Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria

TESIS DOCTORAL

CRECIMIENTO Y DESARROLLO EN PATATA (*Solanum tuberosum* L.) CON DIFERENTES TRATAMIENTOS HÍDRICOS EN SISTEMA PIVOTE

Doctorando:
Débora Costa Camargo

Directores de Tesis:
Dr. José Fernando Ortega Álvarez
Dr. José María Tarjuelo Martin-Benito
Dr. Juan Ignácio Córcoles Tendero

Albacete, junio de 2013

A mis padres,
Elson y Maria Angélica

RESUMEN

RESUMEN

La mejora y modernización de regadío debe continuar buscando la mejor eficiencia del uso del agua, y por consiguiente un adecuado suministro del agua atendiendo cada vez a más criterios (técnicos, sociales, económicos, etc.) principalmente en una región semiárida como Castilla-La Mancha, pero evitando incrementar excesivamente las demandas de energía.

En el presente trabajo se plantea como objetivo principal analizar la influencia de distintos tratamientos hídricos en el crecimiento y desarrollo del cultivo de la patata (*Solanum Tuberosum* L.) mediante un sistema pivote. Para ello, se llevó a cabo un ensayo experimental durante las campañas 2011 y 2012, en una parcela perteneciente al Centro de Formación Agroambiental de Aguas Nuevas en el término municipal de Albacete.

La parcela tiene una superficie de 18,4 ha, dotada de riego por aspersión con sistema pivote formada por 4 tramos de 50 m y un tramo de 38 m. La tubería del pivote tiene un diámetro de 168,3 mm, con un caudal de diseño de 86,4 $m^3\ h^{-1}$ y una dotación de 1,3 $L\ s^{-1}\ ha^{-1}$. Se utilizó emisores de plato rotatorio (Rotator®) a 1,4 m sobre el suelo y separados entre ellos 1,5 m.

Se ensayaron cuatro tratamientos hídricos, aplicando el 120, 100, 80 y 60 % de los requerimientos hídricos del cultivo, realizando la programación de riegos para el tratamiento de referencia (100%) mediante el método del balance simplificado de agua en la zona radicular del cultivo, siguiendo la metodología de FAO. En la campaña 2011 la plantación de patata se realizó en un sector circular de 4,9 ha, mientras que en la campaña 2012, se usó otro sector con la misma superficie. Cada sector contaba con un total de 12 parcelas elementales distribuidas al azar en tres coronas ubicadas entre el tercer y cuarto tramo del pivote.

El riego de cada una de las parcelas distribuidas en las tres coronas se controló por un grupo de 14 emisores que abrían y cerraban (mediante válvulas hidráulicas automatizadas por un contador – secuenciador) en función de la posición en que se encontraba el pivote. La aplicación de los tratamientos se estableció en función de la aplicación o no de algunos de los 6 riegos consecutivos de alta frecuencia e igual dosis, consiguiendo así un riego deficitario continuo, garantizando el porcentaje objetivo de los requerimientos hídricos del cultivo.

El contenido de agua en el suelo se midió por medio de sensores FDR (Enviroscan®) y para la medición del potencial matricial se emplearon sensores Watermark®. El balance hídrico realizado con los sensores FDR permitió estimar los valores de la evapotranspiración (ET) real del cultivo en los diferentes tratamientos del cultivo.

Los valores estimados de la ET del cultivo mediante la metodología del balance simplificado teórico fueron contrastados con los valores calculados de la ET real a través del balance hídrico con los sensores FDR y del balance de energía (Relación de Bowen).

En las dos campañas se llevó a cabo el seguimiento fenológico del cultivo y muestreos de material vegetal a lo largo del ciclo para la modelación de los parámetros de crecimiento del cultivo en los distintos tratamientos. De cada muestreo se ha analizado el índice de área foliar y la materia seca total de la planta, y, a partir de dichos parámetros se han determinado los índices de crecimiento mediante el método de análisis funcional.

A partir de una selección de modelos, se utilizó para describir la evolución del índice de área foliar el modelo expopolinomial de segundo grado, y para la evolución de la materia seca total el modelo sigmoideo Gompertz. Tras la elección de los modelos se calcularon los demás índices de crecimiento.

Resumen

La determinación del grado de cobertura se llevó a cabo a partir de interpretaciones de imágenes hechas por una cámara fotográfica digital acoplada a un vehículo aéreo no tripulado. Se comprobó que cuando el cultivo logra valores superiores a 3 m^2 m^{-2} de índice de área foliar, es el momento en que el suelo se encuentra con su máxima cobertura, de manera que este valor puede ser considerado como el índice de área foliar "óptimo" en el cultivo de la patata, ya que para valores superiores no aumenta el grado de cobertura ni los valores de interceptación de la radiación solar.

Se estudió el efecto de los tratamientos hídricos en el uso eficiente de la radiación para producción de biomasa total. Se comprobó que este parámetro es muy sensible a la escasez del agua, resultando diferencias significativas entre los tratamientos de mayor aporte hídrico y los tratamientos más deficitarios. Los mayores valores de la eficiencia en el uso de radiación fueron alcanzados por el tratamientos del 120 % (2,09 g MJ^{-1} en 2011 y 1,77 g MJ^{-1} en 2012).

Tras la cosecha de 18 m^2 de cada parcela elemental, se determinó el rendimiento comercial, el índice de cosecha y el uso eficiente del agua. Además, se procedió en laboratorio a la medición de parámetros indicativos de la calidad (sólidos solubles, acidez, color y dureza).

Con respecto a la respuesta del cultivo de la patata a la cantidad de agua recibida, destacar que, la duración de las diferentes fases fenológicas no se vio influenciada por los distintos tratamientos hídricos. Asimismo, no se encontraron diferencias significativas de los valores máximos del índice de área foliar en el año 2011 (alrededor de 5,2 m^2 m^{-2}), mientras que, en 2012 los tratamientos más deficitarios resultaron en menores valores máximos del índice (alrededor de 3,9 m^2 m^{-2}).

Los índices de crecimiento, en general, no presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos hídricos en la campaña 2011. Sin embargo, en la campaña 2012 los tratamientos de 120 y 100 % presentaron los mayores valores de los principales índices estudiados.

Con respecto a los rendimientos alcanzados, en la primera campaña, las produciones en cada tratamiento no muestran diferencias significativas (68968,5, 68836,1 y 69238,9 kg ha^{-1}en los tratamientos de 120, 100 y 80 %, respectivamente) salvo en el tratamiento del 60 % (56177,8 kg ha^{-1}). En el segundo año, el rendimiento separa los tratamientos en dos grupos diferenciados, por un lado los que aportan más agua (67588,0 y 70791,8 kg ha^{-1} para 120 y 100 %), y por otro, los deficitarios (54189,2 y 46087,3 kg ha^{-1} para 80 y 60 %). En cuanto al índice de cosecha, en 2011, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de 120 y 100 % frente a los tratamientos de 80 y 60 %. En cambio, en el año 2012, no se encontraron diferencias del índice de cosecha entre los tratamientos.

Los valores de la eficiencia en el uso del agua variaron entre 8,6 y 11,6 kg m^{-3} en 2011, y 7,1 y 8,4 kg m^{-3} en 2012. En la primera campaña se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, y en la segunda campaña no se observó influencias del tratamiento hídrico entre las eficiencias.

Entre los parámetros analizados que valoran la calidad de la cosecha (calibre, sólidos solubles, acidez, dureza y color de los tubérculos), los sólidos solubles totales fue el único parámetro que mostró una clara influencia entre los tratamientos hídricos, siendo los tratamientos de mayor aporte hídrico los que presentaron mayores valores.

ABSTRACT

ABSTRACT

In semiarid areas, such as Castilla – La Mancha region, irrigation lands improvements try to make an efficient use of water resources, besides an accurate delivery based on several criteria (technical, social, economics, etc.).

The main objective of this PhD Thesis is to analyze the influence on potato crop (*Solanum Tuberosum* L.) growth and development of different irrigation treatments under pivot irrigation system. The experimental design was carried out in a commercial plot belonging to "Centro de Formación Agroambiental de Aguas Nuevas" in the province of Albacete (Spain), during 2011 and 2012 irrigation seasons.

The field experiment was conducted in a 18,4 ha commercial potato plot, irrigated with a centre pivot system. The irrigation machine used had five spans, four of them of 50 m, and the fifth of 38 m. The lateral pipe was 168,3 mm in diameter. The designed (gross) flow rate was 86,4m^3 h^{-1} with a system capacity of 1,3 L s^{-1} ha^{-1}. Moving plate sprinklers (Rotator®), which were placed 1,4 m at height and separated 1,5 m, were used.

Four irrigation treatments were carried out, representing 120, 100, 80 and 60 % of potato crop water requirements. The irrigation schedule was computed for the reference treatment (100 %) by using FAO methodology. Potato crop was sown in a quarter of the commercial plot (4,9 ha), divided in 12 experimental plots distributed at random along the third and fourth span.

Irrigation was controlled in each experimental plot by means of a group of 14 emitters (using automatized hydraulic valves), which were opened or closed according to pivot position. Irrigation treatments were carried out according to frequency of 6 consecutive irrigation events, which let to get a continuous deficit irrigation.

Soil water content and matric potencial were measured by means of FDR capacitance probes (Enviroscan®) and Watermark® sensors, respectively. The hydraulic balance was useful in order to compute crop evapotranspiration for each irrigation treatment.

Crop evapotranspiration values obtained with FAO methodology were compared with crop evapotranspiration values obtained by using FDR capacitance probes and energy balance (Bowen Ratio).

In both irrigation seasons, phenological development and sampling events were carried out in order to determine crop growth parameters. In each sampling event, leaf area index and total dry matter content were obtained. In addition, crop growth parameters by using functional plant growth analysis were computed.

Leaf area index monitoring was carried out by using expopolinomial model, whereas Gompertz sigmoid function was used to monitor total dry matter content.

Canopy cover was computed using digital aerial photographies with unmanned aerial vehicles. The maximum canopy cover was obtained when LAI reached values closed to 3 m^2 m^{-2}, which might be regarded as an ideal LAI. In fact, LAI values upper did not increase canopy cover and solar radiation interceptation values.

The results showed that the radiation use efficiency is influenced by water scarcity, resulting in statistically significant differences between the highest and lowest irrigation treatments. The highest values of the radiation use efficiency were reached in 120 % irrigation treatment (2,09 g MJ^{-1} in 2011 and 1,77 g MJ^{-1} in 2012).

Potato crop yield, harvest index and water use efficiency were computed after harvesting 18 m2 in each experimental plot. In addition, quality parameters were measured (soluble solids, acidity, colour and hardness).

Abstract

Regarding relationship between amount of water received and crop response, it can be highlighted that phenological stages duration was similar for each irrigation treatment. Related to the highest values of leaf area index, no statistically significant differences were shown in 2011 irrigation season (5,2 m^2 m^{-2}), whereas in 2012, the lowest LAI values (3,9 m^2 m^{-2}) was reached in irrigation treatments that received less amount of water, resulting in statistically significant differences.

Crop growth parameters did not show statistically significant differences between irrigation treatments in 2011. However, in 2012, the highest crop growth parameters values were shown in 120 and 100 % irrigation treatments.

In 2011 irrigation season, crop yield did not show statistically significant differences (68968,5, 68836,1 and 69238,9 kg ha^{-1} in 120, 100 and 80 % irrigation treatments, respectively) apart from 60 % irrigation treatment (56177,8 kg ha^{-1}). In 2012, two groups were obtained, separating the highest (67588 and 70791,8 kg ha^{-1} in 120 and 100 %, respectively) and lowest irrigation treatments (54189,2 and 46087,3 kg ha^{-1} in 80 and 60 %, respectively). Regarding harvest index, in 2011, statistically significant differences were shown between 120-100 % irrigation treatments and 80-60 % irrigation treatments, whereas in 2012 no statistically significant differences were found.

Water use efficiency values were ranged from 8,6 and 11,6 kg m^{-3} (2011), and 7,1 and 8,4 kg m^{-3} (2012). Statistical analysis just showed significant differences in 2011 irrigation season.

Regarding quality parameters (caliber, soluble solids, acidity, hardness and colour), soluble solids was the only parameter influenced by the irrigation treatments. In fact, the highest irrigation treatments reached the highest soluble solids content.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción **3**
2. Antecedentes **7**
2.1 Generalidades 7
2.2 Encuadramiento taxonómico y descripción botánico 9
2.3 Aspectos fisiológicos de interés agronómico 11
2.3.1 Temperatura y fotoperiodo 11
2.3.2 Nutrición 12
2.4 Parámetros de calidad 14
2.5 Crecimiento y desarrollo 14
2.5.1 Comportamiento del crecimiento vegetal 16
2.5.2 Índices de crecimiento 16
2.5.2.1 Índice de área foliar (IAF) 17
2.5.2.2 Duración del área foliar (DAF) 17
2.5.2.3 Relación del área foliar (RAF) 18
2.5.2.4 Tasa de asimilación neta (TAN) 18
2.5.2.5 Velocidad de crecimiento relativo (VCR) 19
2.5.2.6 Velocidad de crecimiento del cultivo (VCC) 19
2.5.3 Modelización del crecimiento 19
2.5.4 Modelos de simulación del crecimiento 21
2.5.5 Rendimiento y sus componentes 22
2.5.6 Modelos y funciones de respuesta el agua 23
2.6 Aplicación del agua en sistema pivote 24
2.7 Agua en el suelo 26
2.7.1 Métodos de medidas del contenido de agua en el suelo 28
2.8 El balance de radiación 29
2.9 Estimación de la evapotranspiración 30
2.9.1 Balance de energía. Relación de *Bowen* 31
2.10 Efectos del riego deficitario en el cultivo de patata 32
3. Objetivos **37**
4. Materiales y métodos **41**
4.1 Característica de la zona de ensayo 41
4.1.1 Características edáficas 41
4.1.2 Características climáticas 42
4.1.2.1 Características climáticas en los años de ensayo 42
4.2 Características del ensayo 43
4.2.1 Diseño experimental 43
4.2.2 Descripción de los perfiles del suelo 45
4.2.3 Análisis físico-química del suelo 48
4.2.4 Curvas características de humedad 49
4.3 Fitotecnia de la patata en ensayo experimental 52
4.3.1 Características de la variedad 52
4.3.2 Marco de plantación 53

4.3.3 Operaciones y labores 53
4.4 La fenología del cultivo 55
4.5 Programación de riego 58
4.5.1 Evaluaciones de riego 58
4.6 Medidas de la humedad del agua en el suelo 62
4.6.1 Calibración de los sensores en laboratorio 62
4.6.2 Instalación de los sensores en campo 64
4.7 Medidas de la tensión del agua en el suelo 65
4.8 Determinación de la evapotranspiración del cultivo 67
4.8.1 Métodos alternativos de la estimación de la ET real del cultivo 68
4.8.1.1 Sensores FDR 68
4.8.1.1.1 Determinación del plano de flujo cero 69
4.8.1.2 Relación de *Bowen* 69
4.9 Balance de radiación 71
4.10 El análisis de crecimiento 73
4.10.1 Modelización de la emergencia 73
4.10.2 Modelización de los índices de crecimiento 74
4.11 Grado de cobertura 76
4.12 Análisis del rendimiento y calidad de la cosecha 77
4.13 Análisis estadísticos 80
4.13.1 Estadística descriptiva 80
4.13.2 Inferencia estadística 81
4.13.2.1 Análisis de varianza 81
4.13.2.2 Análisis de regresión 81
4.13.2.2.1 Criterios de selección del modelo 82
4.13.2.2.2 Verificación del modelo 82
4.13.3 Modelos ajustados 83
5. Resultados y discusión 87
5.1 Evaluaciones de riego 87
5.1.1 Altura media recogida en parcela 89
5.2 Determinación de la humedad volumétrica del suelo 90
5.2.1 Calibración de los sensores FDR en laboratorio 90
5.2.2 Evolución de la humedad volumétrica 91
5.3 Evolución del potencial mátrico del suelo 93
5.3.1 Plano de flujo cero 95
5.4 Estimación de la evapotranspiración real 97
5.4.1 Comparación de la ET del cultivo y de la ET real mediante distintas metodologías 97
5.5 El análisis del cultivo 100
5.5.1 Evolución de la fenología del cultivo 100
5.5.2 Densidad poblacional en parcela 102
5.5.3 Análisis y modelación de la emergencia 102
5.5.4 Análisis del crecimiento 104
5.5.4.1 Evolución de la materia seca total 104

5.5.4.2 Reparto de la materia seca en los distintos órganos de la planta 113
5.5.4.3 Evolución del índice de área foliar 115
5.5.4.4 Duración del área foliar 126
5.5.4.5 Relación del área foliar 128
5.5.4.6 Tasa de asimilación neta 129
5.5.4.7 Velocidad de crecimiento relativo 130
5.5.4.8 Velocidad de crecimiento del cultivo 131
5.5.5 Análisis del grado de cobertura 132
5.5.6 Balance de radiación 133
5.5.6.1 Radiación fotosintéticamente activa 133
5.5.6.2 Eficiencia de absorción lumínica 134
5.5.6.3 Coeficiente de extinción 136
5.5.6.4 Eficiencia en el uso de radiación 137
5.5.7 Análisis del rendimiento y calidad de cosecha 138
5.5.7.1 Eficiencia en el uso del agua 140
5.5.7.2 Calidad de la cosecha 141
5.5.7.2.1 Número de tubérculo según su calibre 141
5.5.7.2.2 Sólidos solubles y acidez total 141
5.5.7.2.3 Dureza 142
5.5.7.2.4 Color del peridermo 143
6. Conclusiones 147
6.1 Recomendaciones 149
6.2 Líneas futuras de investigación 149
7. Referencias bibliográficas 153
8. Agradecimientos 177

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Composición nutricional del tubérculo fresco (por 100 g de porción).	7
Tabla 2	Producción, superficie y rendimiento medio obtenido por los principales países productores de patata en 2008.	8
Tabla 3	Ciclos de cultivo por CC.AA en España.	8
Tabla 4	Clasificación científica de la planta de la patata.	10
Tabla 5	Efecto de la temperatura y duración del día en el cultivo de patatas.	12
Tabla 6	Principales funciones de los nutrientes en la planta de la patata.	13
Tabla 7	Tratamiento de abonado, producción, calibres y materia seca en un cultivo de la variedad Agria.	14
Tabla 8	Índices del crecimiento.	17
Tabla 9	Modelos de regresión no linear que describen curvas de crecimiento.	20
Tabla 10	Modelos de simulación de crecimiento de los cultivos.	21
Tabla 11	Funciones temporales de producción de respuesta el agua.	24
Tabla 12	Funciones de pedotransferencia.	27
Tabla 13	Métodos, naturaleza, tipo y de medida del contenido de agua en el suelo.	28
Tabla 14	Variables meteorológicas y componentes del balance de energía medidos por un sistema de Bowen.	32
Tabla 15	Datos climáticos promedios de la serie histórica (2000-2012) de la estación meteorológica de Albacete.	42
Tabla 16	Frecuencia de riegos en los cuatro tratamientos y porcentaje de satisfacción de los Requerimientos Hídricos del Cultivo.	45
Tabla 17	Descripción del perfil para parcela de tratamiento T1, 2011.	46
Tabla 18	Descripción del perfil para parcela de tratamiento T3, 2011.	46
Tabla 19	Descripción del perfil para parcela de tratamiento T1, 2012.	47
Tabla 20	Descripción del perfil para parcela de tratamiento T3, 2012.	47
Tabla 21	Análisis físico-químico del suelo para el año de 2011.	48
Tabla 22	Análisis físico-químico del suelo para el año de 2012.	49
Tabla 23	Modelos y parámetros estadísticos obtenidos en el análisis de las curvas de retención de humedad.	51
Tabla 24	Características agrícolas de la variedad Agria.	53
Tabla 25	Itinerario de tratamiento y operaciones realizadas en el año experimental de 2011.	54
Tabla 26	Itinerario de tratamiento y operaciones realizadas en el año experimental de 2012.	54
Tabla 27	Análisis químico de la enmienda orgánica para los años de 2011 y	55

2012.

