	0.00	0.78	0.44	2.63	0.00	2.63	0.002
2005	NOV	30	59	59.00	36.87	181.91	2.93	56.07	0.00	2.91	0.95	2.40	0.02	2.42	0.002
2005	DIC	31	27	27.00	36.87	149.91	0.00	27.00	0.00	0.00	0.09	0.87	0.00	0.87	0.001
2006	ENE	31	206	206.00	36.87	328.91	62.02	143.98	0.00	53.44	16.08	37.44	8.59	46.03	0.039
2006	FEB	28	67.5	67.50	36.87	190.41	5.09	62.41	0.00	5.03	3.53	17.57	0.07	17.64	0.015
2006	MAR	31	138	138.00	36.87	260.91	31.45	106.55	0.00	29.08	9.07	23.55	2.37	25.92	0.022
2006	ABR	30	42.5	42.50	36.87	165.41	0.24	42.26	0.00	0.24	0.96	8.34	0.00	8.34	0.007
2006	MAY	31	9.5	9.50	36.87	132.41	0.00	9.50	0.00	0.00	0.09	0.87	0.00	0.87	0.001
2006	JUN	30	229.7	229.70	36.87	352.61	73.11	156.59	0.00	61.47	19.23	42.33	11.64	53.97	0.046
2006	JUL	31	29.9	29.90	36.87	152.81	0.00	29.90	0.00	0.00	1.74	17.49	0.00	17.49	0.015
2006	AGO	31	44	44.00	36.87	166.91	0.37	43.63	0.00	0.37	0.27	1.84	0.00	1.84	0.002
2006	SEP	30	23.5	23.50	36.87	146.41	0.00	23.50	0.00	0.00	0.03	0.24	0.00	0.24	0.000
2006	OCT	31	184	184.00	36.87	306.91	51.89	132.11	0.00	45.74	13.76	32.00	6.15	38.15	0.033
2006	NOV	30	156	156.00	36.87	278.91	39.29	116.71	0.00	35.66	12.50	36.93	3.63	40.56	0.035
2006	DIC	31	155.3	155.30	36.87	278.21	38.98	116.32	0.00	35.41	11.78	36.12	3.58	39.70	0.034
2007	ENE	31	59	59.00	36.87	181.91	2.93	56.07	0.00	2.91	1.94	12.75	0.02	12.77	0.011
2007	FEB	28	122.3	122.30	36.87	245.21	24.84	97.46	0.00	23.34	8.11	17.17	1.50	18.67	0.016
2007	MAR	31	625.5	625.50	36.87	748.41	266.49	359.01	0.00	157.65	48.16	117.60	108.84	226.44	0.194
2007	ABR	30	86.6	86.60	36.87	209.51	11.12	75.48	0.00	10.81	8.09	50.88	0.31	51.19	0.044
2007	MAY	31	209	209.00	36.87	331.91	63.42	145.58	0.00	54.47	17.12	45.44	8.95	54.39	0.047
2007	JUN	30	8.5	8.50	36.87	131.41	0.00	8.50	0.00	0.00	1.67	15.44	0.00	15.44	0.013
2007	JUL	31	3	3.00	36.87	125.91	0.00	3.00	0.00	0.00	0.15	1.52	0.00	1.52	0.001
2007	AGO	31	58.5	58.50	36.87	181.41	2.81	55.69	0.00	2.79	0.85	2.09	0.02	2.11	0.002
2007	SEP	30	117	117.00	36.87	239.91	22.67	94.33	0.00	21.41	6.78	15.49	1.26	16.75	0.014
2007	OCT	31	240	240.00	36.87	362.91	77.97	162.03	0.00	64.87	20.13	51.52	13.10	64.62	0.055