Tabla 28 Explicación de los estadios del ciclo agronómico de la patata según escala BBCH. 56

Tabla 29 Modelo de regresión lineal múltiple utilizada para el cálculo de agua recogida en parcela. 59

Tabla 30 Calendario de riego de la cantidad media de agua real aplicado en cada tratamiento, en el año 2011. 60

Tabla 31 Calendario de riego de la cantidad media de agua real aplicado en cada tratamiento, en el año 2012. 61

Tabla 32 Fecha de instalación del equipo *Bowen Ratio.* 70

Tabla 33 Fecha y días desde la emergencia de las mediciones con el equipo SunScan. 72

Tabla 34 Fecha y días desde la emergencia de los vuelos con el UAV. 77

Tabla 35 Propiedades matemáticas del modelo Gompertz. 83

Tabla 36 Propiedades matemáticas del modelo Logístico. 84

Tabla 37 Agua recibida en los diferentes tratamientos hídricos. 90

Tabla 38 Parámetros a, b y c de la ecuación calibrada para cada una de las profundidades. 91

Tabla 39 Parámetros a, b y c de la ecuación general calibrada. 91

Tabla 40 Evapotranspiración y coeficiente de cultivo teórico y estimado, en el año 2011. 98

Tabla 41 Evapotranspiración y coeficiente de cultivo teórico y estimado, en el año 2012. 98

Tabla 42 Valor de la ET real estimada mediante diferentes metodologías en el año 2011. 99

Tabla 43 Valor de la ET real estimada mediante diferentes metodologías en el año 2012. 99

Tabla 44 Duración de las principales fases fenológicas del cultivo de la patata. 100

Tabla 45 Matriz de correlaciones del conjunto de todos los datos entre las variables estudiadas en los años 2011 y 2012. 103

Tabla 46 Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos Gompertz y Logístico que describen las relaciones entre la materia seca total y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo de los tratamientos de 120 y 100 %, para los dos años de estudio. 106

Tabla 47 Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos Gompertz y Logístico que describen las relaciones entre la materia seca total y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo de los tratamientos de 80 y 60 %, para los dos años de estudio. 107

Tabla 48 Análisis estadístico de la evolución de la materia seca total (g m^{-2}) del cultivo de la patata en el año 2011. 112

Tabla 49	Análisis estadístico de la evolución de la materia seca total (g m^{-2}) del cultivo de la patata en el año 2012.	113
Tabla 50	Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 120 %, para los dos años de estudio.	117
Tabla 51	Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 100 %, para los dos años de estudio.	118
Tabla 52	Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 80 %, para los dos años de estudio.	119
Tabla 53	Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 60 %, para los dos años de estudio.	120
Tabla 54	Análisis estadístico de la evolución del índice de área foliar (m^2 m^{-2}) del cultivo de la patata en el año 2011.	125
Tabla 55	Análisis estadístico de la evolución del índice de área foliar (m^2 m^{-2}) para cultivo de la patata en el año 2012.	126
Tabla 56	Análisis estadístico de la duración del área foliar (DAF, m^2 m^{-2} $día^{-1}$) para el cultivo de patata, en los años 2011 y 2012.	128
Tabla 57	Análisis estadístico de los máximos valores de PAR_a y PAR_i (MJ m^{-2} d^{-1}) en el cultivo de la patata en los años 2011 y 2012.	134
Tabla 58	Análisis estadístico de los máximos valores de ε_a y la ε_i (%) en el cultivo de la patata en los años 2011 y 2012.	135
Tabla 59	Modelo utilizado para analizar la relación entre el IAF y el K.	137
Tabla 60	Análisis estadístico de la eficiencia en el uso de la radiación (RUE, g MJ^{-1}) para el cultivo de patata, en los años 2011 y 2012.	138
Tabla 61	Análisis estadístico del rendimiento e índice de cosecha obtenido en cada tratamiento hídrico en los años estudiados.	139
Tabla 62	Numero de tubérculos (Tub m^{-2}) obtenidos por calibre en los dos años de estudio.	141
Tabla 63	Análisis del contenido de sólidos solubles y acidez total, entre los tratamientos. Año 2011 y 2012.	142
Tabla 64	Análisis de la Dureza (D) (Kgf) y Flexibilidad (Kgf mm^{-1}) de la piel (de la punta y de la zona ecuatorial), de la corteza y de la medula del	142

tubérculo, en el año 2011.

Tabla 65 Análisis de la Dureza (D) (Kgf) y Flexibilidad (Kgf mm^{-1}) de la piel (de la punta y de la zona ecuatorial), de la corteza y de la medula del tubérculo, en el año 2012. 143

Tabla 66 Análisis de los parámetros de color del peridermo de los tubérculos entre los tratamientos. Año 2011 y 2012. 143

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Serie histórica de a) superficie y rendimiento, b) producción y precios medios percibidos por los agricultores, c) comercio exterior de España y d) análisis provincial de producción y superficie de cultivo, en 2009.	9
Figura 2	a) Morfología de la planta de la patata y b) partes de un tubérculo.	11
Figura 3	Representación gráfica de las curvas de los modelos Logístico y Gompertz.	20
Figura 4	Formación del rendimiento en el cultivo de patata.	22
Figura 5	Situación geográfica del área de ensayo.	41
Figura 6	a) Temperaturas medias de media (Tmm), mínimas (tmm) y máximas (TMM) mensual durante el periodo de ensayo para el año de 2011, b) 2012, c) precipitación (P) e evapotranspiración de referencia acumulada (ET_o) mensual en el año de 2011 y d) 2012.	43
Figura 7	Sectores del pivote donde se realizaron los ensayos en cada campaña.	43
Figura 8	Distribución de tratamientos en un cuarto de circunferencia de la parcela experimental con el porcentaje sobre los Requerimientos Hídricos del Cultivo (% RHC).	44
Figura 9	Ubicación de las calicatas T1 (60 % RHC) y T3 (100 % RHC) en las parcelas experimentales para los años 2011 y 2012.	46
Figura 10	Curvas de retención de humedad de los suelos utilizados en los dos años de ensayo experimental.	51
Figura 11	Codificación de los estadios fenológicos principales y secundarios para el cultivo de la patata.	57
Figura 12	Evolución del coeficiente del cultivo (Kc).	58
Figura 13	Croquis con la disposición de los sensores EnviroScan®, Watermark y de la temperatura en el suelo en las parcelas experimentales en el año 2011.	66
Figura 14	Croquis con la disposición de los sensores EnviroScan®, Watermark, y de la temperatura del suelo en las parcelas experimentales en el año 2012.	66
Figura 15	Balance hídrico en la zona radicular.	67
Figura 16	Coeficiente de uniformidad (CU), uniformidad de distribución del agua aplicada (UD) y coeficiente de variación del agua media recogida (CV_{AMR}) en el año a)2011 y b) 2012.	87
Figura 17	Altura media recogida acumulada en los riegos evaluados con todos los tramos abiertos y las presiones en que se trabajaba el sistema pivote en cabeza y en las torres 2, 3 y 4 del equipo, en el año 2011.	88
Figura 18	Altura media recogida acumulada en los riegos evaluados con todos los tramos abiertos y las presiones en que se trabajaba el sistema pivote en cabeza y en las torres 2, 3 y 4 del equipo, en el año 2012.	88
Figura 19	Promedio de los valores de SF y el coeficiente de variación de los seis	90

tubos de calibración, a) en el suelo seco y b) con la máxima humedad testada.

Figura 20 Evolución de la humedad volumétrica a diferentes profundidades del perfil del suelo con las sondas EnviroScan®, riego aplicado (mm) y precipitación efectiva (mm). Año 2011. 92

Figura 21 Evolución de la humedad volumétrica a diferentes profundidades del perfil del suelo con las sondas EnviroScan® y gravimetría a los 10 y 20 cm de profundidad, riego aplicado (mm) y precipitación efectiva (mm). Año 2012. 93

Figura 22 Evolución de los valores absolutos del potencial mátrico (cbar) a las profundidades de 20 y 40 cm. Año 2011. 94

Figura 23 Evolución de los valores absolutos del potencial mátrico (cbar) a las profundidades de 20, 30 y 40 cm. Año 2012. 95

Figura 24 Distribución vertical del potencial hídrico (Ψh) en los cuatro tratamientos hídricos. Año 2012. 96

Figura 25 Evolución de la evapotranspiración a lo largo del ciclo agronómico en los años 2011 y 2012. 97

Figura 26 Comparación de la ETr estimada por el BS_T y el BS_{FDR}, con los datos de ambas campañas. 99

Figura 27 Ciclo agronómico de la patata en los dos años de ensayo. 100

Figura 28 Evolución de las temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo agronómico de los dos años estudiados. 101

Figura 29 Densidad poblacional en recolección. 102

Figura 30 Evolución de la temperatura del suelo y los grados días de crecimiento acumulado. 103

Figura 31 Datos observados frente a los simulados de los días desde la plantación en el que ocurre la emergencia, para el año 2012. 104

Figura 32 Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2011. 108

Figura 33 Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2011. 109

Figura 34 Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2012. 110

Figura 35 Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2012. 111

Figura 36	Evolución de la materia seca total acumulada promedia por tratamiento en el año 2011 y 2012.	113
Figura 37	Reparto porcentual de la materia seca entre los órganos, de los cuatro tratamientos hídricos durante el año 2011.	114
Figura 38	Reparto porcentual de la materia seca entre los órganos, de los cuatro tratamientos hídricos durante el año 2012.	114
Figura 39	Temperaturas máximas nocturnas registradas en los años 2011 y 2012.	115
Figura 40	Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2011.	121
Figura 41	Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2011	122
Figura 42	Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2012.	123
Figura 43	Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2012.	124
Figura 44	Evolución del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	126
Figura 45	Evolución de la duración de área foliar (DAF, m^2 m^{-2} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	127
Figura 46	Evolución de la relación de área foliar (RAF, c m^2 g^{-1}) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	129
Figura 47	Evolución de la tasa de asimilación neta (TAN, g m^{-2} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	130
Figura 48	Evolución de la velocidad de crecimiento relativo (VCR, g g^{-1} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	130
Figura 49	Evolución de la velocidad de crecimiento del cultivo (VCC, g m^{-2} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	131
Figura 50	Evolución del grado de cobertura (%) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.	132
Figura 51	a) Relación entre el IAF y el GC, considerando todos los valores de IAF y b) los valores hasta el IAF óptimo en la patata.	133
Figura 52	Evolución de la PAR_a y PAR_i de los distintos tratamientos en función de los días desde la emergencia, en el año 2011 y 2012.	134
Figura 53	Evolución de la ε_a y ε_i de los distintos tratamientos en función de los	135

días desde la emergencia, en el año 2011 y 2012.

Figura 54 a) Relación entre el IAF y la ε_a, considerando todos los valores de IAF, b) los valores hasta el IAF óptimo y c) relación entre la ε_a y el GC. 136

Figura 55 Relación entre el índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción lumínico (K) en los tratamientos durante los años 2011 y 2012. 137

Figura 56 Materia seca total acumulada (MST_{ac}, g m^{-2}) obtenida en los distintos muestreos en función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada (PAR_{ac}, MJ m^{-2}) para los tratamientos de 120%, 100%, 80% y 60% durante el año 2011 y 2012. 138

Figura 57 Relación entre el agua recibida por el cultivo (Riego-R + precipitación efectiva-PE) y el rendimiento obtenido en cada tratamiento hídrico en los años de estudio. 140

Figura 58 Eficiencia en el uso del agua mediante calculo por el total de agua aplicada (R+Pe). 140

Figura 59 Perfil bidimensional de los parámetros *a* y *b* de la epidermis de los tubérculos, en los años 2011 y 2012. 143

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1	Sistema pivote de riego utilizado en el ensayo experimental con el cultivo de patata.	44
Fotografía 2	a) Caja aislante con programador Agronic® y el contador - secuenciador, b) Agronic® y el contador - secuenciador.	45
Fotografía 3	a) Perfil referente al suelo de la parcela de tratamiento T1 y b) T3, 2011.	47
Fotografía 4	a) Perfil referente al suelo de la parcela de tratamiento T1 y b) T3, 2012.	48
Fotografía 5	a) Cámaras Richards, b) muestras en agua, c) muestras en las ollas de presión, y d) muestras secando en estufa.	50
Fotografía 6	a) porte de la planta con 79 días desde de la siembra, b) tubérculo, c) detalles del brote y d) numero de brotes en la corona del tubérculo partido utilizado en la siembra.	52
Fotografía 7	a) Plantadora automática de pinchos, b) patata semilla certificada, cultivar Agria y c) patata semilla partida.	33
Fotografía 8	Pluviómetros utilizados en su soporte sobre el cultivo de la patata.	59
Fotografía 9	a) Dispositivo para calibración y b) su interior lleno con suelo.	63
Fotografía 10	a) Pesaje del suelo y b) secado en estufa.	63
Fotografía 11	a) Normalización del sensor en aire y b) en un contenedor lleno de agua.	64
Fotografía 12	a) *Kit* de instalación Sentek con barra extractora y b) tubo instalado.	64
Fotografía 13	Sensores conectados al *datalogger*.	65
Fotografía 14	a) Tubo instalado y b) proximidad de los tubos instalados de Watermark y EnviroScan®.	65
Fotografía 15	Raíces y tubérculos concentrados a los 20 y 30 cm de profundidad en el suelo.	69
Fotografía 16	a) Equipo Bowen Ratio (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) y b) radiómetro.	70
Fotografía 17	Orientación del sensor SunScan respecto al componente del balance de radiación medido: a) radiación incidente al cultivo (PAR_{ic}), b) radiación reflejada por el cultivo y el suelo (PAR_{rc}), c) radiación que llega al suelo (PAR_s) y d) radiación reflejada por el suelo (PAR_{rs}).	71
Fotografía 18	Aspecto morfológico del tubérculo madre a los a) 23 días desde la plantación (DDP), b) 33 DDP y c) 47 DDP, en el año 2012.	74
Fotografía 19	a) Planta de muestreo en el seguimiento de crecimiento y b) medidor de área foliar.	75
Fotografía 20	a) UAV tipo quadricóptero, b) estación de control en tierra (GCS),	76

	c) control remoto y d) demostración de uno vuelo del UAV.	
Fotografía 21	Imagen obtenida con el UAV usado para el seguimiento del cultivo y cálculo del grado de cobertura.	77
Fotografía 22	Imágenes aéreas analizadas por el software LAIC. La primera en RGB e las siguientes transformadas en L*a*b.	77
Fotografía 23	a) Superficie correspondiente a una de las seis repeticiones de cada parcela experimental, con un área de 3 m^2, b) determinación del peso de la biomasa aérea, c) separación de la biomasa subterránea, por una parte los tallos subterráneos, raíces y estolones y por otra parte los tubérculos y d) clasificación del calibre de los tubérculos.	78
Fotografía 24	a) Medición de la corona de la patata en el texturómetro y b) resultado de la penetración en el anillo vascular y en la medula.	79
Fotografía 25	a) Refractómetro digital y b) zumo del triturado de las patatas.	79
Fotografía 26	a) Valoración potenciométrica en un zumo de patata con una disolución de NaOH 0,1N y b) análisis del color de la epidermis del tubérculo.	80
Fotografía 27	a) Condiciones del cultivo en el día de la tormenta y b) trece días después de la tormenta.	101

ABREVIATURAS

a	Coeficiente experimental
A	Coeficiente experimental
Ac	Acidez total
AC	Arcilla
ADT	Agua disponible total en la zona radicular del suelo
AF	Área foliar
AFA	Agua fácilmente aprovechable
AMD	Altura media teórica descargada por el equipo en cada tramo
AMR	Altura media recogida
AMRp	Altura media de agua recogida en la parcela elemental
ANOVA	Análisis de varianza
AR	Arena
AU	Agua útil
b	Coeficiente experimental
BBCH	*Biologische bundesarstalt, bundessoztenamt and chemical industry*
BR	Relación de *bowen*
BREB	*Bowen ratio energy balance*
BS_{FDR}	Balance hídrico simplificado utilizando los sensores FDR
BS_T	Balance hídrico simplificado teórico
c	Coeficiente experimental
c_p	Calor especifico del aire a presión constante
CC	Capacidad de campo
CC.AA	Comunidad(es) autónoma(s)
CE	Conductividad eléctrica
CS	Susceptibilidad del cultivo
CU	Coeficiente de uniformidad
CV	Coeficiente de variación
dap	Densidad aparente
D	Independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*
De	Destructivo
DAF	Duración del área foliar
DAF_c	Duración del área foliar del inicio de la senescencia hasta la cosecha
DAF_{it}	Duración del área foliar hasta el inicio de la tuberización
DAF_s	Duración del área foliar del inicio de la tuberización hasta la senescencia
DAF_t	Duración del área foliar total
DDE	Días desde la emergencia

DDP	Días desde la plantación
DI	Directo
EE.UU	Estados Unidos
ET	Evapotranspiración
ETa	Evapotranspiración real del cultivo
ETm	Evapotranspiración máxima del cultivo
ET_0	Evapotranspiración de referencia
EUA	Eficiencia en el uso del agua
fa	Lectura de frecuencia del sensor en el aire seco
fs	Lectura de frecuencia del sensor en el suelo
fw	Lectura de frecuencia del sensor sumergido en agua
F	Textura franca
FA	Textura arena franca
FAr	Textura franco arcillosa
FAA	Textura franco arcillo arenoso
FAO	*Food and Agriculture Organization of the United Nations*
FDR	*Frequency Domain Reflectometry*
FL	Textura franco limosa
G	Flujo de calor sensible hacia el suelo desde la superficie
GC	Grado de cobertura
GCS	*Ground Control Station*
GDD	Grados días de crecimiento acumulados
GPS	*Global Positioning System*
hmm	Humedad relativa media de mínima
H	Flujo de calor sensible
Hmm	Humedad relativa media de media
HMM	Humedad relativa media de máxima
IAF	Índice de área foliar
IC	Índice de cosecha
IN	Indirecto
ITAP	Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete
k_h	Coeficiente de transporte turbulento para el calor sensible
k_s	Coeficiente de estrés hídrico
k_v	Coeficiente de transporte turbulento para calor latente
k_y	Factor de respuesta de la productividad del cultivo
K	Coeficiente de extinción lumínico
Kc	Coeficiente de cultivo
KS	Normalidad mediante método de *kolmogorov-smirnov*
L.brote	Longitud del brote

L.raíces	Longitud de las raíces
LA	Superficie foliar
LM	Limo
Me	Mediterráneo seco
MeTE	Mediterráneo templado
MO	Materia orgánica
MSbrote	Materia seca del brote
MStub	Materia seca del tubérculo
MST	Materia seca total
ns	No significativo
ND	No destructivo
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada
NIVAP	Catálogo holandés de variedad de patata
Nº brote	Número de brotes
p	Fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico
p_t	Fracción de agotamiento teórico para ET = 5 mm día^{-1}
p-valor	Nivel de significación
P	Potencial
Pe	Precipitación efectiva
Pp	Precipitación
PAR	Radiación fotosintéticamente activa
PAR_a	Radiación fotosintéticamente activa absorbida
PAR_{ac}	Radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada
PAR_d	Radiación fotosintéticamente activa global
PAR_i	Radiación fotosintéticamente activa interceptada
PAR_{ic}	Radiación fotosintéticamente activa incidente al cultivo
PAR_{rc}	Radiación reflejada por el cultivo y el suelo
PAR_{rs}	Radiación reflejada por el suelo
PAR_s	Radiación que llega al suelo
PFC	Plano de flujo cero
PMP	Punto de marchitez permanente
P0	Programa que llevaba el contador-secuenciador que permitía el riego en todos los tratamientos
P1	Programa que llevaba el contador-secuenciador que suspendía el riego en el tratamiento de 60 %
P2	Programa que llevaba el contador-secuenciador que suspendía el riego en el tratamiento de 80 %
P3	Programa que llevaba el contador-secuenciador que suspendía el riego en el tratamiento de 60 %

P4	Programa que llevaba el contador-secuenciador que suspendía el riego en el tratamiento de 100 %
P5	Programa que llevaba el contador-secuenciador que suspendía el riego en los tratamientos de 60 y 80 %
Rn	Flujo de radiación neta
R	Riego
RAF	Relación de área foliar
RGB	Imagen en *red-green-blue*
RHC	Requerimientos hídricos del cultivo
RS	Rio Grande do Sul
RUE	Eficiencia en el uso de la radiación
R^2	Coeficientes de determinación
S	Superficie del terreno
Se	Homocedasticidad mediante correlación de *sperarman*
SAF	Servicio del Asesoramiento a la Fertilización
SAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo
SC	Santa Catarina
SDM	Déficit de humedad del suelo
SE	Error estándar de la estimación
SF	Frecuencia normalizada
SIAR	Servicio de Información Agroclimática para el Regadío
SP	São Paulo
t	Variable tiempo
tma	Temperatura mínima absoluta
tmm	Temperatura media de mínimas
T	Transpiración del cultivo
T_b	Temperatura base
$T_{máx}$	Temperatura máxima
T_{min}	Temperatura mínima
T_s	Temperatura superior
Tm	Transpiración máxima del cultivo
Tm aire	Temperatura media del aire
Tm suelo	Temperatura media del suelo
Tmm	Temperatura media de medias
TAN	Tasa de asimilación neta
TE	Templado cálido
TDR	*Time Domain Reflectometry*
TM	Términos municipales
TMA	Temperatura máxima absoluta

TMM	Temperatura media de máximas
T1	Tratamiento hídrico de 60 %
T2	Tratamiento hídrico de 80 %
T3	Tratamiento hídrico de 100 %
T4	Tratamiento hídrico de 120 %
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*
UD	Uniformidad de distribución del agua aplicada
UE	Unión Europea
U.S.D.A	*United States Department of Agriculture*
UTM	*Universal Transverse Mercator*
Vm	Velocidad media
Vv	Velocidad del viento
VCC	Velocidad de crecimiento del cultivo
VCR	Velocidad de crecimiento relativo
y	Variable peso
Y	Rendimiento comercial
Ym	Rendimiento comercial máximo
Ys	Rendimientos en condiciones de secano
γ	Constante psicométrica
Γ	Gradiente vertical adiabático
ε_a	Eficiencia de absorción
ε_{ad}	Eficiencia de absorción diaria
ε_i	Eficiencia de interceptación
θ	Contenido de humedad
θv	Humedad volumétrica
θ_{CC}	Humedad en el punto de capacidad de campo
θ_{PMP}	Humedad en el punto de marchitez permanente
λ	Coeficiente experimental
λE	Flujo de calor latente
ρ_a	Densidad del aire
ψ	Tensión con que las partículas del suelo retienen el agua
ψ_h	Potencial hídrico
ψ_m	Potencial mátrico

INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

La agricultura de regadío en regiones áridas y semiáridas, donde los recursos hídricos son la base de su progreso, necesita la búsqueda de un desarrollo sostenible a partir del uso eficiente de los recursos, entre ellos el agua y la energía, para obtener el mínimo impacto ambiental y maximizar el beneficio económico en la agricultura (Fragoso y Marques, 2006; Durão 2008).

El regadío en España es, por la superficie que representa y por su contribución a la producción final agraria y al desarrollo rural, un sector de suma importancia desde un punto de vista socioeconómico y territorial. Las limitaciones climáticas y edáficas de determinados territorios impiden que muchos de los cultivos de mayor productividad agraria puedan cultivarse en régimen de secano, por lo que el regadío puede constituir una alternativa rentable (Gil *et al*., 2009; Corominas, 2010).

La producción mundial de patata (*Solanum tuberosum* L.) se viene incrementando rápidamente en las últimas tres décadas. Aunque se sigue produciendo patata para consumo en fresco, existe un claro incremento de la destinada a la industria de elaboración de alimentos.

En España, la patata se considera habitualmente un cultivo hortícola que dinamiza su tejido social, ambiental y económico. La producción actual es de 2,5 millones de toneladas en una superficie de 85.600 ha (74 % en riego), obteniendo una productividad media de 30 t ha^{-1} (FAOESTAT, 2009). El rendimiento medio se ha ido incrementando en los últimos años debido la mejora del manejo agronómico del cultivo, pero dista mucho de alcanzar los rendimientos potenciales. Por ello, entre los factores productivos que es necesario mejorar destaca la eficiencia del uso del agua.

El regadío de Castilla-La Mancha, según apuntan Domínguez *et al.* (2007), debe ir dirigido a conseguir productos de calidad, que sean competitivos en el mercado y debe potenciar los cultivos con mayor repercusión social en cuanto a empleo de mano de obra directa e indirecta. Los cultivos hortícolas, como la patata, satisfacen estos objetivos.

Estos motivos justifican la investigación para establecer las necesidades hídricas del cultivo de patata en función de la duración del ciclo y de la demanda evaporativa, así como analizar la influencia del déficit hídrico del ciclo agronómico y en los distintos subperiodos de crecimiento y desarrollo.

Muchos estudios de déficit hídrico en patata han demostrado que este cultivo tiene una respuesta positiva al riego deficitario tanto en aspectos cuantitativos como cualitativos (Fabeiro *et al.*, 2001). En general, no se han llevado a cabo experiencias de riego deficitario realizadas bajo el sistema de riego por aspersión, y, sobre todo, en sistemas pivote. Este sistema mecanizado de riego por aspersión se caracterizan por permitir una disminución en el coste energético para la aplicación del agua y un uso eficiente del agua, con bajos niveles de presión de trabajo (200 kPa) y una alta uniformidad de aplicación de agua (Ortiz *et al*., 2010).

Numerosos trabajos han estudiado la respuesta agronómica del cultivo de la patata a distintos tratamientos hídricos, en su mayoría limitándose a analizar el rendimiento en función de diferentes cantidades de agua aplicadas al cultivo (Yuan *et al.*, 2003; Onder *et al.* 2005; Ferreira y Gonçalves, 2007; Bedogni *et al.*, 2009). Sin embargo, el análisis de los índices de crecimiento es una metodología que permite profundizar en las bases fisiológicas de la producción, pudiendo individualizar las influencias de los factores que intervienen en el rendimiento (materia vegetal, agua, manejo y factores ambientales) (Calbo *et al*., 1989; Borrego *et al*., 2000; Heggenstaller *et al*., 2009; Katsvairo *et al*., 2009).

Las ventajas del análisis de crecimiento radican en poder representar el desarrollo de los cultivos durante todo el ciclo agronómico mediante control de las evoluciones de

las variables fácilmente cuantificables, como la materia seca total o el índice de área foliar. Para explicar dichas evoluciones a lo largo del tiempo, se utilizan funciones matemáticas que modelan el comportamiento del cultivo, para la predicción y análisis de los procesos fisiológicos y agronómicos (Heggenstaller *et al*., 2009).

Los estudios de las necesidades y consumos hídricos del cultivo, así como la duración de sus fases fenológicas y sus índices de crecimiento, aportan datos para un mejor conocimiento de las claves de la producción en regadío, permitiendo determinar los factores que limitan el rendimiento y la calidad de la producción.

En este contexto, se plantea la presente Tesis Doctoral, que busca conocer el efecto de diferentes tratamientos hídricos sobre el crecimiento, desarrollo y producción en el cultivo de la patata, así como profundizar en otras relaciones ambientales que afectan al crecimiento y desarrollo del cultivo en regadío.

ANTECEDENTES

2 ANTECEDENTES

2.1 Generalidades.

La patata es una de las plantas más antiguas cultivadas por el hombre, que tuvo su origen como especie botánica en el continente americano en los Andes Centrales (Meiss *et al*., 2008). Hasta 1990, se han reconocido en América un total de 187 especies de patata, entre silvestres y cultivadas (Hawkers, 1990). Varios investigadores plantean que la región andina entre Cuzco y el Lago Titicaca sería el centro de origen de la patata cultivada (especies diploides, triploides, tetraploides y pentaploides) (Cárdenas, 1956; Ochoa, 1984; Hawkers, 1990). El centro de origen de las especies silvestres, fundamentales para fines de mejora genética, fue descrito por Hijmans y Spooner (2001), situándolo en Argentina, Bolivia, México y Perú.

Este cultivo fue llevado a Europa por los españoles en el siglo XVI, después de la conquista de América, no sólo como cultivo alimentario sino también como planta ornamental en los jardines botánicos (Meiss *et al.*, 2008), expandiéndose por Italia y Francia en el siglo XVII, y posteriormente, en Inglaterra e Irlanda durante la escasez de trigo (Hawkers, 1990; Rhoades, 2001). En el año 1845, la enfermedad del tizón tardío (*Phytophthora infestans*) desencadenó una de las mayores hambrunas de la historia de Irlanda, ocasionando la muerte de 2,5 millones de personas (Rhoades, 2001), suponiendo un cambio radical en el modelo alimenticio y productivo.

El salto en la producción alimentaria en Europa liberó a los siervos para el trabajo en fabricas y talleres, constituyendo uno de los motivos que posibilitó la revolución industrial (Rhoades, 2001).

Desde el punto de vista nutritivo, la patata es una excelente fuente de carbohidratos, prácticamente no contiene grasas y tiene proteína y vitaminas importantes, destacando la tipo C y las del complejo B (Tabla 1). Uno de sus componentes más relevantes es el almidón (fécula), empleado en varias industrias agroalimentarias como sustituto de la harina, como espesante y estabilizante en helados, sopas y salsa y, también, en la extracción de alcohol para la fabricación de aguardiente (vodka). Del almidón tratado se obtiene engrudo, empleado en la industria textil, embalajes para bolsas biodegradables, entre otros, y en la fabricación de pastas de papel. Además, se utiliza en la industria del contraplacado y paneles aglomerados, así como floculante (Meiss *et al.*, 2008). La patata se presenta ante el consumidor en diferentes formas, tales como: fresca, patata frita tipo "chips", patata pre-frita, congelada, copos y gránulos, derivados extrusionados y patatas pasteurizadas; también son utilizadas en la industria de biocombustibles y alimentación animal (Tejerina, 2009).

Tabla 1: Composición nutricional del tubérculo fresco (por 100 g de porción).

Energía (Kcal)	64
Agua (%)	82,9
Lípidos (%)	0,2
Carbohidratos (%)	18
Proteína (%)	1,8
Fibra (%)	1,2
Almidón (%)	18
Sodio (mg)	7
Potasio (mg)	430
Fósforo (mg)	52
Calcio (mg)	9
Hierro (mg)	0,6
Vitamina A (mg)	2
Vitamina C (mg)	18
Vitamina B1 (mg)	0,1
Vitamina B2 (mg)	0,04
Vitamina B3 (µg)	12
Vitamina B6 (mg)	0,44

Fuente: TACO, 2011.

La patata se cultiva en todo el mundo, ocupando el cuarto lugar en la producción de alimentos, con 329 Mt (FAOESTAT, 2009). El año 2008 fue declarado año internacional de la patata por la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) con el objetivo de crear una conciencia de su importancia en la lucha contra el hambre y la pobreza en todo el mundo. La producción mundial ha aumentando a una tasa media anual de 4,5 % en los últimos 10 años. En 2009, se destinaron cerca de 19 Mt ha al

cultivo de la patata, con unos rendimientos medios de 17,98 t ha^{-1}. China, India y Rusia son los países con mayores producciones (Tabla 2).

Tabla 2: Producción, superficie y rendimiento medio obtenido por los principales países productores de patata en 2008.

País	Producción (Mt)	Superficie (ha)	Rendimiento (t ha^{-1})
China	69,1	4.752.609	14,53
India	34,4	1.828.000	18,81
Federación de Rusia	31,1	2.182.400	14,26
Ucrania	19,7	1.411.800	13,92
EE.UU	19,6	422.901	46,27
Alemania	11,6	263.700	44,05
Polonia	9,7	488.700	19,85
Holanda	7,2	155.200	46,26
Francia	7,1	163.600	43,79
Reino Unido	6,4	155.000	41,43
Turquía	4,4	142.684	30,82
Egipto	4,0	145.000	27,58
Perú	3,7	282.100	13,17
Brasil	3,4	140.987	24,36
Japón	2,8	85.000	32,76
España	2,5	84.600	29,32
Colombia	2,3	123.659	18,37
Mundo	329,5	18326.242	17,98

Fuente: FAOESTAT, 2009.

En ese mismo año (2009), en lo que respecta al continente europeo, el volumen de la producción obtenido fue de 123 Mt (37% mundial), por una superficie de 6.275.549 ha. Los rendimientos medios se cifraron en 19,73 t ha^{-1}, siendo Federación de Rusia la mayor productora europea (31 Mt; 9,4 % mundial y 25,2% europea) (FAOESTAT, 2009).

España se sitúa como octava productora de la Unión Europea (UE) con una producción de 2,5 Mt (3,95 % de la producción de la UE) en una superficie de 84.600 ha (Tabla 2). La evolución del cultivo en los últimos años ha sido claramente recesiva, con un descenso en las producciones desde 1990, pasando de una área 271.300 ha, con una producción de 5,3 Mt (Figs. 1a, b), a la producción anteriormente comentada para 2009. En relación a los rendimientos, éstos han evolucionado de modo contrario, registrando las cifras máximas en 2007 (28,92 t ha^{-1}). El precio medio percibido por los agricultores ha aumentado (Fig. 1b), existiendo un desajuste entre la oferta y la demanda que dificulta la toma de decisiones de los agricultores a la hora de plantar, generando un mercado muy fluctuante.

España es un país de la UE eminentemente importador de patata, superado sólo por Alemania y Holanda (FAOESTAT, 2009). Las importaciones superaron a las exportaciones, en 2008, en 533.464 t (807.880 t *vs*. 274.416 t, respectivamente) (Fig. 1c). Del total importado en 2008, 738.381 t procedieron de la UE, siendo Francia el principal país proveedor. En cuanto a las exportaciones, se situaron en 274.234 t, siendo Portugal el principal destino de la patata española (MARM, 2009).

Por Comunidades Autónomas, las regiones con mayor superficie sembrada son, Castilla y León (21.187 ha) y Galicia, (17.902 ha) con patatas de media estación y tardías, y Andalucía, (17.462 ha) con patatas extratemprana, temprana y tardías (MARM, 2009) (Tabla 3).

Tabla 3: Ciclos de cultivo por CC.AA en España.

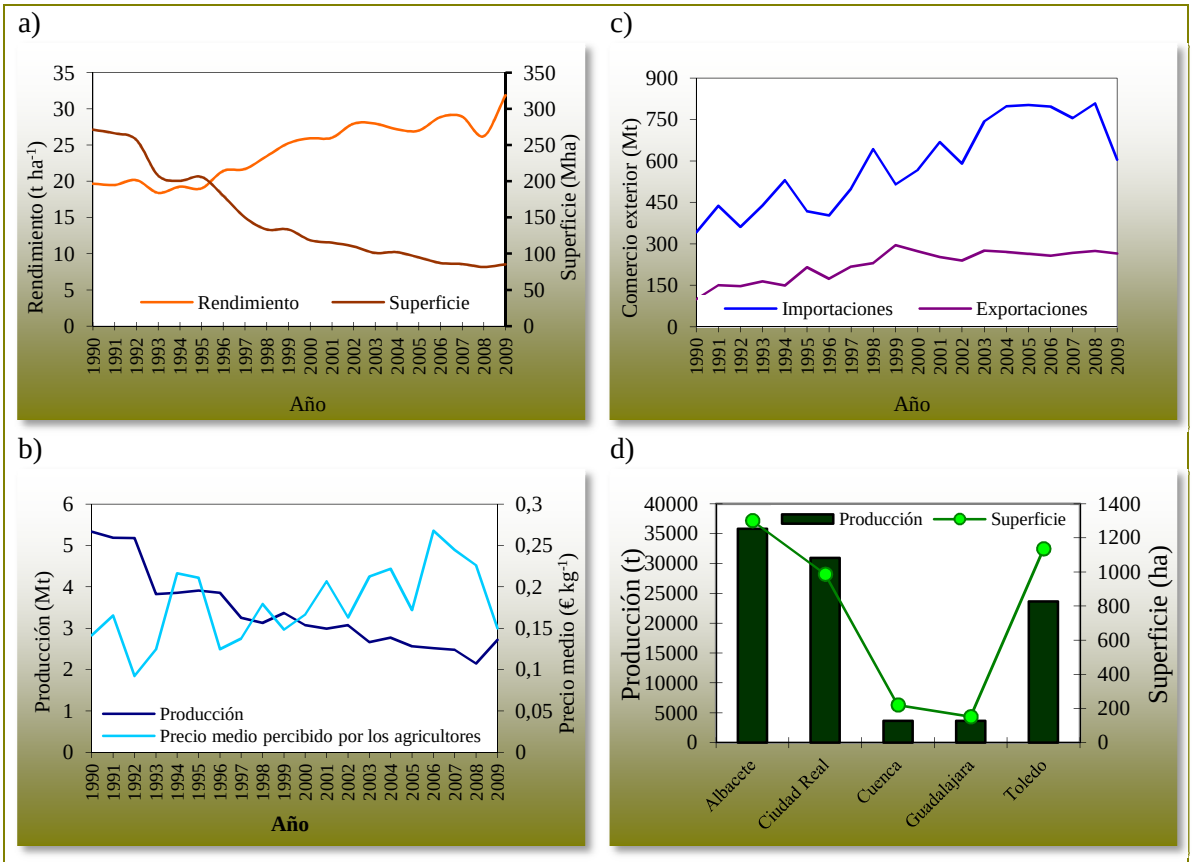
Ciclo	Plantación	Recolección	CC.AA
Extratemprana	oct-nov	feb-mar	Andalucía y Canarias
Temprana	dic-feb	abr-jun	Andalucía, Canarias, Valencia y Baleares
Media estación	abr-mayo	jul-sep	Castilla y León, Castilla-La Mancha y Galicia
Tardía	jun-jul	oct-nov	Andalucía, Castilla y León y Galicia

Fuente: Maroto, 1995; MARM, 2009.

En relación a Castilla-La Mancha, la producción de patata no es muy destacable dentro de España (3,83%), siendo Albacete (35.800 t), seguida de Ciudad Real (30.948 t) y Toledo (23.660 t), las tres provincias con mayor producción (Fig. 1d) Castilla-La

Mancha dedicó, en 2008, 3.792 ha a este cultivo, siendo Albacete (1.300 ha, 100 % regadío) y Toledo (1.135 ha, 96,8% regadío) las mayores superficies cultivadas (Fig. 1d).

El problema de inestabilidad del mercado de patata en España se observa en la figura 1b, sobre todo en los años de 2005 y 2006, donde el precio medio percibido por los agricultores osciló entre 0,17 € kg^{-1} a 0,26 € kg^{-1}, respectivamente. Sin embargo, con ayuda de algunos mecanismos y sistemas de calidad, como son las relaciones contractuales, la promoción del producto, la coyuntura de precios elevados, el seguro del cultivo contra riesgos meteorológicos, la implantación de la trazabilidad y la producción integrada permiten disminuir la fluctuación del mercado (Tejerina, 2009).



Fuente: MARM, 2009.

Figura 1: Serie histórica de a) superficie y rendimiento, b) producción y precios medios percibidos por los agricultores, c) comercio exterior de España y d) análisis provincial de producción y superficie de cultivo, en 2009.

2.2 Encuadramiento taxonómico y descripción botánica.

La patata pertenece a la familia botánica *Solanaceae* Juss., que cuenta con alrededor de 85 géneros y 2800 especies en todo el mundo. Las plantas de esta familia son de gran importancia para la alimentación (tomate, pimiento, etc.) y medicinal (jurubeba, alquequenje, etc.); también, se incluyen malas hierbas, con diferentes grados de toxicidad (belladona, dulcamara, etc.) y plantas ornamentales (petunia, datura, etc.) (Bradshaw *et al.*, 2007).

La patata pertenece al género *Solanum* L., dentro del cual existen alrededor de 2000 especies, de las cuales 187 son de patata. Dentro de las especies cultivadas varios taxonomistas reconocen solamente 8 (Ochoa, 1984; Huamán, 1986; Hawkers, 1990).

La patata cultivada es una especie tetraploide, *S. tuberosum* L. (Tabla 4). La más ampliamente difundidas es la *S. tuberosum* L. ssp. *andigenum* Juz. et Buk., y la *S. tuberosum* L. ssp. *tuberosum* (L.) Mill. La subespecie que se ha podido adaptar en Europa y los países nórdicos es la *tuberosum* (L.) Mill. por ser de fotoperíodo largo (Hawkers, 1990; Meiss *et al.*, 2008).

Tabla 4: Clasificación científica de la planta de la patata

Clasificación botánica	
Reino	*Plantae*
División	*Magnoliophyta*
Clase	*Magnoliopsida*
Orden	*Solanales*
Familia	*Solanaceae* Juss.
Subfamilia	*Solanoideae*
Tribo	*Solaneae*
Género	*Solanum* L.
- Especie diploides	*S. ajanhuiri, S.goniocalyx, S. phureja, S. stenotomun*
- Especies triploides	*S. chaucha, S. juzepozukii*
- Especies tetraploides	*S. tuberosum* L.
-- Subespecies	*tuberosum* (L.) Mill. *andigenum* Juz. *et* Buk.
- Especies pentaploides	*S. curtilobum*

***Fuente*:** Hawkers,1990; Bradsha *et al.*, 2007; Meiss *et al.*, 2008.

Es una planta herbácea (Fig. 2), cuyo hábito de crecimiento varía entre especies y subespecies (Huamán, 1986; Sobrino Vesperinas y Sobrino Illescas, 1992; Meiss *et al.*, 2008). Está provista de un sistema caulinar aéreo y otro subterráneo (Maroto, 1995).

El tallo principal crece directamente del tubérculo semilla madre (Fig. 2a) (Alonso, 1996), son herbáceos, aunque en las etapas avanzadas del desarrollo, la parte inferior puede encontrarse relativamente lignificada (Meiss *et al.*, 2008) y pueden producir ramas laterales (Sobrino Vesperinas y Sobrino Illescas, 1992).

Las hojas están distribuidas en espiral sobre el tallo y son compuestas (Fig. 2a) (Meiss *et al.*, 2008). Poseen más estomas en la superficie inferior que en la superior y su forma puede verse modificada de manera muy sustancial por la temperatura y el número de horas de luz (Alonso, 1996).

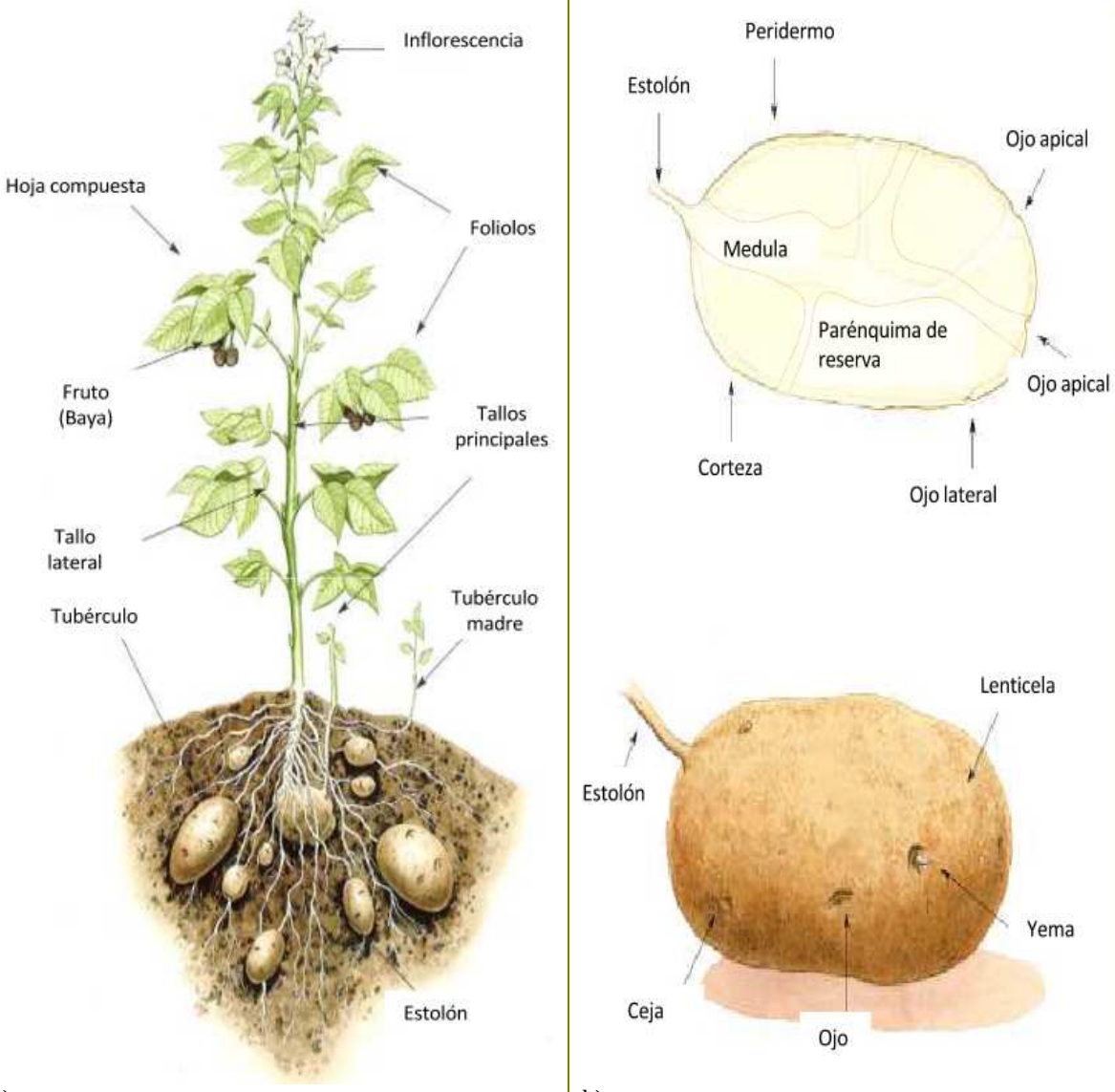
La planta de patata posee gran capacidad de brotación y emisión de nuevas hojas (Nurmberg *et al.*, 1999), lo que permite al cultivo altos niveles de defoliación a lo largo de su desarrollo sin que haya efectos significativos sobre el rendimiento (Caicedo *et al.*, 2010).