2007	NOV	30	25.6	25.60	36.87	148.51	0.00	25.60	0.00	0.00	1.97	18.16	0.00	18.16	0.016
2007	DIC	31	31	31.00	36.87	153.91	0.00	31.00	0.00	0.00	0.18	1.79	0.00	1.79	0.002
2008	ENE	31	70	70.00	36.87	192.91	5.80	64.20	0.00	5.71	1.74	4.16	0.09	4.24	0.004
2008	FEB	29	47.9	47.90	36.87	170.81	0.84	47.06	0.00	0.84	0.46	2.12	0.00	2.12	0.002
2008	MAR	31	30.3	30.30	36.87	153.21	0.00	30.30	0.00	0.00	0.04	0.41	0.00	0.41	0.000
2008	ABR	30	39	39.00	36.87	161.91	0.04	38.96	0.00	0.04	0.02	0.06	0.00	0.06	0.000
2008	MAY	31	22.4	22.40	36.87	145.31	0.00	22.40	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.000
2008	JUN	30	22	22.00	36.87	144.91	0.00	22.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000
2008	JUL	31	101.5	101.50	36.87	224.41	16.56	84.94	0.00	15.88	4.78	11.10	0.68	11.79	0.010
2008	AGO	31	19.5	19.50	36.87	142.41	0.00	19.50	0.00	0.00	0.43	4.34	0.00	4.34	0.004
2008	SEP	30	12.5	12.50	36.87	135.41	0.00	12.50	0.00	0.00	0.04	0.39	0.00	0.39	0.000
2008	OCT	31	42.5	42.50	36.87	165.41	0.24	42.26	0.00	0.24	0.07	0.20	0.00	0.20	0.000
2008	NOV	30	47.5	47.50	36.87	170.41	0.78	46.72	0.00	0.78	0.25	0.60	0.00	0.61	0.001
2008	DIC	31	39	39.00	36.87	161.91	0.04	38.96	0.00	0.04	0.03	0.25	0.00	0.25	0.000
2009	ENE	31	72	72.00	36.87	194.91	6.39	65.61	0.00	6.28	1.89	4.42	0.10	4.53	0.004
2009	FEB	28	165	165.00	36.87	287.91	43.30	121.70	0.00	38.93	13.37	27.45	4.37	31.82	0.027
2009	MAR	31	104.4	104.40	36.87	227.31	17.68	86.72	0.00	16.90	6.29	23.98	0.77	24.75	0.021
2009	ABR	30	41.6	41.60	36.87	164.51	0.17	41.43	0.00	0.17	0.67	5.79	0.00	5.79	0.005
2009	MAY	31	66	66.00	36.87	188.91	4.68	61.32	0.00	4.63	1.45	3.84	0.06	3.90	0.003
2009	JUN	30	60	60.00	36.87	182.91	3.16	56.84	0.00	3.14	1.12	3.47	0.03	3.49	0.003
2009	JUL	31	105	105.00	36.87	227.91	17.91	87.09	0.00	17.11	5.25	12.99	0.79	13.78	0.012
2009	AGO	31	51.5	51.50	36.87	174.41	1.41	50.09	0.00	1.40	0.90	5.75	0.01	5.76	0.005
2009	SEP	30	79	79.00	36.87	201.91	8.57	70.43	0.00	8.38	2.71	6.57	0.19	6.75	0.006
2009	OCT	31	143	143.00	36.87	265.91	33.60	109.40	0.00	30.91	9.54	24.08	2.69	26.77	0.023
2009	NOV	30	272.5	272.50	36.87	395.41	93.44	179.06	0.00	75.23	24.46	60.32	18.21	78.53	0.067
2009	DIC	31	302	302.00	36.87	424.91	107.62	194.38	0.00	84.15	27.53	81.08	23.46	104.55	0.089
2010	ENE	31	219	219.00	36.87	341.91	68.09	150.91	0.00	57.88	19.90	65.50	10.21	75.71	0.065
2010	FEB	28	417	417.00	36.87	539.91	163.61	253.39	0.00	114.91	41.10	93.71	48.70	142.41	0.122

2010	MAR	31	50.5	50.50	36.87	173.41	1.24	49.26	0.00	1.23	4.09	38.24	0.00	38.25	0.033
2010	ABR	30	70	70.00	36.87	192.91	5.80	64.20	0.00	5.71	2.19	7.62	0.09	7.70	0.007
2010	MAY	31	91	91.00	36.87	213.91	12.67	78.33	0.00	12.27	3.89	10.57	0.40	10.97	0.009
2010	JUN	30	55	55.00	36.87	177.91	2.06	52.94	0.00	2.05	1.02	4.92	0.01	4.93	0.004
2010	JUL	31	97	97.00	36.87	219.91	14.87	82.13	0.00	14.32	4.40	10.94	0.55	11.49	0.010
2010	AGO	31	58	58.00	36.87	180.91	2.70	55.30	0.00	2.68	1.21	5.88	0.02	5.90	0.005
2010	SEP	30	120.5	120.50	36.87	243.41	24.10	96.40	0.00	22.68	7.21	16.68	1.42	18.09	0.015
2010	OCT	31	46	46.00	36.87	168.91	0.59	45.41	0.00	0.59	0.83	6.97	0.00	6.97	0.006
2010	NOV	30	28	28.00	36.87	150.91	0.00	28.00	0.00	0.00	0.08	0.75	0.00	0.75	0.001
2010	DIC	31	33	33.00	36.87	155.91	0.00	33.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.00	0.07	0.000
2011	ENE	31	81.5	81.50	36.87	204.41	9.39	72.11	0.00	9.16	2.76	6.41	0.22	6.64	0.006
2011	FEB	28	90.5	90.50	36.87	213.41	12.49	78.01	0.00	12.10	4.40	10.46	0.39	10.85	0.009
2011	MAR	31	63.5	63.50	36.87	186.41	4.02	59.48	0.00	3.98	1.60	6.79	0.04	6.83	0.006
2011	ABR	30	153.5	153.50	36.87	276.41	38.19	115.31	0.00	34.75	11.02	25.32	3.44	28.76	0.025
2011	MAY	31	47	47.00	36.87	169.91	0.72	46.28	0.00	0.71	1.21	10.53	0.00	10.53	0.009
2011	JUN	30	51	51.00	36.87	173.91	1.32	49.68	0.00	1.32	0.53	2.00	0.00	2.00	0.002
2011	JUL	31	76	76.00	36.87	198.91	7.61	68.39	0.00	7.46	2.29	5.70	0.15	5.85	0.005
2011	AGO	31	31	31.00	36.87	153.91	0.00	31.00	0.00	0.00	0.21	2.09	0.00	2.09	0.002
2011	SEP	30	5	5.00	36.87	127.91	0.00	5.00	0.00	0.00	0.02	0.19	0.00	0.19	0.000
2011	OCT	31	110	110.00	36.87	232.91	19.87	90.13	0.00	18.89	5.69	13.23	0.97	14.20	0.012
2011	NOV	30	109	109.00	36.87	231.91	19.47	89.53	0.00	18.54	6.35	17.87	0.94	18.80	0.016
2011	DIC	31	26	26.00	36.87	148.91	0.00	26.00	0.00	0.00	0.57	5.78	0.00	5.78	0.005
2012	ENE	31	48	48.00	36.87	170.91	0.85	47.15	0.00	0.85	0.31	1.12	0.00	1.12	0.001
2012	FEB	29	193	193.00	36.87	315.91	56.01	136.99	0.00	48.92	15.93	33.29	7.10	40.39	0.035
2012	MAR	31	198	198.00	36.87	320.91	58.32	139.68	0.00	50.66	16.68	49.91	7.65	57.57	0.049
2012	ABR	30	41	41.00	36.87	163.91	0.13	40.87	0.00	0.13	1.67	15.14	0.00	15.14	0.013
2012	MAY	31	105.5	105.50	36.87	228.41	18.10	87.40	0.00	17.29	5.35	13.61	0.81	14.42	0.012
2012	JUN	30	38	38.00	36.87	160.91	0.01	37.99	0.00	0.01	0.53	4.84	0.00	4.84	0.004