El pedúnculo de la inflorescencia, en general, está dividido en dos ramas, que posee flores bisexuales de número y colores diversos, según las variedades (Maroto, 1995; Alonso, 1996; Meiss *et al.*, 2008). Análogamente sucede en los frutos, denominados “baya”; cada fruto tiene numerosas semillas, conocidas como semilla “verdadera”, para distinguirlas de los “tubérculos-semillas” (Meiss *et al.*, 2008).

La patata tiene un sistema radicular débil, no profundizando más de 40 a 50 cm (Alonso, 1996). Se desarrollan a partir del tallo subterráneo, entre el tubérculo semilla y la superficie del suelo, y está formado por raíces adventicias (Maroto, 1995). El conocimiento de la evolución del crecimiento de las raíces, primero paralelas a la superficie y, posteriormente, verticales, es de gran importancia, con el fin de no producir daños en las de proyección vertical durante las labores de cultivo, evitando el desequilibrio entre el sistema radicular y la parte aérea (Sobrino Vesperinas y Sobrino Illescas, 1992).

Los tubérculos son tallos modificados y adaptados para almacenar reservas y para la propagación, y se forma en el extremo del estolón (Alonso, 1996). Un corte longitudinal del tubérculo, muestra, del exterior al interior las siguientes partes: peridermo o piel, corteza, sistema vascular, parénquima de reserva y médula (Fig. 2b). En la superficie de la piel, las lenticelas son responsables del intercambio gaseoso, y luego debajo del peridermo, la corteza es un tejido de reserva rico en proteína y almidón. El

sistema vascular conecta los ojos entre sí, y dentro del anillo vascular, se encuentra el parénquima de reserva, el tejido principal de almacenamiento y la mayor parte del tubérculo. La médula constituye la parte central del tubérculo (Meiss *et al.*, 2008).



Fuente: Meiss *et al*, 2008.
Figura 2: a) Morfología de la planta de la patata y b) partes de un tubérculo.

2.3 Aspectos fisiológicos de interés agronómico.

2.3.1 Temperatura y fotoperiodo.

La patata es considerada, generalmente, como un cultivo de clima frío, pero se adapta a temperaturas altas en latitudes tropicales. Cuando es cultivada bajo condiciones templadas, se producen alteraciones en la fisiología de la planta, que influye en su adaptación y rendimiento (Midmore, 1988). Hay un umbral de temperaturas para el crecimiento y desarrollo de la patata; así pues, su temperatura óptima de tuberización se encuentra alrededor de 18 °C, su cero de vegetación se sitúa entre 5 °C y 7 °C; los tubérculos sufren el riesgo de helarse a temperaturas inferiores a -2 °C (Beukema y van der Zaag, 1990).

Temperaturas elevadas (> 29 °C) pueden influir en la tuberización provocando el rebrote (Contreras, 2002), además, en general, las plantas cultivadas en temperaturas altas tienen hojas más pequeñas y numerosas que plantas similares cultivadas en temperaturas más frías (Dean, 1994). A temperaturas más altas la longevidad de la hoja es más corta (Midmore, 1988), aunque inicialmente tienen mayor área foliar por planta, pronto ésta llega a ser inferior (Dean, 1994).

El número de tubérculos por planta, las tasas de crecimiento y la materia seca del tubérculo y el índice de cosecha disminuyen a altas temperaturas diurnas y nocturnas, debido a los efectos directos de la temperatura sobre la fotosíntesis, respiración y tasas de conversión de azúcares a almidones en el tubérculo (Beukema y van der Zaag, 1990).

Lafta y Lorenzen (1995) investigaron la relación entre la actividad de las enzimas sintetizadoras de los carbohidratos de las plantas de patata y las altas temperaturas. Los autores muestran una reducción en la materia seca del tubérculo del 44-72% en plantas de genotipos tolerantes y susceptibles al calor, respectivamente, cultivadas a temperaturas diurnas/nocturnas de 31/29 ºC cuando comparadas a temperaturas de 19/17 ºC, resultando en un bajo índice de cosecha.

Steduto *et al.* (2012) indican que para un adecuado crecimiento de los tubérculos, el cultivo de la patata requiere temperaturas diurnas entre 25 y 32 ºC y nocturnas entre 12 y 18 ºC.

En relación al fotoperiodo, la respuesta a la longitud del día depende de las especies y de las variedades. La patata requiere, para desarrollar su área foliar, un fotoperiodo largo (más de 14 horas de luz) y en su proceso de tuberización un fotoperiodo corto (hasta 14 horas de luz) (Tabla 5) (Contreras, 2002). Bajo condiciones de días cortos las plantas muestran una tuberización temprana, estolones cortos y follaje pequeño, ocurriendo de forma contraria en caso de días largos (Dean, 1994), como muestra la tabla 5

Tabla 5: Efecto de la temperatura y duración del día en el cultivo de patatas.

Duración del día	Temperatura	
	Baja	Alta
Día largo (sobre 14 horas).		Rápido crecimiento de follaje. Mala formación de tubérculo.
Día corto (menos de 14 horas).	Rápida tuberización	Variedades de ciclo corto inician y desarrollan tubérculo antes que variedades de día largo.

Fuente: Contreras, 2002.

2.3.2 Nutrición.

La tabla 6 presenta el resumen de los principales efectos de los nutrientes en la patata. El nitrógeno (N) es importante para todas las estructuras de la planta, en particular para el crecimiento del follaje y del tubérculo, por lo que está relacionado con su producción. Además, favorece el aumento del rendimiento y del contenido de proteína en la planta (de la Morena *et al.*, 1994). No obstante, un uso excesivo de N retrasa la tuberización, aumenta la cantidad de azúcares reductores y disminuye la cantidad de materia seca y almidón (Cao y Tibbits, 1998), además de disminuir la producción al generar un crecimiento excesivo del follaje en detrimento del crecimiento del tubérculo (de la Morena *et al.*, 1994). La deficiencia en N se manifiesta en la planta con un crecimiento lento del follaje con hojas pequeñas y amarillentas (clorosis), y puede provocar una senescencia prematura afectando directamente el rendimiento (Giletto *et al.*, 2003). El déficit de N también puede resultar en tubérculos sobre-maduros en la cosecha, siendo más susceptibles a enfermedades, además de presentar baja calidad para procesado, debido a contenidos altos de azúcares y bajos de materia seca (Cao y Tibbits, 1998).

Tabla 6: Principales funciones de los nutrientes en la planta de la patata.

Elemento	Función
Nitrógeno (N)	Síntesis de proteína (crecimiento y rendimiento).
Fósforo (P)	División celular y formación de estructuras energéticas.
Potasio (K)	Transporte de azúcares y control estomático.
Calcio (Ca)	Mejoras en el almacenaje del tubérculo y reduce la susceptibilidad a enfermedades.
Azufre (S)	Síntesis de aminoácidos esenciales, cisteína y metionina.
Magnesio (Mg)	Parte central de la molécula de clorofila.
Hierro (Fe)	Síntesis de clorofila.
Manganeso (Mn)	Necesario en el proceso de fotosíntesis.
Boro (B)	Formación de la pared celular (pectinas y ligninas). Participa en el metabolismo y transporte de loa azucares.
Zinc (Zn)	Síntesis de auxinas.
Cobre (Cu)	Influencia en el metabolismo del nitrógeno y carbohidratos.
Molibdeno (Mo)	Es parte de la enzima retrato redactase y nitrogenase.

Fuente: Yara, 2003.

El fósforo (P) es más importante durante las primeras etapas de crecimiento de la planta, cuando éste es absorbido en mayores cantidades (Fageria *et al*., 1991). Facilita el crecimiento de las raíces y la formación del tubérculo (Venegas, 2002). La deficiencia en P provoca retraso del crecimiento de la planta, hojas arrugadas y con los márgenes enrollados hacia arriba, originando plantas que tienen menos masa radicular y que producen estolones de menor longitud (Yara, 2003). Además, los tubérculos son pequeños con bajos contenidos de materia seca y elevados de azúcares (Venegas, 2002).

Respecto al potasio (K), este nutriente reviste un papel importante en la síntesis de los azúcares y, específicamente, del almidón (Harris, 1978) y, por su gran movilidad, ayuda en la translocación de la glucosa a los tubérculos (Grewal y Singh, 1980). Ejerce gran influencia en las plantas bajo condiciones de estrés hídrico, defendiendo los tejidos contra los daños provocados por la sequía, asegurando la generación ininterrumpida de azúcares y almidón (Venegas, 2002). También influye en la textura, coloración y sabor de la patata, así como en la conservación de ésta, dando más firmeza en la piel y resistencia a los golpes (Grewal y Singh, 1980). Las plantas con deficiencia de K crecen más lentamente, y tienen hojas menores que carecen de una superficie lisa volviéndose arrugadas y curvadas hacia abajo (Fageria *et al*., 1991).

El calcio (Ca) es requerido para el fortalecimiento de los tejidos de sustentación y en la división celular (Harris, 1978). Niveles altos de Ca (0,25 % en la piel del tubérculo) disminuye la susceptibilidad a enfermedades, aumenta la calidad de la cosecha y mejora el almacenaje (Yara, 2003). Debido a la limitada movilidad del Ca, su deficiencia se manifiesta en las hojas nuevas o en puntos de crecimiento apical, presentando desarrollo foliar distorsionado (hojas irregulares) con su márgenes rizados (Venegas, 2002).

En el caso del magnesio (Mg), además de ser componente de la clorofila, y tener gran importancia en la fotosíntesis, también es fundamental en la etapa de crecimiento del tubérculo, favoreciendo su calidad (Yara, 2003). Las hojas viejas son las primeras en evidenciar su deficiencia presentando clorosis inter-venal (Harris, 1978), además de producir descensos en el rendimiento y una disminución del calibre de los tubérculos, especialmente en condiciones de estrés hídrico.

El azufre (S) es necesario durante todas las etapas de crecimiento del cultivo, y es particularmente importante para reducir el efecto de la sarna común (Venegas, 2002). Al contrario del Mg, su deficiencia se manifiesta en hojas más jóvenes, tornándose cloróticas (Fageria *et al*., 1991).

Entre los microelementos, los más importantes en la producción de patatas son el manganeso, el zinc y el boro. El zinc tiene influencia en la absorción de nitrógeno y en el metabolismo de la formación de almidones, además de promover la síntesis de auxina. El boro tiene funciones importantes en la asimilación del calcio, en la división celular, en el transporte de azúcares y en el metabolismo de los carbohidratos. Por último, el manganeso, cumple funciones de protección de los cloroplastos, en la síntesis enzimática y en la fotosíntesis (Yara, 2003).

2.4 Parámetros de calidad.

La calidad del tubérculo depende de diversos factores, tales como: la elección de la variedad, factores medioambientales, manejo del cultivo, la recolección y manipulación de los tubérculos hasta el almacenaje, y las condiciones del almacenamiento (Simón *et al*., 2004). Para el consumo en fresco, el tubérculo necesita ser consistente en forma y tamaño (entre 45 y 85 mm) con buena calidad de piel, libre de cualquier enfermedad o defecto, ojos superficiales, color de piel y pulpa según las preferencias del mercado, sin heridas, rajaduras, verdeamiento, hueco o sarna y con resistencia al lavado. La calidad interna incluye parámetros como consistencia, textura, harinosidad, ausencia de ennegrecimiento en la forma cruda o cocida y buen sabor (Nourian *et al.*, 2003). Cuando el contenido de materia seca en el tubérculo sobrepasa el 18 % a 20 %, éstos son más susceptibles a daños y golpes y pueden desintegrarse cuando son hervidos durante el cocinado (Sparrow y Chapman, 2003).

Al producir patatas para la industria de transformación, la calidad se expresa en términos de rendimiento del proceso, es decir, de producto elaborado que se produce por 100 kg de patatas en fresco. El principal objetivo del productor es conseguir un alto rendimiento en la producción, pero si el destino de la producción es industrial, los rendimientos más altos no siempre llevan a la mayor calidad, ya que el rendimiento industrial depende de otros factores, tales como: altos contenidos de materia seca, tamaños homogéneos de tubérculo, bajo contenido de azúcares reductores y pocos defectos. Para la producción de patatas fritas y *chips*, es necesario un alto contenido de materia seca con el fin de obtener una buena calidad en el color tras el proceso de frito. La industria prefiere patatas con un 20 % a un 25 % de materia seca y valores de azúcares reductores entre 0,15 % a 0,25 %, originando que el producto final tenga una coloración oscura (Nourian *et al.*, 2003). Simón *et al*. (2004) destacaron la importancia de disponer de una nutrición equilibrada para alcanzar un compromiso entre la producción y la calidad, tras realizar un ensayo con patata para analizar la influencia del nitrógeno sobre la calidad de las patatas, como se expone en la tabla 7.

Tabla 7: Tratamiento de abonado, producción, calibres y materia seca en el cultivo de la patata.

Abonado			Producción	Calibres			Materia
N	P	K	(Kg ha^{-1})	≤ 40	40-90	≥ 90	seca (%)
287	175	350	60.000	2	90	8	19
110	40	170	56.000	3	94	3	21
60	40	170	44.000	5	95	0	22

Fuente: Simón *et al*. (2004).

2.5 Crecimiento y desarrollo.

La producción vegetal se basa en el proceso biológico de la fotosíntesis cuya finalidad es la conversión de la energía luminosa en energía química almacenada en los productos agrarios. La capacidad de un cultivo para producir, crecer y desarrollarse está limitada por la cantidad de energía luminosa disponible, la duración del ciclo agronómico,

la estructura de la cubierta vegetal verde (extensión y eficiencia asimiladora, principalmente de las hojas) y la disponibilidad de agua, nutrientes y CO_2 (Fabeiro, 1995).

Desde principios del siglo XX las relaciones entre los factores del medio con el crecimiento y desarrollo de los cultivos, y por tanto, el rendimiento de los mismos, han sido objeto de numerosos estudios (Blackman, 1919; Briggs *et al.*, 1920; Fisher, 1920; Gregory, 1926). El análisis del crecimiento y desarrollo intenta determinar la influencia del clima y de otros factores ambientales sobre los procesos fisiológicos que determinan el rendimiento, y se presenta como una perspectiva sobre las posibilidades de aumentar la producción vegetal (Botella *et al*., 1997).

La ventaja del análisis del crecimiento está en el poder representar el desarrollo del cultivo durante todo el ciclo biológico o agronómico, mediante un control de las variables fácilmente cuantificable y muy influenciada por las modificaciones ambientales, como se recoge en los datos primarios de materia seca y superficie foliar.

El incremento del peso seco de una planta es el resultado conjunto de la actividad fotosintética neta de la cubierta vegetal y del crecimiento de los órganos vegetativos y reproductores. Numerosos investigadores han estudiado para distintos cultivos el ritmo de acumulación de materia seca, en relación al tiempo transcurrido desde la nascencia o los grados día acumulado, así como la forma en que la materia seca se distribuye entre los diferentes órganos de la planta a lo largo del ciclo vegetativo (Losavio *et al*., 1985; Swank *et al*., 1987; Fabeiro, 1995; Botella *et al*., 1997; Pereira, 2006).

El crecimiento y desarrollo de la planta puede ser analizado a través de diferentes metodologías, entre ellas podemos citar: 1- las medidas de dimensiones lineales (alto y largo de la planta), 2- número de órganos (conteo de hojas, flores, frutos, entre otros), 3- medidas de la superficie fotosintéticamente activa, 4- análisis de la materia fresca y seca, 5- escalas fenológicas (BBCH) 6- análisis del grado de cobertura y 7- índices de crecimiento.

La escala BBCH (**B**iologische **B**undesarstalt, Bundessoztenamt and **CH**emical Industry) ampliada es un sistema numérico que permite establecer una codificación uniforme para identificar las fases de crecimiento de todas las especies de plantas (Meier *et al*., 2009). De acuerdo con esta escala, el ciclo completo de desarrollo de la planta se divide en 10 estados principales claramente definidos (0- brotación, 1-desarrollo de las hojas, 2- formación de brotes laterales, 3- crecimiento longitudinal, 4-desarrollo de las partes vegetativas cosechables, 5- aparición del órgano floral, 6-floración, 7- formación del fruto, 8- maduración de frutos y semillas y 9- senescencia), cada uno de estos a su vez se subdivide en los estados secundarios del desarrollo particulares de cada especie (Hack *et al*., 1993; Meier *et al*., 2009).

Nuevas técnicas y equipos fueron desarrolladas para el análisis del grado de cobertura. Como ejemplo, la toma de fotografías aéreas por vehículos aéreos no tripulados (López, 2012). En esta década, existe una creciente demanda en la utilización de dichos vehículos conocido como UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) o como *drones*, para el seguimiento del crecimiento del cultivo a partir de interpretaciones de imágenes tomadas a baja altura (López, 2012).

Aunque los *drones* se han usado principalmente con motivos militares, en los últimos años ha habido un crecimiento de las aplicaciones civiles, lo cual se destaca el uso agrícola. Los Estados Unidos e Israel fueron los pioneros en el desarrollo de esta tecnología. La cuota de mercado de los productores Americanos ronda el 60% y se prevé un crecimiento de un 5 al 10% en 2016. *Northrop Grumman* y *General Atomics* son las empresas dominantes en la industria. En 2006 la cuota de mercado europeo era de sólo un 4% (López, 2012).

Las funciones de control de estos vehículos se pueden clasificar como: 1- mediante radio control (*on-board*) o control remoto (*off-board*) y 2- controlados desde una ubicación remota (*Ground Control Station* – GCS) o mediante planes de vuelos pre-programados (Carretero, 2011).

2.5.1 Comportamiento del crecimiento vegetal.

Según Hunt, 1990, el crecimiento y la productividad de un cultivo están determinados por cinco características fisiológicas del crecimiento: 1- la cantidad de energía luminosa interceptada por la cubierta vegetal, 2- la eficiencia de la energía luminosa interceptada en la producción de nueva materia seca, 3- la partición de la nueva materia seca asignada por los órganos de la planta, 4- la proporción de pérdida de materia seca, por cualquier causa y 5- la duración del crecimiento del órgano de interés de la planta.

Existen varios factores del ambiente y del manejo que afectan el crecimiento y desarrollo (Dogliott *et al*., 2011). Estos factores varían desde la respuesta al fotoperiodo, temperatura y radiación incidente, características de las distintas variedades de plantas, disponibilidad de agua y nutrientes, densidad de plantación, edad fisiológica de la semilla (tubérculo madre), además de las actividades y niveles de hormonas, que en general, son respuestas a las condiciones ambientales.

En general, las plantas presentan tres fases de crecimiento determinadas por el peso de materia seca y el tiempo. Este comportamiento corresponde a una curva tipo sigmoideo caracterizada por una fase logarítmica, que abarca desde la emergencia hasta el inicio de la etapa de desarrollo vegetativo (donde el peso aumenta de forma exponencial con el tiempo); una fase lineal (donde el crecimiento vegetativo continua a una velocidad casi constante) por lo que se tiene la mayor demanda de agua y nutrientes; y una última fase de estado constante (donde se acumula la mayor cantidad de materia seca). En esta última fase de madurez fisiológica se considera que las ganancias y pérdidas de materia seca ya están equilibradas (Gardner, 1990).

2.5.2 Índices de crecimiento.

Existen dos enfoques para el análisis del crecimiento vegetal, el método clásico y el funcional. En el primero se calculan los índices de crecimiento medios para el periodo de tiempo entre dos muestreos consecutivos, a lo largo del cual se suponen constantes y, normalmente, se representan mediante histogramas (Sestak *et al*., 1971; Hunt, 1978). El método funcional o dinámico permite la descripción del crecimiento como un proceso continuo, derivando los índices de crecimiento de las funciones matemáticas que representan la evolución en el tiempo de los datos primarios de crecimiento (materia seca y área foliar) (Hughes y Freeman, 1967; Richards, 1969; Hunt, 1978; Venus y Causton, 1979; France y Thornley, 1984). Los índices de crecimiento más extensamente utilizados en la literatura se recogen en la tabla 8.

Tabla 8: Índices del crecimiento.

Denominación en español	Método clásico	Método funcional	Unidad
Índice de Área Foliar (IAF)	LA/S		$m^2\ m^{-2}$
Duración del Área Foliar (DAF)	$(IAF_1 + IAF_2)*(t_2-t_1)/2$	IAF dt	día
Relación de Área Foliar (RAF)	$((IAF_2/MST_2)+(IAF_1/MST_1))/2$	IAF /MST	$cm^2\ g^{-1}$
Tasa de Asimilación Neta (TAN)	$((MST_2-MST_1)*(\ln IAF_2-\ln IAF_1)) / ((t_2-t_1)*(IAF_2- IAF_1))$	(dMST/dt)/(IAF)	$g\ m^{-2}$ día^{-1}
Velocidad de Crecimiento Relativo (VCR)	$(\ln MST_2-\ln MST_1)/(t_2-t_1)$	(dMST/dt)/(MST)	$g\ g^{-1}$ día^{-1}
Velocidad de Crecimiento del Cultivo (VCC)	$(MST_2-MST_1)/(t_2-t_1)$	dMST/dt	$g\ m^{-2}$ día^{-1}

LA: Superficie foliar (m^2), S: Superficie del terreno (m^2), t: Días desde la siembra, MST: Materia seca total ($g\ m^{-2}$).

Fuente: Hunt, 1978.

2.5.2.1 Índice de área foliar (IAF).

Se define como la relación entre la superficie foliar (LA) y la superficie del terreno donde se asienta dicho cultivo (Watson, 1947). Es una medida que refleja la capacidad del cultivo de interceptar la radiación solar y, por tanto, de realizar la fotosíntesis.