2012	JUL	31	19	19.00	36.87	141.91	0.00	19.00	0.00	0.00	0.05	0.48	0.00	0.48	0.000
2012	AGO	31	219	219.00	36.87	341.91	68.09	150.91	0.00	57.88	17.42	40.51	10.21	50.72	0.043
2012	SEP	30	102	102.00	36.87	224.91	16.75	85.25	0.00	16.06	6.72	26.75	0.70	27.44	0.023
2012	OCT	31	289	289.00	36.87	411.91	101.36	187.64	0.00	80.28	24.76	62.24	21.08	83.32	0.071
2012	NOV	30	64	64.00	36.87	186.91	4.15	59.85	0.00	4.11	3.71	25.16	0.04	25.20	0.022
2012	DIC	31	445	445.00	36.87	567.91	177.36	267.64	0.00	121.52	36.89	88.34	55.84	144.17	0.123
2013	ENE	31	53	53.00	36.87	175.91	1.68	51.32	0.00	1.67	3.84	34.72	0.01	34.73	0.030
2013	FEB	28	84	84.00	36.87	206.91	10.23	73.77	0.00	9.96	3.80	10.00	0.26	10.26	0.009
2013	MAR	31	106.3	106.30	36.87	229.21	18.41	87.89	0.00	17.57	5.63	15.75	0.84	16.59	0.014
2013	ABR	30	95	95.00	36.87	217.91	14.13	80.87	0.00	13.63	4.81	14.45	0.50	14.95	0.013
2013	MAY	31	117	117.00	36.87	239.91	22.67	94.33	0.00	21.41	6.88	19.35	1.26	20.61	0.018
2013	JUN	30	4	4.00	36.87	126.91	0.00	4.00	0.00	0.00	0.67	6.20	0.00	6.20	0.005
2013	JUL	31	19	19.00	36.87	141.91	0.00	19.00	0.00	0.00	0.06	0.61	0.00	0.61	0.001
2013	AGO	31	20.5	20.50	36.87	143.41	0.00	20.50	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00	0.06	0.000
2013	SEP	30	79.5	79.50	36.87	202.41	8.73	70.77	0.00	8.54	2.67	5.87	0.19	6.06	0.005
2013	OCT	31	62.5	62.50	36.87	185.41	3.77	58.73	0.00	3.73	1.36	5.04	0.04	5.08	0.004
2013	NOV	30	160.5	160.50	36.87	283.41	41.29	119.21	0.00	37.30	11.80	26.87	3.99	30.86	0.026
2013	DIC	31	40	40.00	36.87	162.91	0.08	39.92	0.00	0.08	1.09	10.78	0.00	10.78	0.009
2014	ENE	31	362.5	362.50	36.87	485.41	136.96	225.54	0.00	101.09	30.51	71.67	35.87	107.54	0.092
2014	FEB	28	400.7	400.70	36.87	523.61	155.62	245.08	0.00	110.91	40.96	100.46	44.72	145.17	0.124
2014	MAR	31	151	151.00	36.87	273.91	37.09	113.91	0.00	33.84	13.89	60.91	3.25	64.16	0.055
2014	ABR	30	120	120.00	36.87	242.91	23.90	96.10	0.00	22.50	8.39	27.99	1.39	29.39	0.025
2014	MAY	31	49.1	49.10	36.87	172.01	1.01	48.09	0.00	1.01	1.06	8.34	0.00	8.34	0.007
2014	JUN	30	66	66.00	36.87	188.91	4.68	61.32	0.00	4.63	1.55	4.14	0.06	4.20	0.004
2014	JUL	31	132	132.00	36.87	254.91	28.89	103.11	0.00	26.88	8.23	20.21	2.01	22.22	0.019
2014	AGO	31	4	4.00	36.87	126.91	0.00	4.00	0.00	0.00	0.74	7.48	0.00	7.48	0.006
2014	SEP	30	193	193.00	36.87	315.91	56.01	136.99	0.00	48.92	15.37	34.29	7.10	41.39	0.035
2014	OCT	31	216	216.00	36.87	338.91	66.68	149.32	0.00	56.86	18.50	53.73	9.82	63.56	0.054

2014	NOV	30	203	203.00	36.87	325.91	60.63	142.37	0.00	52.40	18.19	52.70	8.23	60.93	0.052
2014	DIC	31	93	93.00	36.87	215.91	13.40	79.60	0.00	12.95	5.54	25.60	0.45	26.05	0.022
2015	ENE	31	203	203.00	36.87	325.91	60.63	142.37	0.00	52.40	16.26	41.68	8.23	49.91	0.043
2015	FEB	28	38	38.00	36.87	160.91	0.01	37.99	0.00	0.01	1.86	14.41	0.00	14.41	0.012
2015	MAR	31	59	59.00	36.87	181.91	2.93	56.07	0.00	2.91	1.04	3.72	0.02	3.75	0.003
2015	ABR	30	87.5	87.50	36.87	210.41	11.43	76.07	0.00	11.10	3.57	8.57	0.33	8.90	0.008
2015	MAY	31	42	42.00	36.87	164.91	0.20	41.80	0.00	0.20	0.38	3.39	0.00	3.39	0.003
2015	JUN	30	61	61.00	36.87	183.91	3.40	57.60	0.00	3.37	1.09	2.66	0.03	2.69	0.002
2015	JUL	31	35.5	35.50	36.87	158.41	0.00	35.50	0.00	0.00	0.10	0.99	0.00	0.99	0.001
2015	AGO	31	214	214.00	36.87	336.91	65.75	148.25	0.00	56.18	16.91	39.37	9.57	48.94	0.042
2015	SEP	30	67.4	67.40	36.87	190.31	5.07	62.33	0.00	5.00	3.22	18.69	0.07	18.76	0.016
2015	OCT	31	121.1	121.10	36.87	244.01	24.35	96.75	0.00	22.90	7.18	18.94	1.44	20.38	0.017
2015	NOV	30	90	90.00	36.87	212.91	12.32	77.68	0.00	11.93	4.43	14.68	0.38	15.06	0.013
2015	DIC	31	202	202.00	36.87	324.91	60.17	141.83	0.00	52.05	16.06	40.43	8.11	48.54	0.042