La evolución del IAF puede ser ajustada a distintas funciones matemáticas: polinomiales (llegando hasta el grado seis), expopolinomiales, exponencial, logístico o de otro tipo (Sivukamar y Shaw, 1978; Clawson *et al*., 1986; Castrignano *et al*., 1987; Kawakami y Iwama, 2009; Patanè, 2011). Hughes y Freeman (1967) recomiendan funciones expopolinomiales de tercer grado para ajustar la evolución de IAF.

En la literatura se recogen valores variables de IAF máximo en el cultivo de patata, según distintas condiciones de ensayo. Fernández (2008), obtuvo valores entre 1,4 y 2,6 $m^2\ m^{-2}$ estudiando la variedad Chieftain según el régimen hídrico, a los 51días desde la emergencia. Borrego *et al.* (2000) presentan máximos entre 5 y 7 $cm^2\ cm^{-2}$ según la variedad en las mismas condiciones de ensayo, entre 78 y 102 días desde la emergencia.

En Bolivia, Quispe *et al.* (1997) cultivando tres especies de tubérculos andinos, observaron valores de IAF máximo de 4,5 $m^2\ m^{-2}$ para la patata variedad Waych`a. Los valores máximos de este índice, muy variable según la densidad poblacional se mueven entre 3,54 y 4,77 $m^2\ m^{-2}$ para de la Casa *et al.* (2011).

2.5.2.2 Duración del área foliar (DAF).

Este índice refleja la permanencia en el tiempo de la superficie foliar funcional y, por tanto la capacidad de la planta llevar a cabo la fotosíntesis (Watson, 1952). Su valor expresa el número de días que un metro cuadrado de superficie foliar permanece en un metro cuadrado de terreno. La nutrición mineral equilibrada y una adecuada disponibilidad hídrica favorecen la consecución del valor máximo de IAF, influyendo considerablemente en el índice DAF (de Juan *et al*., 1992).

Castellanos *et al.* (2010), estudiando la relación fuente-demanda de cuatro variedades de patata, calcularon la duración del área foliar, cifrándola entre 70 y 98 días, según el cultivar.

2.5.2.3 Relación del área foliar (RAF).

Se define como la relación matemática del área de tejido asimilador respecto a la materia seca de la biomasa total, y se deriva de las curvas que recogen la evolución de la materia seca total (MST) y el IAF. Representa la integración de los efectos de la translocación de asimilados a las hojas y la proporción de los mismos entre el área foliar y el peso de la planta (Scott y Batchelor, 1979).

El índice es creciente hasta su valor máximo en la fase de desarrollo de hojas y formación de brotes laterales (Segura *et al.*, 2006). A partir de este valor máximo, el RAF es decreciente, indicando que conforme el ciclo progresa se va acumulando, proporcionalmente, menos materia seca en las hojas, aunque el IAF siga aumentando (Castellanos *et al.*, 2010). Los mismo autores investigando diferentes variedades de patata encontraron valores máximos de 105 a 135 cm^2 g^{-1} entre 28 y 42 días desde la emergencia (DDE).

La disponibilidad hídrica influye directamente en este índice, puesto que durante el crecimiento vegetativo plantas sometidas a déficit desarrollan hojas más pequeñas y en menor número, además en la senescencia las pérdidas de hojas es más acentuada en las plantas menos regadas.

2.5.2.4 Tasa de asimilación neta (TAN).

Es una medida de la eficiencia fotosintética de una comunidad de plantas, y se define como la producción de materia seca por unidad de superficie foliar y por unidad de tiempo (Gregory, 1926; Evans, 1972; Gardner *et al.*, 1990). La TAN, en general, presenta mayores valores al comienzo del ciclo del cultivo debido a que las plantas se encuentran en el inicio de la etapa fenológica de desarrollo de hojas (Segura *et al.*, 2006).

De acuerdo con Aguiar-Netto *et al.* (2000), el comportamiento de la TAN en la patata resulta diferente al observado en otras especies vegetales. Ello se debe a que la acumulación de reservas ocurre en los tubérculos y no en la parte aérea de la planta, relación por la cual la TAN en el cultivo de la patata puede incrementar al final del ciclo debido al efecto combinado de dos factores. Por una parte, las pérdidas relativas por respiración total de la planta decrecen a consecuencia de que la parte aérea, responsable de las mayores tasas de respiración, sufre un descenso debido a la senescencia (Botella, 1993). Junto a esto, este incremento de la TAN también puede ser interpretado como una respuesta del IAF expuesto, que, antes del inicio de la senescencia, se mantenía sombreado por las hojas nuevas. Por otra parte, la exposición de los tallos a radiación solar también puede contribuir a este incremento en senescencia (López, 2004).

Este índice está directamente influido por los factores ambientales, principalmente la temperatura y la intensidad luminosa, puesto que estos factores afectan los procesos de fotosíntesis y respiración Castellanos *et al.* (2010). Los manejos del cultivo como el déficit hídrico y alta densidad de plantas también afectan a este índice reduciendo los valores de TAN.

Mora-Aguilar *et al.* (2006) encontraron valores variables de la TAN según la variedad de patata cultivada. Estos valores oscilan entre 0,01 y 0,10 g cm^{-2} $día^{-1}$ durante la etapa vegetativa (7 a 14 DDE), aumentan a 0,17 - 0,30 g cm^{-2} $día^{-1}$ al inicio de la tuberización (28 a 50 DDE), alrededor de 0,21 - 0,57 g cm^{-2} $día^{-1}$ durante la tuberización (57 a 64 DDE) y a partir de los 70 DDE, disminuyen rápidamente hasta ser nulos.

Gaitán y González (1999) obtuvieron valores máximos de TAN entre 0,12 y 0,18 g cm^{-2} $día^{-1}$ y Castellanos *et al.* (2010) entre 0,08 y 0,12 g cm^{-2} $día^{-1}$.

2.5.2.5 Velocidad de crecimiento relativo (VCR).

Expresa la capacidad de la planta en el tiempo para producir materia seca, respecto a la ya producida anteriormente (Botella, 1993).

En la patata (Collins, 1977; Dripps y Smilowitz, 1989; Aguiar-Netto *et al*., 2000; Mora-Aguilar *et al*., 2006) la VCR toma su valor máximo al inicio del desarrollo del cultivo, y conforme transcurre el ciclo tiende a disminuir y anularse, e incluso pueden medirse valores negativos, principalmente en los órganos aéreos.

Este índice está muy afectado por factores ambientales y cualquier limitación de éstos produce efectos negativos. La tendencia de descenso descrita puede ser compensada por condiciones que se vuelvan más favorables al cultivo, lo cual, implica un manejo agronómico eficiente en el suministro de agua y nutrientes como indican Aguiar-Netto *et al.* (2000) y Rajwade *et al.* (2000).

Mora-Aguilar *et al*. (2006) describen valores máximos variables de VCR en la planta completa (0,20 a 0,39 g g^{-1} $día^{-1}$), en los órganos aéreos (0,20 a 0,30 g g^{-1} $día^{-1}$), en los órganos subterráneos (0,20 a 0,39 g g^{-1} $día^{-1}$) y en los tubérculos (0,08 a 0,30 g g^{-1} $día^{-1}$), tendiendo a disminuir en todos los cinco genotipos estudiados en condiciones de secano en Metepec, Estado de México.

2.5.2.6 Velocidad de crecimiento del cultivo (VCC).

También conocida como tasa de crecimiento absoluto, es el índice que representa la productividad del cultivo, es decir, la eficiencia productiva de biomasa por unidad de superficie de suelo y por unidad de tiempo (Hunt, 1978).

Castellanos *et al.* (2010), analizaron distintas variedades de patata, observaron que los incrementos en la VCC (variando de 24,3 a 43,6 g m^{-2} $día^{-1}$) durante el ciclo de cultivo, estuvieron relacionados con aumentos elevados en la acumulación de materia seca en los tubérculos, condición relevante si se tiene en cuenta que son los órganos de interés comercial de esta especie. Desde este modo, la respuesta observada en este índice de crecimiento está relacionada con el rendimiento obtenido.

En general, este índice presenta menores valores por efectos negativos de altas temperaturas (especialmente las nocturnas) (Lafta y Lorenzen, 1995), restricciones hídricas y altas densidades de plantas (Mora-Aguilar *et al*., 2006).

Quispe *et al*. (1997) publicaron que la patata tuvo la máxima VCC a los 110 días desde la siembra, llegando a 26,9 g m^{-2} $día^{-1}$, determinando el punto máximo de producción de materia seca que llegó al cultivo.

2.5.3 Modelación del crecimiento.

La modelización matemática es comúnmente utilizada en el área agronómica como una metodología en los estudios e interpretación de procesos fisiológicos. Los modelos matemáticos de crecimiento pueden ser definidos como modelos no lineales que utilizan parámetros constantes para describir la evolución de materia seca de la planta.

En la tabla 9 se recogen los principales modelos de regresión no lineal utilizados para describir las curvas de crecimiento. En general, estos modelos describen una trayectoria asintótica de la variable dependiente peso en función de la variable independiente tiempo (López, *et al.*, 2000; Ruiz *et al*., 2012). Principalmente, la diferencia entre los modelos es la definición del punto de inflexión de la curva que proporciona una forma sigmoidal de la misma, si bien en algunos modelos este punto puede no existir. Para todos los modelos el parámetro *a* representa el peso asintótico, el parámetro *b* es una constante de integración, el parámetro *c* representa la velocidad de crecimiento y los modelos que presentan el parámetro *d* tienen punto de inflexión

variable. Los demás modelos o presentan punto de inflexión fijo o no lo poseen (Silveira, 2010).

Tabla 9: Modelos de regresión no linear que describen curvas de crecimiento.

Modelos de crecimiento	Autores
$y = a\left(1 - e^{(c.b-c.t)}\right)$	Mitscherlich (1919)
$y = a\left(1 - b.e^{(-c.t)}\right)$	Brody (1945)
$y = a\left(1 - b.e^{(-c.t)}\right)^3$	Von Bertalanffy (1957)
$y = a/\left(1 + e^{(b-c.t)}\right)^{(1/d)}$	Richards (1959)
$y = a/\left(1 + d.e^{(c.b-t)}\right)^{(1/d)}$	Schnute (1981)
$y = a - b.e^{-c.t}$	Meloun y Militky (1996)
$y = \left(a.c^d + a.t^d\right)/\left(c^d + t^d\right)$	Lopez *et al*. (2000)

y: variable dependiente peso, t: variable independiente tiempo, a, b, c y d son coeficientes del ajuste del modelo.

Los modelos de crecimiento aplicados y más comúnmente utilizados por diversos autores son los modelos Logístico (Ec. 1) y Gompertz (Ec. 2).

$$y = a/\left(1 + e^{(b-c.t)}\right) \quad (1)$$

$$y = a.e^{-e^{(b-c.t)}} \quad (2)$$

Siendo: y, variable dependiente peso; t, variable independiente tiempo, a, b y c son coeficientes del ajuste del modelo.

El modelo logístico se planteó inicialmente para los estudios de desarrollo y proyecciones de la población humana, más adelante se aplicó a estudios de crecimiento de poblaciones zootécnicas y luego a estudios de modelización del crecimiento de cultivares en general (Borges, 2008). La característica fundamental del modelo logístico de crecimiento es el hecho de que la derivada logarítmica, donde puede ser interpretada fisiológicamente como la tasa de crecimiento relativo, decrece linealmente en función del tiempo, es decir, cuando una planta alcanza la mitad de su peso máximo la velocidad de crecimiento alcanza a su máximo valor. A partir de este punto la velocidad empieza a decrecer tendiendo a cero (Ratkowski, 1983; Barker *et al*., 2010).

La curva de crecimiento del modelo Gompertz es una curva sigmoidal y es similar a la curva de crecimiento del modelo Logístico, sin embargo, el hecho de describir que la tasa de crecimiento relativo decrece exponencialmente en función del tiempo, lo diferencia del modelo Logístico. En comparación con el modelo Logístico, el modelo Gompertz muestra un crecimiento más rápido al inicio, pero una aproximación más lenta al peso máximo (Barker *et al*., 2010) (Fig. 3).

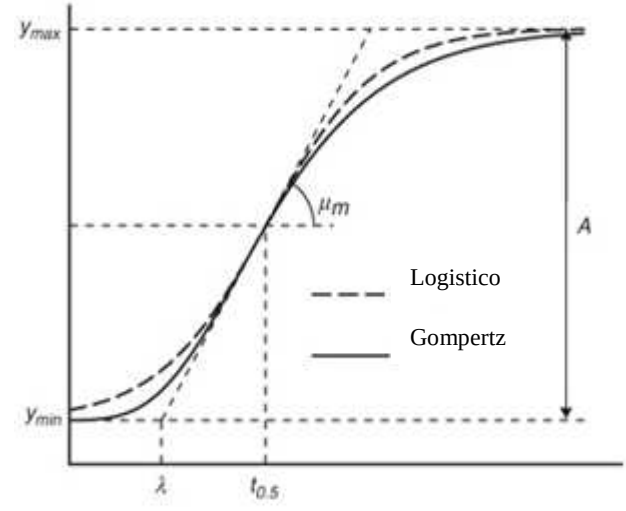


Figura 3: Representación gráfica de las curvas de los modelos Logístico y Gompertz.

Para la modelización de la evolución del IAF, en general, se recogen modelos de regresión simples no lineales, destacando funciones exponenciales, polinomiales y

expopolinomiales que son utilizadas con éxito por diversos autores presentando coeficientes muy significativos (Tei *et al*., 1996; Botella *et al*., 1997; Rinaldi *et al*., 2010).

Debido a diferencia entre los modelos de crecimiento, cuando éstos son ajustados a un mismo conjunto de datos, es necesario el uso de herramientas estadísticas para compararlos y elegir aquel que mejor describe el comportamiento del cultivo estudiado, es decir, el modelo que presenta el menor desvío entre los datos medidos y observados.

2.5.4 Modelos de simulación del crecimiento.

Un modelo de simulación es una representación de los mecanismos que gobiernan un fenómeno natural. El modelaje constituye una herramienta indispensable en la creación de sistemas de soporte computarizados para la toma de decisiones, los cuales a su vez le permiten a los productores y profesionales del sector generar políticas de manejo dentro de un sistema productivo y a los investigadores aplicar un método para sintetizar el conocimiento científico (Tedeschi, 2006).

Tabla 10: Modelos de simulación de crecimiento de los cultivos

Modelo	Caracterización
SUBSTOR	Simula el desarrollo utilizando datos de temperatura, precipitación, radiación solar, perfil del suelo y detalles de las prácticas agronómicas.
AQUACROP	Evalúa la respuesta del rendimiento de los cultivos al déficit hídrico. Debe ser cargado al modelo de crecimiento una serie de componentes del suelo (balance hídrico), planta (fenología, área del dosel, enraizamiento profundo, producción de biomasa y rendimiento en la cosecha) y atmosfera (régimen térmico, precipitación, demanda evaporativa y concentración de dióxido de carbono).
DACOM Plant Plus	Fue desarrollado inicialmente para toma de decisiones de control de enfermedades (*Phytophthora infestans*), pero el modelo fue ampliado para manejo del riego con bases en datos de evapotranspiración.
LINTUL-POTATO	Cuantifica el efecto de la temperatura y fotoperiodo en el crecimiento.
CROPSYST	Simula el balance hídrico del suelo, balance de nitrógeno del suelo-planta, desarrollo, crecimiento y rendimiento de los cultivos, acumulación de biomasa, producción de residuos y descomposición y erosión.

Los primeros trabajos en este tema se basan en modelos puramente empíricos, como los propuestos por Hooker (1907), Azzi (1959), Turc (1972), y más recientemente modelos que evalúan posibles riesgos y permiten predicciones destinadas a los agricultores. Junto a estos modelos, los estudios de respuesta del cultivo a condiciones ambientales diversas mediante simulaciones de situaciones controladas, se basan en las relaciones entre los factores medioambientales y el rendimiento de los cultivos.

Existen modelos extensos que integran submodelos de varios procesos en el sistema suelo – planta – atmósfera (fotosíntesis, fenología, balance hídrico, producción de biomasa, índice de cosecha, etc.): 1 - el primer nivel corresponde a los modelos que responden sólo a variables climáticas; 2 - en el segundo nivel incluye un balance de agua en el suelo y los efectos de la disponibilidad de agua en el crecimiento y el rendimiento de los cultivos y 3 - en el tercero nivel se incluye la disponibilidad, interacción y efecto de la fertilización nitrogenada, y en el último nivel se incluye otros factores limitantes, como otros nutrientes, suelo y enfermedades.

La validación de modelos requiere gran cantidad de información detallada de los cultivos y del medio, y la disponibilidad y la calidad de los datos son las principales limitaciones para su aplicación. Además, los modelos deberían simular con precisión el

crecimiento y rendimiento de un cultivo para cualquier localización, pero está sujeto a error. Es por tanto esencial la comparación entre los resultados simulados y los observados en experimentación.

Entre los muchos modelos que describen el crecimiento de distintas especies cultivadas, para el cultivo de la patata figuran los listados en la tabla 10.

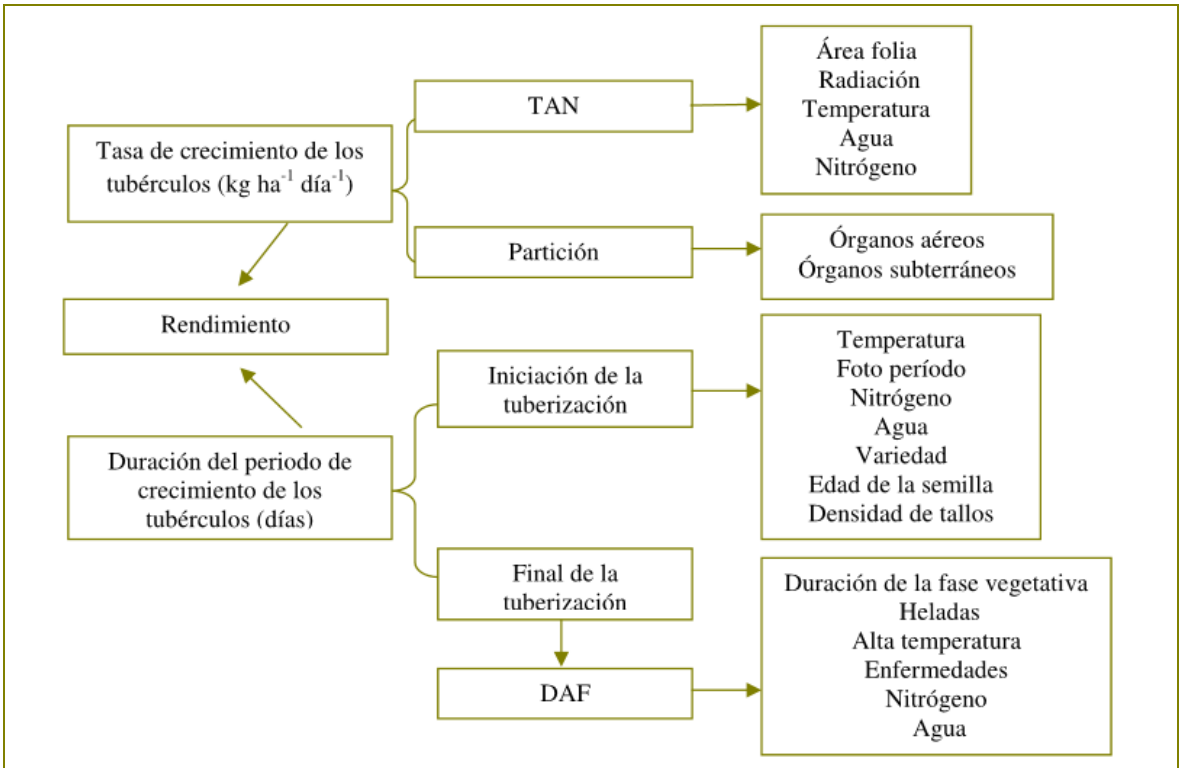
2.5.5 Rendimiento y sus componentes.

La producción de patata se puede desglosar en los siguientes componentes: densidad poblacional, número de tallos y tubérculos, rendimiento total (t ha^{-1}) y comercial (t ha^{-1}) (Fernandéz, 2008).

Diversos autores han estudiado los componentes del rendimiento de la patata. Borrego *et al*. (1999) definieron el rendimiento como una transformación de energía llevada a cabo, principalmente por tres procesos: a) absorción, por el follaje, de la radiación solar incidente, b) conversión de la energía radiante interceptada, a energía química potencial (biomasa) y c) partición de la biomasa entre las partes cosechables y el resto de la planta.

De acuerdo con Dogliotti *et al*. (2011) el rendimiento, en último término, depende de la tasa de crecimiento de los tubérculos y del periodo de crecimiento de éstos (Fig. 4).

Rodríguez *et al*. (2004) afirmaron que cuando un cultivo crece con altas densidades de población, el rendimiento promedio decrece como resultado de la competencia entre las plantas vecinas por el agua y los nutrientes minerales, la radiación fotosintéticamente activa, el dióxido de carbono y el oxígeno. La proximidad de plantas vecinas afecta de manera importante la actividad fotosintética y, por lo tanto, la acumulación y partición de asimilados hacia los tubérculos durante la formación y el llenado (Ballaré *et al*., 1995).



Fuente: Dogliotti *et al*., 2011.
Figura 4: Formación del rendimiento en el cultivo de patata.

La densidad de la patata consta de dos componentes: el primero es el marco de plantación (número de plantas por m^2) y el segundo componente es el número de tallos por planta, denominada densidad de tallos (Weirsema, 1987).

La densidad de tallos afecta al número y el tamaño del tubérculo y la tasa de multiplicación (número de tubérculo producido de un tubérculo-semilla), que está determinada por el número de tallos que emergen y sobreviven. Así, una alta densidad de tallos aumenta el rendimiento hasta cierto nivel y reduce el tamaño promedio de los tubérculos y la tasa de multiplicación (Weirsema, 1987).

De acuerdo con los resultados y conclusiones alcanzados en diversos trabajos, los rendimientos de la patata son variables según la variedad y las condiciones de ensayo. A título de ejemplo, podemos señalar un rendimiento total de 77 t ha^{-1} y comercial de 59 t ha^{-1} en regadío, y rendimiento total de 53 t ha^{-1} y comercial de 38 t ha^{-1} sin aporte de agua, obtenidos por Fernández (2008) en plantas cultivadas en diferentes regímenes hídricos en el municipio de Canelones, Uruguay.

El índice de cosecha (IC) es utilizado para conocer la eficiencia con que la planta concentra su producción de materia seca en el tubérculo. Es definido como la relación entre el peso seco del tubérculo y el peso seco total de la planta (Donald, 1962). En el caso de la patata existe una gran variación dependiendo de la variedad. En un ensayo en secano, en municipio de Chapingo, México, Mora-Aguilar *et al*. (2006) encontraron valores de IC entre 0,48 y 0,92 para diferentes genotipos. En general, los genotipos precoces de patata ofrecen valores de IC más altos (Jefferies y Mackerron, 1993; Errebhi *et al*., 1999; Mora-Aguilar *et al*., 2006).

2.5.6 Modelos y funciones de respuesta el agua.

La productividad del agua es un concepto importante para entender el complejo sistema suelo, planta, atmósfera y diseñar buenas prácticas de conservación y uso eficiente (Koohafkan y Stewart, 2008). Uno de los métodos para lograr el incremento de la productividad del agua es el estudio de las funciones de producción (agua *vs* rendimiento) y a partir de esto, utilizarla para planificar un manejo adecuado entre un grupo de cultivos en condiciones de déficit hídrico (Dehghanisanij *et al*., 2009).

La función de producción agua rendimiento representa la relación entre el rendimiento y los diversos factores que intervienen en la producción. Estas funciones (Tabla 11) expresan relaciones que permiten predecir la producción a partir del consumo de agua, así como la eficiencia de uso del agua evapotranspirada (Liu *et al*., 2002; Robaina *el al*., 2011). Aunque la evapotranspiración (ET) es el parámetro hídrico que se puede asociar más directamente con la producción en el campo, el volumen de agua aplicada mediante el riego es una variable independiente de gran interés para los ingenieros, regantes y economistas agrarios.

Las funciones que correlacionan la producción y el agua aplicada con el riego son de gran utilidad, porque establecen el consumo óptimo desde el punto de vista económico (Stewart y Hagan, 1973; Shani *et al*., 2009).

Para la obtención de estos modelos o el ajuste de sus parámetros es necesaria la realización de ensayos experimentales para condiciones locales, donde el agua es la variable a estudiar en diferentes tratamientos hídricos. Los resultados obtenidos deben someterse a análisis de regresión para encontrar la función matemática que explica la variación en el rendimiento mediante la variación en el consumo de agua (Fabeiro, 1995).

La forma de la función y la pendiente de la misma son únicas para cada cultivo y no se pueden aplicar a otras áreas distintas de aquellas si las condiciones ambientales y de suelo, variedad utilizada y técnicas culturales aplicadas son diferentes (Al-Jamal *et al*., 2000).

En la literatura, la función polinomial es la más ampliamente utilizada para representar el rendimiento frente el factor agua de riego aplicada en los cultivos (Nasseri y Bahramloo, 2009; Zolin *et al*., 2012). Cuando se aplican altos niveles de agua, puede aparecer en estas funciones una curvatura decreciente después del punto máximo de rendimiento. La forma de la curva está influida por pérdida de agua por percolación profunda, la falta de aireación en las raíces, el arrastre de nutrientes y/o la aparición de enfermedades asociadas a suelos húmedos (Tarjuelo y de Juan, 1999; Bahramloo y Nasseri, 2009).

Tabla 11: Funciones temporales de producción de respuesta el agua.

Funciones de producción	Autores
$Y/Ym = \prod a_i\ (SMD)_i$	Hall y Butcher (1968)
$Y/Ym = \sum (ETa/ETm)^{\lambda i}$	Jesen (1968)
$(Ym-Y) = A\sum CS_i\ (1- ETa/ETm)_i$	Hiler y Clark (1971)
$Y/Ym = \prod (T/Tm)^{\lambda i}$	Hanks (1974)
$Y/Ym = \prod (1-(1- ETa/ETm)_i^2)^{bi}$	Minhas *et al.* (1974)
$Y/Ym = \sum A_i\ (ETa/ETm)_i$	Blank (1975)
$(1-Y/Ym) = \sum k_y\ (1- ETa/ETm)_i$	Stewart *et al.* (1976) Doorenbos y Kassam (1986)
$Y = \sum Ys_i\ (1- ETa/ETm)_i$	Sudar *et al.* (1981)
$Y/Ym = \prod (1- ky\ (1-\ ETa/ETm))$	Rao *et al*. (1988)

Y: rendimiento comercial, Ym: rendimiento comercial máximo, SMD: déficit de humedad del suelo, ETa: evapotranspiración real del cultivo, ETm: evapotranspiración máxima del cultivo, CS: susceptibilidad del cultivo, T: transpiración del cultivo, Tm: transpiración máxima del cultivo, Ys: rendimientos en condiciones de secano, a, λ, b, A y k_y: coeficientes experimentales.

Cuando se trabaja con déficits hídricos los modelos deben incluir no solo el efecto de la cantidad de agua aplicada sino también el momento de aplicación. Estos modelos son conocidos como "funciones temporales de producción" (*Dated water production functions*) (Rao *et al*., 1988) (Tabla 11). Estas relaciones son complejas y deben incluir el efecto del déficit hídrico sobre el cultivo en los diferentes periodos del ciclo. La magnitud del déficit hídrico se valora en términos de evapotranspiración relativa (ETa/ETm), de déficit de evaporación relativa (1-ETa/ETm) o de déficit de humedad del suelo.

Ferreira y Gonçalves (2007) utilizan una función lineal para explicar la relación existente entre el agua aplicada y el peso fresco total del tubérculo. Estos autores analizaron la información disponible sobre la respuesta al agua de rendimiento y obtuvieron el factor de respuesta del rendimiento k_y, que es un índice de sensibilidad al déficit hídrico en un estadio de crecimiento específico y viene definido por la relación entre el déficit de rendimiento relativo y el déficit de ET relativo.

Para el cultivo de patata Doorenbos y Kassam (1986) proponen un valor del factor de respuesta para el periodo vegetativo (k_y=0,45), para el periodo estolinización e inicio de la tuberización (k_y=0,8), para la fase del llenado del tubérculo (k_y=0,7) y para maduración del tubérculo (k_y=0,2). Bezerra *et al.* (1999), utilizando la función de Stewart en un ensayo de riego deficitario por etapa fenológica en la región de Piracicaba-Brasil, presentaron valores mayores para el factor de respuesta en la patata. Los factores obtenidos fueron 0,6, 1,5 y 0,9 para el periodo vegetativo, inicio de la tuberización y llenado del tubérculo, respectivamente.

2.6 Aplicación del agua con sistema pivote.

El sistema pivote es un ramal de riego con un extremo fijo, por el que recibe el agua y la energía eléctrica, y otro móvil que describe un círculo girando sobre el primero, caracterizándose porque se mueve mientras riega. Está formado por una tubería portaemisores que va sustentada sobre torres automotrices, dotadas normalmente de un motor eléctrico y dos ruedas neumáticas (Tarjuelo, 2005).

La velocidad de avance del equipo se regula actuando sobre el motor de la torre extrema, haciéndola funcionar en fracciones de minuto, excepto cuando funciona al 100%

que no para (Tarjuelo, 2005). El avance de la unidad conductora produce una reacción en cadena de avances de las torres a lo largo del lateral a través del mecanismo de alineamiento.

La longitud de la tubería lateral varía entre 60 a 800 m y la separación entre torres (tramo) entre 25 y 75 m (Pereira y Trout, 1999; Tarjuelo, 2005). Los equipos de tramo largo son, normalmente, más económicos por llevar menos torres, pero se adaptan peor a topografías onduladas y transmiten más peso al terreno, con mayor posibilidad del hundimiento de las ruedas que produce atascamiento de la máquina (Tarjuelo, 2005). Para evitar los casos en que la rodada se convierte en un problema, se recomienda, antes de iniciar la campaña de riego, efectuar una primera pasada con el pivote en seco para iniciar la compactación del terreno (Tarjuelo, 2005).

El sistema pivote es considerada como uno de los métodos de riego que obtiene mayores eficiencias en la aplicación del agua (McLean *et al*., 2000) debido a su potencial para alcanzar una alta uniformidad de aplicación del agua en un amplio rango de cultivos y condiciones topográficas. Pereira y Trout (1999) señalan el alto grado de automatización y la capacidad de regar grandes áreas como otras ventajas del sistema pivote.

Al regar un circulo, para conseguir un riego uniforme, la pluviometría de la maquina debe crecer a medida que se aleja del centro pivote. Esto se hace variando el tamaño de la boquilla o el espaciamiento de los emisores. Además, el crecimiento progresivo de la pluviometría es necesaria porque el tiempo de aplicación del agua de un punto del terreno va siendo cada vez menor a medida que nos alejamos del centro pivote, y todos los puntos tienen que recibir la misma cantidad de agua (Tarjuelo, 2005).

Montero *et al*. (1997) señalan que el principal factor que influye sobre la uniformidad de riego en equipos pivote es el correcto diseño y el adecuado mantenimiento de la carta de emisores. Sourell *et al*. (2003) citan otros factores que afectan la uniformidad de estas máquinas, como, el tipo de emisor, el diámetro de la boquilla, la presión de trabajo y la altura del emisor sobre el suelo.

Los tipos de emisores usados en sistemas pivotes son los clásicos de impacto y los más modernos, que pueden ser de plato giratorio (tipo *Rotator*) o de plato fijo (tipo *spray*). El tipo y la altura de los emisores combinados con su disposición a lo largo de la tubería y su diámetro de alcance es la manera de obtener una buena uniformidad (Pereira y Trout, 1999; Evans, 2001; Montero *et al*., 2003). Una vez fijados estos parámetros, la pluviosidad en cada punto a lo largo del ramal es fija y no cambia al variar la velocidad de rotación. Cuando se modifica la velocidad sólo cambia la duración de la aplicación de agua sobre un punto del terreno y, por tanto, la dosis aplicada.

Puesto que la velocidad del viento crece con la altura sobre el suelo, suele tenderse a utilizar emisores a menores alturas en los pivotes, para acortar así la trayectoria de caída del agua hasta el suelo (Tarjuelo, 2005). La disposición de emisores más ventajosa para alcanzar un equilibrio entre pérdidas de evaporación y arrastre y uniformidad de riego es situar los emisores a unos 2 m sobre el suelo, con una anchura mojada en torno a los 12-15 m y separaciones entre emisores de 2,5 a 3 m, no debiendo superar en general los 5-7 m con los emisores de mayor alcance como los *Rotator* (Montero *et al*., 2003).

Ortíz *et al.* (2010) analizando la uniformidad de agua aplicada con diferentes tipos de emisores a distintas alturas en sistema pivote en Albacete (España), alcanzaron los mejores resultados con emisores instalados a 1m de altura del suelo con un valor medio de 92 % de coeficiente de uniformidad.

Dechmi *et al.* (2003a) evaluando los principales sistemas de riego en el Quinto Distrito de Riego de la Loma (Zaragoza), encontraron un coeficiente de uniformidad promedio de 75 % en sistema pivote.

La velocidad y dirección del viento es el principal factor que distorsiona el patrón de distribución del agua en el riego por aspersión, jugando un papel importante respecto a las pérdidas por evaporación y arrastre (Tarjuelo, 1999; Faci *et al*., 2001; Dechmi, 2004).

Una ventaja del sistema pivote es la posibilidad de usar la fertirrigación por tener alto nivel de automatización, permitiendo dar riegos ligeros y frecuentes (Evans, 2001; Pereira, 2001; Vilela, 2002; King *et al*., 2009), si bien el mojado frecuente del follaje puede crear condiciones ideales para muchas enfermedades, especialmente en los tramos más cercanos al centro pivote.

2.7 Agua en el suelo

El suelo constituye la principal reserva de agua para el crecimiento de las plantas (Kramer, 1974). Muchas son las propiedades del suelo que afectan a la retención del agua, destacando, entre todas, la textura, la estructura y la porosidad (Hillel, 1998). El espacio poroso del suelo está ocupado en parte por agua, con sustancias disueltas y, en parte por una mezcla de gases. En función de la textura, el agua puede encontrarse más o menos retenida en el suelo (Kravchenko y Zhang, 1998).

Desde el punto de vista de la producción agrícola, junto con el contenido de agua en el suelo, es imprescindible conocer la energía con que el agua está retenida por la matriz sólida del suelo. Sobre el agua actúan fuerzas muy variables, creando diferencias de energía entre un punto y otro y, por consiguiente, movimiento de agua entre esos puntos (Kumar, 1985).

La cantidad de agua presente en un suelo a una tensión determinada varía considerablemente según sea el tipo de suelo. El agua retenida a potenciales altos depende de los fenómenos de capilaridad y de la distribución del tamaño de los poros, mientras que para potenciales más bajos, son las fuerzas de adsorción de las moléculas de agua sobre la superficie de la matriz del suelo las que determinan la cantidad de agua retenida y la capacidad de retención (Campbell y Mulla, 1990).

La evaluación del contenido de humedad del suelo requiere información sobre las propiedades de retención y transmisión del agua en el mismo. Esta información la proporciona la capacidad de retención de agua del suelo, es decir, el intervalo de humedad entre el punto de marchitez permanente (θ_{PMP} -1500 kPa) y la capacidad de campo (θ_{CC} -33 kPa) (Vanderlinden *et al*., 2003; Carducci *et al*., 2012).

El concepto de capacidad de campo fue definido como la cantidad de agua que queda en el suelo después de que el exceso de agua haya drenado y de que haya disminuido de forma importante el movimiento en profundidad (Geroy *et al*., 2011). Se considera que por debajo del punto de marchitez permanente las plantas no pueden extraer agua.

La relación entre el contenido de humedad del suelo y la fuerza con que el agua es retenida se describe mediante la curva de retención de humedad (Oliveira, 1997; Nuth y Laloui, 2008). Esta curva indica que, a medida que el contenido de humedad del suelo disminuye, se requiere más energía para extraer el agua retenida, existiendo una relación inversa entre la tensión hídrica y el porcentaje de humedad, característico para cada tipo del suelo.

La curva de retención de agua se puede determinar en el campo, empleando equipos como tensiómetros o psicómetros, y tiene como principal ventaja el estudio del proceso en condiciones naturales. A pesar de ello, las dificultades técnicas y teóricas, así como la gran cantidad de tiempo necesaria para su realización hacen que habitualmente no sea viable. Se asumen menores restricciones en la medición de la curva de retención de agua en el laboratorio, debido al control y la precisión que se tiene sobre las variables que intervienen (Hillel, 1998)

El aparato de placas o membranas de presión es el instrumento más preciso de los que se dispone para mediciones de potenciales mátricos de suelos en laboratorio (Casaroli y Van Lier, 2008). El instrumento fue desarrollado por Richards y consta de un recipiente con una membrana o placa de cerámica porosa, sobre la que se coloca la muestra mojada previamente. La membrana, al igual que la cerámica porosa del tensiómetro, es permeable al agua y los solutos, e impermeable al aire (Hillel, 1998; Bittelli y Flury, 2009). A ambos lados de la membrana se establece una diferencia de presión, habitualmente por sobrepresión con aire comprimido, o bien por succión de vacío.

Si no se pueden estimar los puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente con los métodos anteriores, queda como alternativa estimar estos valores a partir de modelos que utilizan variables relacionadas de más fácil medición (Pineda y Viloria, 1997; Zimmermann y Basile, 2008), tales como la distribución de tamaño de partícula, la densidad aparente o el contenido de materia orgánica (Gupta y Larson, 1979; Rawls *et al*., 1982; Vereecken *et al*., 1987; Rawls *et al*., 1991). En ocasiones, muchos de los modelos solo disponen de la composición granulométrica (Cosby, 1984; Ahuja *et al*., 1985; Haverkamp y Parlange, 1986; Gregson *et al*., 1987) o, además, la densidad de las partículas del suelo (Arya y París, 1981) y la composición mineralógica de las arcillas (Williams *et al*., 1983). Los valores de estas variables, por lo general, se obtienen fácilmente a través de un análisis de suelo rutinario. Por esta relación, frecuentemente, son el punto de partida para la estimación indirecta de la humedad retenida en el suelo a un potencial mátrico determinado (Saxton *et al*., 1986; Gregson *et al*., 1987).

Distintos modelos han sido desarrollados para estimar la retención de humedad a diferentes tensiones. Bouma (1989) propuse el término funciones de pedotransferencia para referirse a estos modelos (Tabla 12).

Tabla 12: Funciones de pedotransferencia.

Literatura	Localización	Tensión (kPa)	Modelo
Gupta y Larson (1979)	EE.UU.	10	θ^1 = 0,00502*AR+0,00855*LM+0,00883*AC+0,00497*MO-0,242*dap
		33	θ = 0,00308*AR+0,00589*LM+0,00804*AC+0,00221*MO-0,143*dap
		1500	θ = 0,000059* AR+0,00114* LM+0,00577* AC+0,00223*MO-0,0267*dap
Rawls *et al.* (1982)	EE.UU.	10	θ^1= 0,412-0,003*AR +0,0023*AC+0,0317*MO
		33	θ = 0,258-0,002*AR +0,0023*AC+0,0299*MO
		1500	θ = 0,026-0,005* AC+0,016*MO
Arruda *et al.* (1987)	SP-Brasil	33	θ^2= 3,074+0,629*(LM + AC)-0,003438*(LM + AC)^2
Delgado y Barreto (1988)	Venezuela	33	θ^2= 29,06-(0,290*AR)-(0,253* LM)+(0,135*AC)+(2,56*MO)
		1500	θ = 16,55-(0,174*AR)-(0,164* LM)+(0,154*AC)+(1,24*MO)
Giarola *et al.* (2002)	SC y RS Brasil	10	θ^1= 0,081+0,005*LM +0,04*AC
		1500	θ = 0,031+0,005*LM +0,003*AC

MO: Materia orgánica (%); dap: densidad aparente (g cm^{-3}); θ^1: contenido de humedad (m^3m^{-3}) y θ^2: (g $100g^{-1}$; AR: arena (%); LM: limo (%) y AC: arcilla (%).

2.7.1 Métodos de medida del contenido de agua en el suelo.

En la tabla 13 se muestran distintos métodos de medida del contenido de agua en el suelo.

Tabla 13: Métodos, naturaleza, tipo y de medida del contenido de agua en el suelo.

Método	Naturaleza	Tipo	Medida
Gravimetría	De	DI	H
Resistencia eléctrica	ND	IN	P
Tensiómetros	ND	IN	P
Sonda de neutrones	ND	IN	H
Time domain reflectometry (TDR) (Constante dieléctrica)	ND	IN	H
Frequency domain reflectometry (FDR) (Capacitancia)	ND	IN	H

De: destructivo, ND: no destructivo, DI: directo, IN: indirecto, H: humedad, P: potencial.

El método gravimétrico es muy sencillo y se considera el más preciso de medida. Basado en un método de pesada, también es utilizado para calibrar otras técnicas de medida de agua en el suelo (Dechmi *et al*., 2001). El método presenta el inconveniente de no ser recomendable para realizar un seguimiento exhaustivo de la humedad del suelo a lo largo del tiempo y ser muy laborioso cuando se necesita muestrear un gran número de puntos (Campbell y Mulla, 1990).

Entre los métodos no destructivos están los sensores de resistencia eléctrica. En general, consisten en un material poroso cuyo el contenido en agua se equilibra con el suelo que lo rodea. Dentro de este grupo están los sensores Watermark® (Eldred *et al*., 1993; Varble y Chavéz, 2011; Nolz *et al*., 2013), que tienen bajo coste, facilidad de manejo y son útiles como indicadores cualitativos de potencial mátrico (ψ_m). Su limitación es que operan muy bien en la parte alta del rango de humedad disponible en el suelo, pero su precisión disminuye en humedades menores.

El tensiómetro es utilizado para medición del potencial de agua en el suelo, el cual está relacionado con la cantidad de agua del mismo (Marthaler *et al*., 1983; Nyhan y Drennon, 1990; Almeida *et al*., 2010). A medida que el suelo se seca, el agua del tubo que conecta la capsula de cerámica pasa hacia el suelo, con lo cual se crea un vacío dentro del tubo que es registrado por el vacuómetro. Los tensiómetros funcionan bien en los suelos con alto contenido de agua, pero tienden a perder el buen contacto entre el suelo y la cerámica porosa cuando el suelo se encuentra muy seco (Hubbell y Sisson, 1998; Brito *et al*., 2009).

La sonda de neutrones permite hacer un seguimiento de la variación vertical del contenido del agua en el suelo. Para su uso se requiere una calibración para cada suelo donde se vayan realizar las medidas. En general, la calibración se realiza con muestras de suelo cuyo contenido de agua se ha determinado previamente por métodos gravimétricos (Reichardt, 1997; Quezada *et al*., 2010). La desventaja es que únicamente proporciona medidas puntuales en el tiempo y en el espacio y, por tratarse de material radioactivo, cada vez son mayores las restricciones para su uso y éstas dependen de la legislación vigente en cada país (Vauclin, 1984).

La técnica de sondas TDR (*Time Domain Reflectometry*) consiste en medir el tiempo del trayecto de pulsos electromagnéticos a lo largo de una línea de transmisión de varillas con dimensión conocida (Schwartz *et al*., 2009). El tiempo empleado por la onda electromagnética en el proceso de ida y vuelta por la línea de transmisión está relacionado con la constante dieléctrica del medio en que la sonda está insertada (Teixeira, 2001; Miyamoto *et al*., 2012). La rapidez, facilidad de uso y la posibilidad de hacer medidas bastante localizadas con volumen reducido de suelo son las principales ventajas del TDR (López *et al*., 2005; Casanova *et al*., 2011). Uno de los principales problemas del equipo es la subestimación de la humedad cuando se emplean los modelos de regresión

universales en suelos especialmente ricos en materia orgánica. La calibración para cada tipo del suelo permite mejorar la precisión de la relación entre constante dieléctrica y la humedad volumétrica. El uso de una misma calibración para más de una situación siempre representa una pérdida de precisión en la medida (Teixeira, 2001).