Tabla 33 - Calculo mensual de modelo de Temez en período 1981-2015

15.4 Anexo 4 – Diseño del paquete de aspersores

Distance from Pivot feet	Local Sprinkler Spacing feet	Sprinkler Discharge Required gpm	Pressure Regulator Installed Y/N	Pressure in the Lateral psi	Pressure at the Sprinkler Base, psi	Flow in Lateral gpm	Actual Sprinkler Discharge gpm	Size 64 ths
4.5	4.5	0.03	Y	64.03	30	1294.5	0.0	0
13.5	9	0.19	Y	63.71	30	1294.5	0.0	0
22.5	9	0.32	Y	63.40	30	1294.5	0.3	3
31.5	9	0.45	Y	63.08	30	1294.1	0.5	3.5
40.5	9	0.57	Y	62.76	30	1293.7	0.6	4
49.5	9	0.70	Y	62.44	30	1293.0	0.6	4
58.5	9	0.83	Y	62.13	30	1292.4	0.8	4.5
67.5	9	0.95	Y	61.81	30	1291.6	1.0	5
76.5	9	1.08	Y	61.49	30	1290.7	1.2	5.5
85.5	9	1.21	Y	61.18	30	1289.5	1.2	5.5
94.5	9	1.34	Y	60.86	30	1288.3	1.4	6
103.5	9	1.46	Y	60.55	30	1287.0	1.4	6
112.5	9	1.59	Y	60.23	30	1285.6	1.6	6.5
121.5	9	1.72	Y	59.92	30	1283.9	1.6	6.5
130.5	9	1.84	Y	59.61	30	1282.3	1.9	7
139.5	9	1.97	Y	59.30	30	1280.4	1.9	7
148.5	9	2.10	Y	58.98	30	1278.6	2.2	7.5
157.5	9	2.23	Y	58.68	30	1276.4	2.2	7.5
166.5	9	2.35	Y	58.37	30	1274.2	2.4	8
175.5	9	2.48	Y	58.06	30	1271.8	2.4	8
184.5	9	2.61	Y	57.75	30	1269.4	2.8	8.5
193.5	9	2.73	Y	57.45	30	1266.6	2.8	8.5
201.5	8	2.53	Y	57.18	30	1263.8	2.4	8
210.5	9	2.97	Y	56.87	30	1261.4	3.1	9
219.5	9	3.10	Y	56.57	30	1258.3	3.1	9
228.5	9	3.23	Y	56.27	30	1255.2	3.1	9
237.5	9	3.36	Y	55.97	30	1252.1	3.4	9.5
246.5	9	3.48	Y	55.67	30	1248.7	3.4	9.5
255.5	9	3.61	Y	55.38	30	1245.3	3.8	10
264.5	9	3.74	Y	55.08	30	1241.5	3.8	10
273.5	9	3.86	Y	54.79	30	1237.7	3.8	10
282.5	9	3.99	Y	54.50	30	1233.9	4.2	10.5
291.5	9	4.12	Y	54.21	30	1229.8	4.2	10.5
300.5	9	4.25	Y	53.92	30	1225.6	4.2	10.5

309.5	9	4.37	Y	53.64	30	1221.4	4.6	11
318.5	9	4.50	Y	53.35	30	1216.9	4.6	11
327.5	9	4.63	Y	53.07	30	1212.3	4.6	11
336.5	9	4.75	Y	52.79	30	1207.8	4.6	11
345.5	9	4.88	Y	52.52	30	1203.2	5.0	11.5
354.5	9	5.01	Y	52.24	30	1198.2	5.0	11.5
363.5	9	5.14	Y	51.97	30	1193.3	5.0	11.5
372.5	9	5.26	Y	51.70	30	1188.3	5.4	12
381.5	9	5.39	Y	51.43	30	1182.9	5.4	12
390.5	9	5.52	Y	51.16	30	1177.5	5.4	12
398.5	8	5.00	Y	50.92	30	1172.1	5.0	11.5
407.5	9	5.76	Y	50.66	30	1167.2	5.8	12.5
416.5	9	5.88	Y	50.40	30	1161.4	5.8	12.5
425.5	9	6.01	Y	50.14	30	1155.5	5.8	12.5
434.5	9	6.14	Y	49.89	30	1149.7	6.3	13
443.5	9	6.27	Y	49.64	30	1143.4	6.3	13
452.5	9	6.39	Y	49.39	30	1137.1	6.3	13
461.5	9	6.52	Y	49.14	30	1130.9	6.7	13.5
470.5	9	6.65	Y	48.89	30	1124.1	6.7	13.5
479.5	9	6.77	Y	48.65	30	1117.4	6.7	13.5
488.5	9	6.90	Y	48.41	30	1110.6	6.7	13.5
497.5	9	7.03	Y	48.17	30	1103.9	7.2	14
506.5	9	7.16	Y	47.94	30	1096.6	7.2	14
515.5	9	7.28	Y	47.71	30	1089.4	7.2	14
524.5	9	7.41	Y	47.48	30	1082.2	7.2	14
533.5	9	7.54	Y	47.26	30	1074.9	7.7	14.5
542.5	9	7.66	Y	47.03	30	1067.2	7.7	14.5
551.5	9	7.79	Y	46.81	30	1059.5	7.7	14.5
560.5	9	7.92	Y	46.60	30	1051.7	7.7	14.5
569.5	9	8.05	Y	46.38	30	1044.0	8.2	15
578.5	9	8.17	Y	46.17	30	1035.8	8.2	15
587.5	9	8.30	Y	45.97	30	1027.5	8.2	15
595.5	8	7.48	Y	45.67	30	1019.3	7.3	14
604.5	9	8.54	Y	45.34	30	1012.0	8.3	15
613.5	9	8.67	Y	45.01	30	1003.7	8.8	15.5
622.5	9	8.79	Y	44.69	30	994.9	8.8	15.5
631.5	9	8.92	Y	44.37	30	986.1	8.8	15.5
640.5	9	9.05	Y	44.06	30	977.3	8.8	15.5
649.5	9	9.18	Y	43.75	30	968.5	9.3	16
658.5	9	9.30	Y	43.45	30	959.2	9.3	16
667.5	9	9.43	Y	43.16	30	949.8	9.3	16

676.5	9	9.56	Y	42.87	30	940.5	9.3	16
685.5	9	9.68	Y	42.58	30	931.2	9.9	16.5
694.5	9	9.81	Y	42.30	30	921.3	9.9	16.5
703.5	9	9.94	Y	42.03	30	911.4	9.9	16.5
712.5	9	10.07	Y	41.76	30	901.6	9.9	16.5
721.5	9	10.19	Y	41.50	30	891.7	10.4	17
730.5	9	10.32	Y	41.24	30	881.3	10.4	17
739.5	9	10.45	Y	40.99	30	870.9	10.4	17
748.5	9	10.57	Y	40.74	30	860.4	10.4	17
757.5	9	10.70	Y	40.50	30	850.0	11.0	17.5
769.5	12	14.49	Y	40.19	30	839.1	14.4	20.5
778.5	9	11.00	Y	39.96	30	824.6	11.0	17.5
787.5	9	11.13	Y	39.74	30	813.7	11.0	17.5
796.5	9	11.25	Y	39.52	30	802.7	11.5	18
805.5	9	11.38	Y	39.31	30	791.1	11.5	18
814.5	9	11.51	Y	39.11	30	779.6	11.5	18
823.5	9	11.63	Y	38.91	30	768.1	11.5	18
832.5	9	11.76	Y	38.72	30	756.6	11.5	18
841.5	9	11.89	Y	38.53	30	745.0	12.1	18.5
850.5	9	12.02	Y	38.34	30	732.9	12.1	18.5
859.5	9	12.14	Y	38.17	30	720.8	12.1	18.5
868.5	9	12.27	Y	38.00	30	708.7	12.1	18.5
877.5	9	12.40	Y	37.83	30	696.6	12.7	19
886.5	9	12.52	Y	37.67	30	683.9	12.7	19
895.5	9	12.65	Y	37.51	30	671.2	12.7	19
904.5	9	12.78	Y	37.36	30	658.6	12.7	19
913.5	9	12.91	Y	37.22	30	645.9	12.7	19
922.5	9	13.03	Y	37.08	30	633.2	13.3	19.5
931.5	9	13.16	Y	36.95	30	619.9	13.3	19.5
943.5	12	17.77	Y	36.77	30	606.7	18.1	23.5
952.5	9	13.46	Y	36.65	30	588.6	13.3	19.5
961.5	9	13.58	Y	36.54	30	575.4	13.9	20
970.5	9	13.71	Y	36.42	30	561.5	13.9	20
979.5	9	13.84	Y	36.32	30	547.7	13.9	20
988.5	9	13.96	Y	36.22	30	533.8	13.9	20
997.5	9	14.09	Y	36.12	30	520.0	13.9	20
1006.5	9	14.22	Y	36.03	30	506.1	14.4	20.5
1015.5	9	14.35	Y	35.94	30	491.7	14.4	20.5
1024.5	9	14.47	Y	35.86	30	477.2	14.4	20.5
1033.5	9	14.60	Y	35.78	30	462.8	14.4	20.5
1042.5	9	14.73	Y	35.71	30	448.3	14.4	20.5