Otros métodos de medida son los denominados *Frequency Domain Reflectometry* (FDR), que determina la constante dieléctrica del suelo, de la que se deduce su contenido de agua (Paltineanu y Starr, 1997; Minet *et al*., 2010). El método incluye el suelo como parte de un condensador, de tal forma que midiendo su capacitancia se obtiene la constante dieléctrica del suelo y, por tanto, su contenido de agua. Este tipo de sondas permiten la obtención de un registro de datos en un *data logger*, ofreciendo medidas más o menos precisas pero que necesitan de una calibración, pero sobre todo en suelos arcillosos o con altos contenidos en materia orgánica (Paltineanu y Starr, 1997; Starr y Paltineanu, 1998; Fares y Alva, 2000). Entre sus inconvenientes, destacar el escaso volumen de suelo al que se refieren las determinaciones de la capacitancia, lo que obliga a una perfecta instalación del tubo de acceso de la sonda (Evett y Steiner, 1995; Tomer y Anderson, 1995; Ould Mohamed *et al*., 1997; Hidalgo *et al*., 2003; Sun *et al*., 2010; Evett *et al*., 2012).

2.8 El balance de radiación.

La radiación solar, o radiación de onda corta, es la fuente primaria de energía en la producción de los cultivos, pero junto a ella hay que considerar la radiación térmica de onda larga emitida por cualquier objeto del planeta, incluyendo el suelo, los cultivos, el agua y la atmósfera (Villalobos *et al*., 2002). Según estos autores, la productividad de un cultivo depende de la radiación absorbida por los tejidos fotosintéticamente activos, y se encuentra muy estrechamente relacionada con la radiación interceptada, esto es, la diferencia entre la radiación incidente y la que alcanza la superficie del suelo.

La radiación solar global que llega sobre un plano horizontal a la superficie del suelo es la suma de la radiación directa (la que llega con la dirección de los rayos solares) y la difusa (el resto de la radiación que se dispersa en la atmósfera y alcanza la superficie), comprendidas en una longitud de onda de entre 300 y 3000 nm. La radiación fotosintéticamente activa (PAR) es la radiación considerada como radiación útil a la fotosíntesis, y se corresponde, aproximadamente, con la banda visible y está comprendida entre los 400 y 700 nm (Varlet-Grancher *et al*., 1989; Casaroli *et al*., 2007).

Un balance de radiación permite determinar la cantidad de PAR absorbida por el cultivo. Los balances de radiación pueden ser efectuados mediantes los métodos de radiación global expresada en forma de energía y radiación útil a la fotosíntesis expresada en forma de energía o fotones (Villalobos *et al*., 2002). Por término medio, el PAR supone un 45% de la radiación global.

Las plantas tienen diferentes capacidades de aprovechamiento de la radiación. En las plantas C3, como la patata, el proceso de fotorespiración disminuye la eficiencia fotosintética, principalmente en condiciones de altas temperaturas, cuando el proceso fisiológico de abertura y cierre de los estomas es afectado por un incremento en el flujo transpiratorio, en este caso, los estomas se cierran a fin de evitar el déficit hídrico en la planta (Casaroli *et al*., 2007; Sun *et al*., 2009). Por el contrario, las plantas C4 son capaces de mantener la fotosíntesis en condiciones de elevadas temperaturas e intensidades luminosas.

Rodríguez-Pérez (2010) afirma que el desarrollo y acumulación de materia seca en los tubérculos es mayor a radiaciones continuas de 400 μmoles m^{-2} s^{-1}. En el tercio superior del follaje de la planta, las hojas pueden absorber hasta 1200 μmoles m^{-2} s^{-1} y dejar pasar la PAR restante a los tercios medios e inferiores de la planta. El mismo autor

señala que niveles de radiación inferiores a 250 μmoles m^{-2} s^{-1} de fotones generan efectos negativos en cuanto a la distribución de biomasa.

La eficiencia de absorción de la radiación (εa) tiene una relación directa con el IAF y el coeficiente de extinción lumínico (K). El coeficiente K, que depende, entre otros factores, del ángulo de elevación del sol y de la distribución de ángulos foliares (Villalobos *et al*., 2002), puede ser definido como la relación entre el área real de una hoja y el área de su proyección horizontal, así pues, K representa la cantidad de fotones incidente absorbidos por unidad de área foliar. Este coeficiente, en general, varía en valores promedios entre 0,3 y 1. Diversos autores señalan una relación entre el K y el IAF (Gordon *et al*., 1997; Jongschaap y Booij, 2004; Mondani *et al*., 2012), de tal forma que la interceptación de luz es más eficiente por unidad de área foliar cuando el IAF es menor.

La eficiencia en el uso de la radiación (RUE) es el parámetro que representa la capacidad de la cubierta de un cultivo para convertir la energía solar interceptada en materia seca. Este parámetro es particularmente útil a los efectos de analizar el crecimiento vegetal (Haverkort y Bicamumpaka, 1986; Quanqi *et al*., 2008; Sun *et al*., 2009; Mondani *et al*., 2012; Taye *et al*., 2012). En el cultivo de la patata, la RUE es la pendiente de una relación, en general lineal, entre la MST acumulada y la PAR absorbida acumulada, aumentando a lo largo del desarrollo del cultivo (de la Casa, 2011).

De acuerdo con Collino *et al*. (2005) y Brown *et al*. (2006) la variación en los valores de la RUE a lo largo del ciclo de crecimiento está altamente influenciada por la temperatura, de tal manera que la relación entre ambos parámetros es lineal, y las menores eficiencias estarían afectadas por las bajas temperaturas. Allen *et al*. (2004) señalan que, además de la temperatura, la RUE también puede verse afectada por la disponibilidad de agua y nutrientes, la densidad de plantas, la presencia de malas hierbas y la salinidad.

En un sentido aplicado, algunos de los modelos de simulación de cultivos, específicos para patata, estiman la producción diaria de materia seca como el producto entre la cantidad de radiación solar y un valor particular de RUE (Griffin *et al*., 1993). Kooman *et al*. (1996) señalan, para el cultivo de patata, una RUE entre 1,8 y 3,7 g MJ^{-1} en ensayos correspondientes a distintos genotipos, lugares geográficos y estaciones de cultivo. De La Casa *et al*. (2011) estimando el RUE a partir de la cobertura del follaje presentó un valor de 2,9 g MJ^{-1}.

Singh y Rama (1989) analizaron la influencia del déficit hídrico en la transpiración y en la RUE del cultivo de garbanzo, en la India y, obtuvieron una diferencia de RUE entre 0,67 g MJ^{-1} y 0,55 g MJ^{-1} en el tratamiento con riego y sin riego, respectivamente. Collino *et al*. (2001) en un ensayo de respuesta de diferentes genotipos de cacahuete al estrés hídrico, presentan valores entre 3,59 y 3,17 g MJ^{-1} para tratamientos sin restricciones hídricas y 1,66 y 1,14 g MJ^{-1} para tratamientos con estrés hídrico.

2.9 Estimación de la evapotranspiración.

El cálculo de la ET es fundamental a la hora de estimar las necesidades hídricas de los cultivos para planificar, diseñar y programar sistemas de riego. Existen diferentes metodologías de estimación de la ET real de los cultivos, las cuales se pude citar el balance hídrico simplificado y el balance de energía (Allen *et al*., 1998; Allen *et al*., 2011a).

Independiente de la metodología de estimación de la ET real de los cultivos, Kimura *et al*. (2006) afirman que la ET para el periodo observado debe ser estimada a partir del cambio del contenido de agua en el suelo por encima del plano de flujo cero

(PFC), es decir, por encima de la profundidad en el suelo donde el gradiente hidráulico es cero.

2.9.1 Balance de energía. Relación de Bowen.

La ET es el nexo de unión entre el balance hídrico y el balance de energía. La determinación del balance de energía en los cultivos sirve para entender y manejar los flujos de masa y energía y su repercusión sobre el rendimiento de los cultivos.

La mayor parte de la radiación incidente es absorbida cerca de la superficie de las hojas, y es transformada en energía interna. Esta energía se reparte en diferentes procesos físicos, como, radiación de onda larga emitida por la superficie, conducción y conservación de calor sensible en el aire y evaporación de agua y conducción de calor en el suelo (Xing *et al.*, 2008; Allen *et al.*, 2011a). Este balance se puede establecer de acuerdo con la ecuación. 3.

$$Rn = \lambda E + H + G \quad (3)$$

Siendo Rn: flujo de radiación neta (W m^{-2}), λE: flujo de calor latente, es decir, la energía que está siendo consumida en el proceso de ET (W m^{-2}), H: flujo de calor sensible hacia el aire, es decir, la energía que se consume en calentar el aire sobre la superficie a expensas de calor previamente almacenado en la misma (W m^{-2}) y G: flujo de calor sensible hacia el suelo desde la superficie (W m^{-2}).

En muchas situaciones es muy difícil conocer λE sin considerar H en el análisis, por tanto, el flujo de calor sensible es tratado, generalmente, de forma conjunta con el ritmo de ET (Lagos *et al.*, 2009). La relación del reparto energético entre el flujo vertical de H y λE se denomina Relación de Bowen (BR) (Ec. 4).

$$BR = H/\lambda E \quad (4)$$

Luego, la ecuación del método de Balance de Energía - Relación de Bowen para el flujo de calor latente o *Bowen Ratio Energy Balance* (BREB) es (Ec. 5):

$$\lambda E = (Rn - G)/(1 + BR) \quad (5)$$

El uso del concepto de la BREB permite la solución de la ecuación del balance de energía mediante la medición de simples gradientes como la temperatura del aire y la presión de vapor cercana a la superficie del suelo (Allen *et al.*, 2011b). El método funciona mejor cuando la disponibilidad de agua no es limitante, puesto que, cuando el agua se vuelve menos disponible, la BR aumenta y, también aumentan los errores relativos en la estimación de la ET.

Utilizando las ecuaciones que describen los flujos de calor sensible y latente combinadas con el concepto de la BR y asumiendo que los coeficientes de transporte turbulento para calor latente y sensible son iguales, se obtiene la ecuación a seguir (Ec. 6) (Allen *et al.*, 2011a).

$$BR = \frac{H}{\lambda E} = \frac{\rho_a c_p k_h [T_1 - T_2 + \Gamma(z_2 - z_1)]}{\rho_a c_p / \gamma k_v (e_2 - e_1)} = \gamma \frac{[T_1 - T_2 + \Gamma(z_2 - z_1)]}{e_2 - e_1} \quad (6)$$

Siendo ρ_a: densidad del aire (kg m^{-3}), c_p: calor especifico del aire a presión constante (J kg^{-1} $^oC^{-1}$), k_h: coeficiente de transporte turbulento para el calor sensible (m^2 s^{-1}), k_v: coeficiente de transporte turbulento para calor latente (m^2 s^{-1}), γ: constante

psicométrica (kPa $^{o}C^{-1}$), Γ: gradiente vertical adiabático (generalmente se toma como 0,01 ^{o}C m^{-1} para aire no saturado), T_2 y e_2: temperatura del aire y la presión de valor a la altura z_2 y T_1 y e_1: temperatura del aire y presión de vapor a la altura z_1.

Generalmente, la altura z_1 debe ser al menos 0,3 m por en cima del cultivo y z_2 entre 1-2 m por encima de z_1.

Para determinar el flujo de calor latente, y por lo tanto el término de ET en el balance, diversos autores han utilizado el sistema Bowen Ratio (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) (Xing *et al*., 2008; Lagos *et al*, 2009; Zhao *et al*., 2010; Allen *et al.*, 2011a; Gokmen *et al*., 2012) Este sistema incluye los equipos descritos en la tabla 14.

Tabla 14: Variables meteorológicas y componentes del balance de energía medidos por un sistema de Bowen

Variables	Instrumento	Unidad
Temperatura del aire	Sensor de platinium	^{o}C
Humedad relativa del aire	Sonda capacitiva	%
Velocidad del viento	Anemómetro	m s^{-1}
Gradiente de temperatura del aire	Termopares	^{o}C
Gradiente de presión de vapor	Higrómetro	kPa
Radiación neta	Radiómetro	W m^{-2}
Temperatura del suelo	Termopares	^{o}C
Flujo de calor	Placas flujo de calor	W m^{-2}

Fuente: Olioso *et al.*, 2005

Este equipo necesita disponer de una distancia mínima entra la estación de medida y el límite de la parcela experimental (*fetch*) para permitir que se forme el perfil logarítmico de la velocidad del viento; éstos son: 1) que la superficie del cultivo sea lo suficiente extensa, sobre todo en la dirección del viento dominante, 2) que durante el periodo de observación se presentan condiciones estables para que K_h y K_v sean iguales, 3) que los instrumentos utilizados sean los suficientemente sensibles para detectar diferencias en temperatura, humedad y velocidad del viento a dos alturas (Olioso *et al*., 2005; Allen *et al.*, 2011a; ; Allen *et al.*, 2011b).

El equipo Bowen, en la mayoría de los casos, obtiene datos medios almacenados en un *Datalogger* cada 20 minutos, pasando, posteriormente, a un análisis detallado.

La técnica BREB, se presenta como una tecnología de gran interés en estudios sobre evaporación, demostrando la validez de la medición indirecta de la ET en condiciones de restricciones hídricas o no. Además, ayuda a contrastar mediciones de ET con otros métodos de medición y estimación, tales como, balance hídrico y ecuación de Penman-Monteith-FAO.

Allen *et al.* (2011a) señalan como ventajas de utilizar el sistema Bowen Ratio la sencilla medición de la temperatura y presión de vapor a dos alturas, no requerir datos aerodinámicos, ser un método no destructivo y se puede medir la ET en superficies potenciales y no potenciales.

2.10 Efecto del riego deficitario en el cultivo de patata.

Son muchos los factores externos e internos que interactúan para determinar el crecimiento y desarrollo del cultivo de patata y, en consecuencia, el rendimiento, si bien, la disponibilidad de agua es el factor más restrictivo de la producción (Fabeiro *et al*., 2001; Yuan *et al*., 2003).

El débil sistema radicular del cultivo de la patata y la tendencia de los estomas a cerrarse de las plantas tipo C3 son factores que limitan la tolerancia a la sequía en el cultivo (Fabeiro *et al*., 2001). El cierre de los estomas tiene como consecuencia la disminución de la absorción de CO_2, la reducción de la extensión de la hoja y por consiguiente, baja producción de biomasa (Casaroli *et al*., 2007; Sun *et al*., 2009).

El estrés hídrico en patata reduce la tasa de crecimiento de la superficie foliar (Begg y Turner, 1976), y actúa reduciendo el crecimiento de las plantas, ejerciendo un efecto negativo en la fase inicial de expansión celular (Krudev, 1994). Diversos autores

afirman que el estrés hídrico afecta directamente al IAF (Scaloppi y Ferraz, 1978; Dar y Rosario, 1981; Kleinkopf, 1982; Hang y Miller, 1986; Duarte, 1999; Aguiar-Neto *et al*., 2000).

La misma tendencia se aprecia en la DAF en relación al estrés, esto confirma que la reducción de la tasa de crecimiento de la superficie foliar es una estrategia de defesa de la planta, sin embargo, esta adaptación del cultivo causa disminución de la actividad fotosintética y en el acumulo de materia seca (Mansfield y Davies, 1985).

Aguiar-Neto *et al*. (2000), estudiando la influencia del estrés hídrico en los índices de crecimiento en el cultivo de patata han concluido que el aumento de IAF y RAF en mayores niveles de riego, reflejaron mayores valores de la VCC. Resultados semejantes fueron encontrados por Hsiao (1973), cuando afirma que el cierre de los estomas en respuesta al estrés hídrico afecta la VCC.

La TAN también se ve afectada por el estrés hídrico Aguiar-Neto *et al*. (2000). Ekanayake (1994), afirma que en planta tipo C3, el estrés ocasiona pérdidas de fotosíntesis y respiración reduciendo la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar. Las mismas conclusiones fueron encontradas por diversos autores (Watson, 1952; Loon, 1981; Krudev, 1994; Moreira, 1993; Aguiar-Neto *et al*., 2000).

El déficit de agua en el suelo también puede afectar al rendimiento del cultivo de la patata induciendo fisiopatías que alteran la calidad del tubérculo e incrementan las pérdidas en la producción. El aumento del déficit hídrico en el inicio de la tuberización incrementa la aparición de tubérculos más alargados, y un suelo seco y aireado en esta misma etapa favorece el ataque de la sarna común (Rousselle *et al*., 1999). Por otro lado, un aporte de agua (riego o lluvia) tras un periodo prolongado de sequía, acentúa los riesgos de rebrote de los tubérculos, que suele conllevar pérdidas de las reservas acumuladas en los tubérculos ya formados, lo que, además de reducir su peso, provoca deformaciones que reducen su valor comercial (Lynch *et al*., 1995).

La etapa de estolonización y la iniciación de la formación de los tubérculos representan un momento de gran sensibilidad a la falta de agua. De esta forma, si hay un déficit hídrico durante esa etapa, puede disminuir el número de tubérculos formados por planta (Lynch *et al*, 1995). Durante la etapa de engrosamiento del tubérculo se atenúa la sensibilidad progresivamente, aunque todo déficit disminuye la fotosíntesis y ralentiza la translocación de los fotoasimilados y, por tanto, se ve afectado el tamaño del tubérculo (Shock *et al*., 1998; Onder *et al*., 2005).

Solano *et al*. (2003), estudiando los efectos de diferentes niveles de riego por aspersión en el cultivo de patata en Chile, comprobaron que los tratamientos que recibieron mayores láminas de agua obtuvieron tubérculos con calibres superiores a 65 mm, superando estos calibres el 75 % de la producción. Yuan *et al*. (2003), al analizar los efectos sobre el crecimiento de la patata de diferentes regímenes hídricos también encontraron aumentos en el rendimiento, numero de tubérculos y tubérculos de mayores calibres en los tratamientos de mayor aporte hídrico.

La sensibilidad al estrés hídrico hace que la patata sea un cultivo exigente en agua, necesitando de 0,35 a 0,80 m^3 para producir 1 kg de materia seca en los tubérculos (Steduto *et al*., 2012). Dependiendo del período de duración del cultivo, condiciones ambientales, tipo de suelo y cultivar, el consumo de la patata varía entre 350 y 800 mm para obtener altos rendimientos. Fabeiro *et al*. (2001) pusieron de manifiesto que para lograr rendimientos mayores de 40 t ha^{-1} se necesita de 520 a 570 mm de total agua recibida (Riego + Precipitación efectiva) durante el ciclo del cultivo.

OBJETIVOS

3 OBJETIVOS

La presente Tesis Doctoral se plantea con el objetivo principal de analizar el crecimiento y desarrollo del cultivo de la patata ante de diferentes tratamientos hídricos bajo sistema de riego tipo pivote en condiciones semiáridas.

Para ello se establecen como objetivos específicos los siguientes:

- Caracterización de la aplicación del agua de riego con sistema pivote y análisis de la distribución de agua en el suelo mediante medidas del contenido volumétrico y del potencial del agua en el suelo.
- Modelar el crecimiento y desarrollo del cultivo mediante el método de análisis funcional, estableciendo en base a él los principales índices de crecimiento vegetal.
- Analizar la respuesta del cultivo de la patata a la aplicación de agua para diferentes tratamientos de riego. Estudio del rendimiento máximo alcanzado y calidad de la cosecha.
- Estudiar el balance hídrico simplificado y determinar la evapotranspiración real del cultivo a partir de sensores de medida del contenido de agua en el suelo y del balance de energía (relación de *Bowen*).
- Estudiar el balance de radiación y las eficiencias en el uso de la radiación en la producción de biomasa.

MATERIALES Y MÉTODOS

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Características de la zona de ensayo.

Los ensayos se realizaron durante las campañas de 2011 y 2012 en una parcela experimental localizada en la pedanía de Aguas Nuevas (T. M. de Albacete, Castilla-La Mancha, España) perteneciente al Centro de Formación Agroambiental de Aguas Nuevas, a una distancia de unos 6 km de la ciudad de Albacete, en el km 1,6 de la carretera A-01, con coordenadas UTM X: 595368, Y: 4311310, y con una altitud sobre el nivel del mar de 690 m. En la figura 5 se muestra la ubicación del área del pivote experimental donde se realizaron los dos años de ensayo.

Fuente: Google Maps consultado en 01/2013. Elaboración propia.
Figura 5: Situación geográfica del área de ensayo.

4.1.1 Características edáficas.

A nivel geológico y litológico, esta zona forma parte de la Unidad Geoestructural Neógena, de la cual forman parte, llanuras o cuencas terciarias, como la de La Mancha a la cual pertenece (Bosque y Vilá, 1991). En la zona hay predominio de materiales terciarios de origen Neógeno, del Plioceno Superior, formado por calizas y margas con encostramientos laminares a techo.

De acuerdo con los datos de IGME (1988), hay también presencia de manchas de fondos de dolina, que son materiales Cuaternarios pertenecientes al Pleistoceno (superior y medio) y al Holoceno, que se originan por la disolución de los materiales carbonatados. La litología que tapiza sus fondos es de carácter arcillo-limoso y a veces arcillo-arenoso, con aparición ocasional de gravas y gravillas.

4.1.2 Características climáticas.

Para la descripción del clima de la zona se emplearon los datos de la serie histórica de los últimos once años (2000-2012) de la estación meteorológica de Albacete, ubicada a 300 m de la zona del ensayo experimental (Tabla 15), y cuyos datos se encuentran en la página Web del Servicio de Información Agroclimática para el Regadío (RED SIAR). El clima de la zona se caracteriza por presentar una acusada variación estacional, donde la temperatura media de medias anual en el mes más frio (enero) es de 3,8 ºC y en los meses más cálidos de 21,5-24,4 ºC. La temperatura media de mínimas en el mes más frio es de -1,7 ºC y la media máxima del mes más cálido (julio) es de 33,1 ºC.