1051.5	9	14.85	Y	35.64	30	433.9	15.0	21
1060.5	9	14.98	Y	35.57	30	418.8	15.0	21
1069.5	9	15.11	Y	35.51	30	403.8	15.0	21
1078.5	9	15.24	Y	35.45	30	388.7	15.0	21
1087.5	9	15.36	Y	35.40	30	373.7	15.6	21.5
1096.5	9	15.49	Y	35.35	30	358.1	15.6	21.5
1105.5	9	15.62	Y	35.31	30	342.4	15.6	21.5
1117.5	12	21.05	Y	35.25	30	326.8	21.0	26
1126.5	9	15.91	Y	35.22	30	305.7	15.6	21.5
1135.5	9	16.04	Y	35.19	30	290.1	16.2	22
1144.5	9	16.17	Y	35.16	30	273.8	16.2	22
1153.5	9	16.30	Y	35.13	30	257.6	16.2	22
1162.5	9	16.42	Y	35.11	30	241.3	16.2	22
1171.5	9	16.55	Y	35.09	30	225.1	16.2	22
1180.5	9	16.68	Y	35.07	30	208.9	16.9	22.5
1189.5	9	16.80	Y	35.05	30	192.0	16.9	22.5
1198.5	9	16.93	Y	35.04	30	175.2	16.9	22.5
1207.5	9	17.06	Y	35.03	30	158.3	16.9	22.5
1216.5	9	17.19	Y	35.02	30	141.5	17.5	23
1225.5	9	17.31	Y	35.01	30	124.0	17.5	23
1234.5	9	17.44	Y	35.01	30	106.5	17.5	23
1243.5	9	17.57	Y	35.00	30	89.1	17.5	23
1252.5	9	17.69	Y	35.00	30	71.6	17.5	23
1261.5	9	17.82	Y	35.00	30	54.2	18.1	23.5
1270.5	9	17.95	Y	35.00	30	36.1	18.1	23.5
1279.5	9	18.08	Y	35.00	30	18.1	18.1	23.5

Tabla 34 - Resultados del diseño del paquete de aspersores, según planilla de cálculo de la USDA

Weighted Runoff With Surface Storage, inches					Weighted Runoff With No Surface Storage, inches				
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

Span Number	Distance from Pivot feet	Sprinkler Discharge Required gpm	Pressure Regulator Installed Y/N	Actual Sprinkler Flow gpm	Wetted Radius feet	Peak Application Rate inches/hour	Surface Storage inches	Potential Runoff Depth, inches with Surface Storage					Potential Runoff Depth, inches without any surface storage					
								Depth of Application, inches					Depth of Application, inches					
								0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	
								1	98.5	1.39	Y	1.39	37.7	0.25	0.48	0.00	0.00	0.00
2	295.5	4.17	Y	4.16	42.3	0.67	0.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3	492.5	6.96	Y	6.75	46.1	1.03	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	678.0	9.58	Y	9.33	48.0	1.36	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
5	852.0	12.04	Y	12.10	50.0	1.64	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.12
6	1026.0	14.49	Y	14.45	51.7	1.91	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.12	0.21
7	1200.0	16.95	Y	16.85	53.5	2.16	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.08	0.18	0.28	

Tabla 35 - Resultados escurrimiento de paquetes de aspersores, según hoja de cálculo de USDA