Las precipitaciones medias anuales son de unos 360 mm, con media mensual de 46,1 mm en el mes más lluvioso (octubre) y de 4,1 mm en el más seco (Julio). La evapotranspiración de referencia media anual acumulada está en torno a unos 108 mm, alcanzando un valor medio entre los meses de verano de 204 mm.

Esta zona posee una sequía característica en los meses de Julio y Agosto. Así, el clima se clasifica, según Papadakis (1966), en Mediterráneo Templado (MeTE), régimen térmico Templado cálido (TE) y de humedad Mediterráneo seco (Me).

Tabla 15: Datos climáticos promedios de la serie histórica (2000-2012) de la estación meteorológica de Albacete.

Mes	TMA	tma	Tmm	tmm	TMM	Hmm	hmm	HMM	Pp	Vm	ET_0
Ene	17,2	-9,5	3,8	-1,7	10,3	80,6	56,3	94,4	20,1	2,3	32,9
Feb	19,0	-6,8	5,6	-0,7	12,5	73,1	45,3	92,5	21,1	2,6	45,6
Mar	24,3	-5,1	8,8	2,1	15,7	68,5	39,8	91,2	31,8	2,8	85,8
Abr	26,4	-1,0	11,5	4,4	18,4	67,6	38,7	91,3	45,9	2,6	108,8
Mayo	31,0	1,5	15,7	8,0	23,2	63,6	34,2	90,5	42,0	2,1	141,7
Jun	36,0	5,7	21,5	12,4	29,8	51,0	22,8	84,1	24,9	2,3	193,7
Jul	37,6	8,9	24,4	14,8	33,1	46,1	18,3	81,8	4,1	2,4	223,8
Ago	37,7	8,5	23,8	15,0	32,4	50,3	21,0	83,7	7,8	2,3	194,5
Sep	33,3	4,4	19,1	11,8	26,8	62,8	30,9	90,6	31,8	2,0	125,4
Oct	28,5	0,7	14,2	7,6	21,1	71,9	42,0	92,7	46,1	1,9	74,2
Nov	20,9	-4,5	7,7	2,0	13,9	78,4	53,3	93,3	30,7	2,1	40,8
Dic	16,5	-7,4	4,9	-0,3	10,7	82,2	59,5	94,5	28,6	2,3	29,0

TMA: Temperatura máxima absoluta (ºC); tma: Temperatura mínima absoluta (ºC); Tmm: Temperatura media de medias (ºC); tmm: Temperatura media de mínimas (ºC); TMM: Temperatura media de máximas (ºC); Hmm: Humedad relativa media de media (%); hmm: Humedad relativa media de mínima (%); HMM: Humedad relativa media de máxima (%); Pp: Precipitación (mm); Vm: Velocidad media (m s^{-1}) y ET_0: Evapotranspiración de referencia acumulada (mm) (metodología de Penman-Monteith) .

Fuente: RED SIAR, 2012.

4.1.2.1 Características climáticas en los años de ensayo.

En la figura 6 a y b, se presenta la evolución de los promedios de las temperaturas medias, mínimas y máximas mensuales para el periodo de ensayo experimental durante las campañas 2011 y 2012, respectivamente. El mes de agosto destaca como más cálido y presenta temperaturas máximas superiores a 30 ºC en ambas campañas, sin embargo el año 2012 fue todavía más cálido, donde las temperaturas máximas alcanzaron 40,7 ºC frente a 34,8 ºC en el año 2011.

La evolución de precipitación y ET_o acumulada mensual se muestran en la figura 6 c y d para los años de 2011 y 2012. Los gráficos evidencian la gran diferencia entre la demanda evaporativa y el aporte de agua por lluvia, principalmente en los meses de julio y agosto en los dos años, con ET_o superiores a 200 mm. Es importante destacar que el año 2011 se caracterizó por presentar lluvias más frecuentes en los primeros meses de establecimiento del cultivo (Abril y Mayo), superando los 40 mm mensuales.

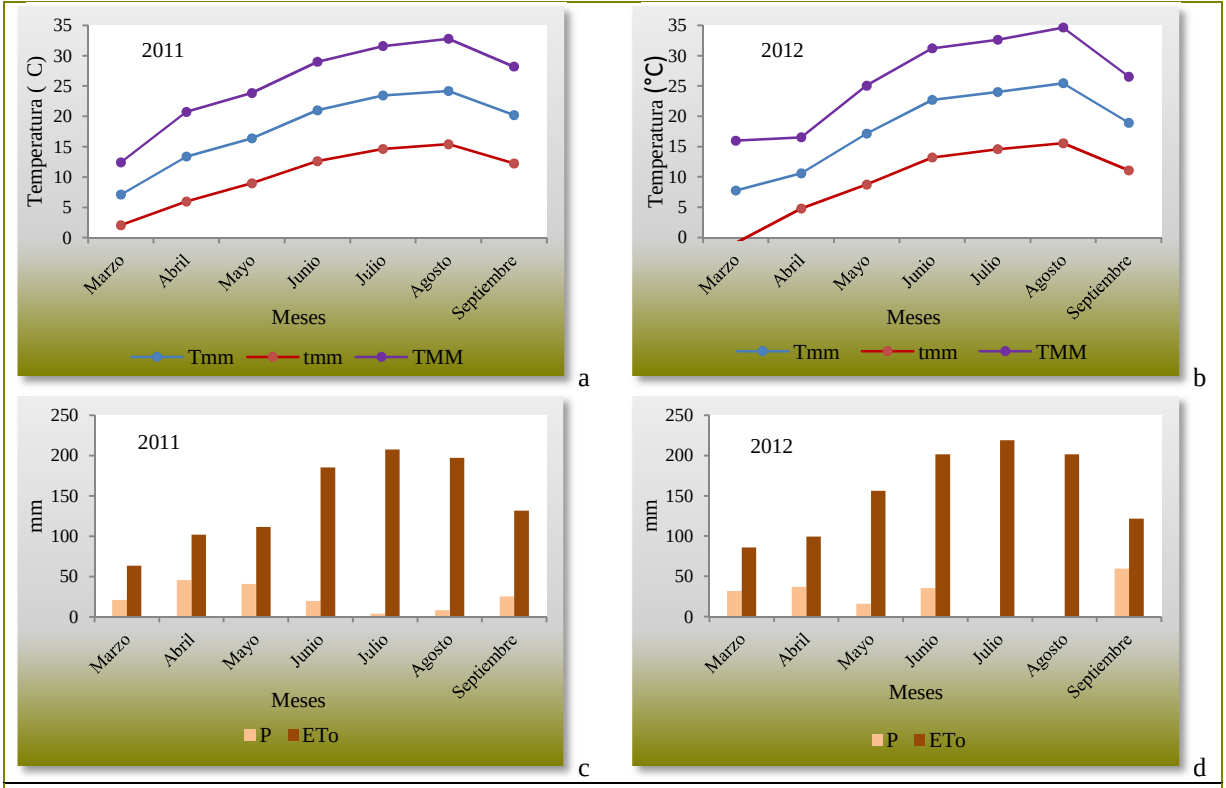


Figura 6: a) Temperaturas medias de media (Tmm), mínimas (tmm) y máximas (TMM) mensual durante el periodo de ensayo para el año de 2011, b) 2012, c) precipitación (P) e evapotranspiración de referencia acumulada (ET_o) mensual en el año de 2011 y d) 2012.

4.2 Características del ensayo.

4.2.1 Diseño experimental.

De la superficie total de 18,4 ha que cubre el sistema pivote experimental, se plantó aproximadamente un cuarto de círculo que corresponde 4,9 ha, en cada una de las dos campañas experimentales (Fig.7).

Fuente: Plan Nacional de Ortofotografia Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional consultado en Enero de 2013. Elaboración propia.

Figura 7: Sectores del pivote donde se realizaron los ensayos en cada campaña.

El sistema pivote de riego por aspersión está formado por 4 tramos de 50 m y un tramo de 38 m (Fotografía 1). La tubería del pivote tiene un diámetro de 168,3 mm, con un caudal de diseño de 86,4 m^3h^{-1} y una dotación de 1,3 L $s^{-1}ha^{-1}$.

Los emisores, de plato rotatorio (Rotator®), están situados a 1,4 m sobre el suelo y separados entre ellos 1,5 m, salvo en las dos primeros tramos (entre 3,0 y 4,0 m). La presión de trabajo es de 2,1 bar en la salida de la bomba, con reguladores de presión a 1,4 bar en todos los emisores, y una anchura mojada de 9,0 m

Previamente a la instalación de la carta de emisores, para asegurar la precisión del caudal descargado por el sistema pivote, se determinó la ecuación de descarga, donde se midió en laboratorio el caudal descargado a las presiones de 1, 1,4 y 2 bar. Además, tras la instalación de la carta de emisores y anteriormente al inicio de la campaña se comprobó

Fotografía 1: Sistema pivote de riego utilizado en el ensayo experimental con el cultivo de patata.

el caudal de cada boquilla, mediante mediciones directas del volumen descargado. Dicho procedimiento se repetió en los dos años de ensayo.

Se medió el caudal de la tubería del sistema pivote en cabezera y en los tramos 3 y 4, empleando para ello un caudalímetro de ultrasonidos (Panametrics, Waltham, MA, USA) (precisión de 0,75 %).

El diseño experimental consta de cuatro tratamientos diferenciados de aplicación de agua al cultivo con tres repeticiones cada uno de ellos (Fig. 8). En uno de los tratamientos, el de referencia, se aplica el 100% de los requerimientos hídricos del cultivo para satisfacer las necesidades hídricas para la máxima producción siguiendo la metodología FAO (Allen *et al*., 1998).

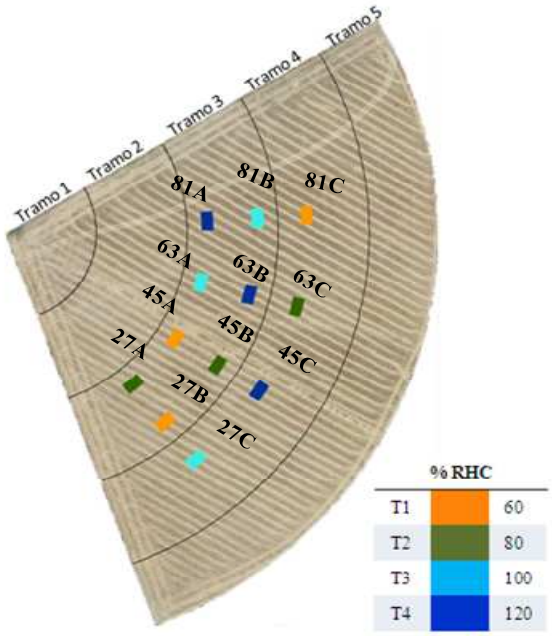
Otro de los tratamientos registra una aplicación de agua por encima del anterior, aplicando el 120% y, del mismo modo, se tienen otros dos tratamientos más a los que se le aplican el 80% y 60% de los requerimientos hídricos.

La programación de riegos se realizó para el tratamiento de referencia (100% de los requerimientos hídricos del cultivo - RHC) mediante el método del balance simplificado de agua en la zona radicular del cultivo (Allen *et al*., 1998).

La ejecución de los tratamientos se establece en función de la aplicación o no de algunos de los 6 riegos consecutivos de alta frecuencia e igual dosis realizados durante toda la campaña de riego (Tabla 16). Así, se consigue el riego deficitario continuo, garantizando el porcentaje objetivo de RHC.

El total de parcelas experimentales es de 12, distribuidas al azar entre el tercer y cuarto tramo del pivote. La configuración de distribución de las parcelas se mantuvo en los dos años experimentales, manteniendo el mismo diseño experimental en los dos cuartos del pivote utilizados. Las parcelas de control, de 6 m de ancho y 10 m de largo (60 m^2), se disponen alineadas radialmente al pivote en su eje menor, siguiendo su correspondiente corona circular.

Cada una de las tres coronas es controlada por un grupo de 14 emisores, cubriendo una anchura de 19 m (Fig 8).



Fuente: Plan Nacional de Ortofotografia Aérea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional consultado en Enero de 2013. Elaboración propia.

Figura 8: Distribución de tratamientos en un cuarto de circunferencia de la parcela experimental con el porcentaje sobre los Requerimientos Hídricos del Cultivo (% RHC).

Tabla 16: Frecuencia de riegos en los cuatro tratamientos y porcentaje de satisfacción de los Requerimientos Hídricos del Cultivo.

Tratamiento	Aplicación	Relación	% RHC
T1	3 de 6	0,50	60
T2	4 de 6	0,67	80
T3	5 de 6	0,83	100
T4	6 de 6	1,00	120

RHC: requerimientos hídricos del cultivo

La apertura y cierre de cada grupo tiene lugar según la posición del pivote y están controladas mediante válvulas hidráulicas automatizadas por un contador – secuenciador (Fotografía 2) situados en la cabeza del pivote.

El contador - secuenciador tiene un total de 7 programas (P0 a P6), los 6 primeros (P0 a P5) son los que se establecieron para la zona de ensayo con los distintos tratamientos y el último, P6, para el resto del pivote. El contador – secuenciador traduce en pasos el movimiento angular del pivote a través de un sensor tipo encoder. Este sensor es un transductor rotativo, que mediante una señal eléctrica indica el ángulo girado.

En la parte superior del contador - secuenciador, de forma digital, es posible ver en que numero de pasos se encuentra el pivote.

El programador Agronic® (Fotografía 2b) permite establecer el inicio y fin del riego tras introducir informaciones del día, hora de inicio y tiempo de riego.

a

b

Fotografía 2: a) Caja aislante con programador Agronic® y el contador - secuenciador, b) Agronic® y el contador - secuenciador.

4.2.2 Descripción de los perfiles del suelo.

Para cada campaña, se hicieron dos calicatas en la zona del ensayo, eligiendo al azar una parcela que recibiera 60 % (calicata T1) y otra 100 % (calicata T3) del requerimiento hídrico (Fig. 9).

De cada horizonte encontrado se cogieron tres repeticiones de muestras inalteradas del suelo con anillos metálicos de volumen conocido (98,89 cm^3) para el cálculo de su densidad aparente (dap). Los anillos, tapados herméticamente para evitar la pérdida de la humedad, se llevaron hasta laboratorio, y tras su pesaje y secado en estufa de ventilación hasta peso constante, se determinó una dap para cada uno de los horizontes. El procedimiento se repitió en los dos años de estudio.

En las tablas 17 y 18 se presenta la descripción de los horizontes de cada uno de los perfiles del suelo para el año de 2011 (Fotografía 3), y en las tablas 19 y 20 para el año de 2012 (Fotografía 4).

El suelo se clasifica, según USDA (2006), como pertenecientes al orden de los Entisol, suborden de los Orthents y del gran grupo de los Torriorthents. Son suelos jóvenes, poco profundos (con una capa carbonatada dura a los 50 cm de profundidad), calizos, propios de planicies aluviales que reciben sedimentos de zonas con mayor

erosión, presentan valores medios o bajos de materia orgánica y textura medias a arenosas, predominando las francas.

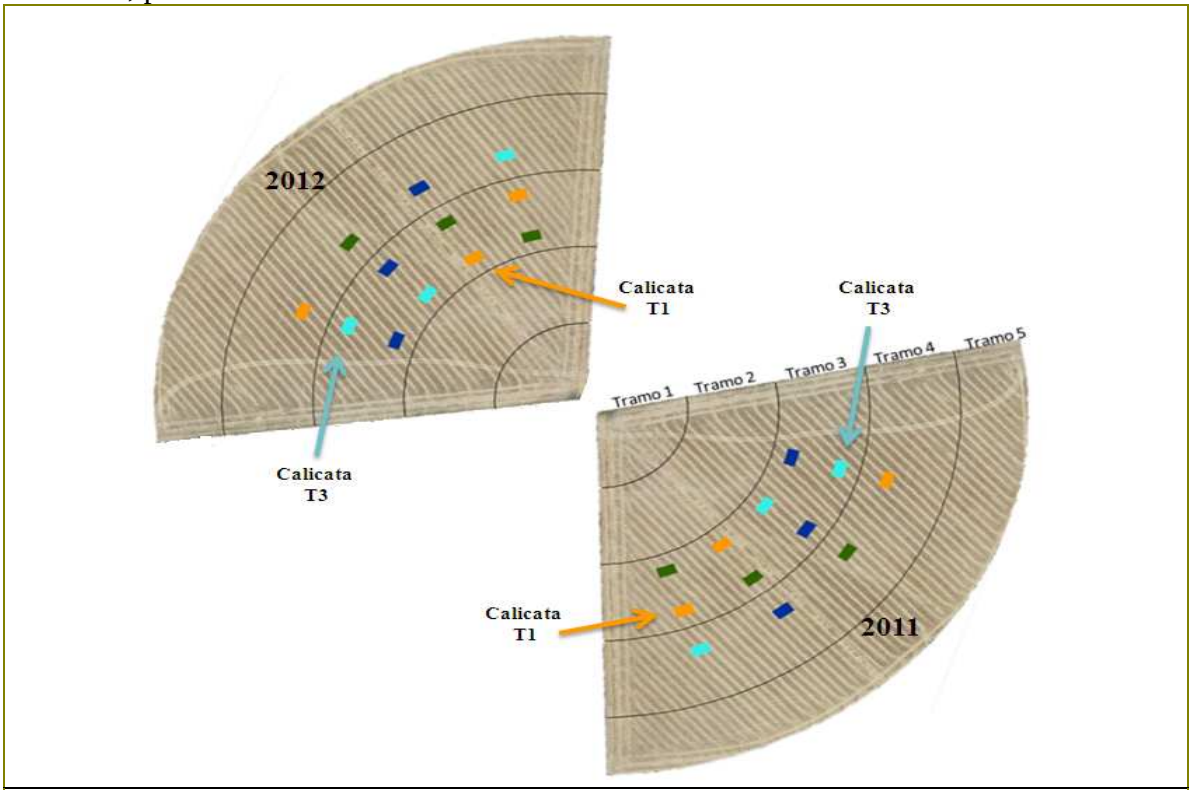


Figura 9: Ubicación de las calicatas T1 (60 % RHC) y T3 (100 % RHC) en las parcelas experimentales para los años 2011 y 2012.

Tabla 17: Descripción del perfil para parcela de tratamiento T1, 2011.

Horizonte	Profundidad	Características morfológicas
Ap_1	0-21 cm	Pardo oscuro (7,5 YR 4/3) en húmedo; estructura débil, fina, granular, friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico; fragmentos rocosos comunes, tipo gravas pequeñas de forma angulares; ligeramente calcáreos; raíces comunes y finas.
Ap_2	21-40 cm	Pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo; estructura débil, fina, granular, friable, ligeramente adherente, plástico; fragmentos rocosos frecuentes, tipo gravas medianas de forma angulares; moderadamente calcáreos; muy pocas raíces y muy finas; transición plana.
C	40-70 cm	Pardo blanquecino (10 YR 8/4) en húmedo; estructura masiva, muy friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico; fragmentos rocosos frecuentes, tipo gravas grandes de forma angulares; fuertemente calcáreos, sin raíces.

Tabla 18: Descripción del perfil para parcela de tratamiento T3, 2011.

Horizonte	Profundidad	Características morfológicas
Ap_1	0-22 cm	Pardo oscuro (7,5 YR 4/2) en húmedo, estructura débil, fina, granular, friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico; fragmentos rocosos frecuentes, tipo gravas medianas de forma angulares; moderadamente calcáreos; raíces comunes y finas.
Ap_2	22-43 cm	Pardo oscuro (7,5 YR 4/3) en húmedo; estructura débil, fina, granular, friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico; fragmentos rocosos frecuentes, tipo gravas medianas de forma angulares; moderadamente calcáreos; muy pocas raíces y muy finas; transición plana.
C	43-70 cm	Amarillo rojizo (7,5 YR 7/6) en húmedo; estructura masiva, poco compactada, pocas manchas definidas de color blanca; suelto, no adherente, no plástico; fragmentos rocosos frecuentes, tipo gravas grandes de forma angulares; fuertemente calcáreos, sin raíces.

a

b

Fotografía 3: a) Perfil referente al suelo de la parcela de tratamiento T1 y b) T3, 2011.

Tabla 19: Descripción del perfil para parcela de tratamiento T1, 2012.

Horizonte	Profundidad	Características morfológicas
Ap_1	0-25 cm	Amarillo rojizo (7,5 YR 7/6) en seco; pardo claro (7,5 YR 6/4) en húmedo; estructura débil, fina, granular, friable, no adherente, no plástico; pocos fragmentos rocosos, tipo gravas pequeñas de forma angulares y redondeadas; ligeramente calcáreos; raíces comunes y finas.
Ap_2	25-42 cm	Amarillo rojizo (7,5 YR 6/6) en seco; amarillo parduzco (10YR 6/6) en húmedo; estructura débil, fina, granular, friable, adherente, ligeramente plástico; pocos fragmentos rocosos, tipo gravas medianas de forma angulares y redondeadas; ligeramente calcáreos; muy pocas raíces y muy finas; transición plana.
B	42-70 cm	Amarillo rojizo (7,5 YR 7/8) en seco; amarillo rojizo (7,5 YR 8/6) en húmedo; estructura moderada, media, granular, friable, adherente, plástico; fragmentos rocosos comunes, tipo gravas medianas de forma angulares y redondeadas; ligeramente calcáreos; muy pocas raíces y muy finas; transición plana.
C	70-95 cm	Blanco (10 YR 8/2) en seco; blanco (10 YR 8/1) en húmedo; estructura moderada, media, granular, muy firme, muy adherente, plástico; fragmentos rocosos comunes, tipo gravas grandes de forma angulares y redondeadas; fuertemente calcáreos, sin raíces.

Tabla 20: Descripción del perfil para parcela de tratamiento T3, 2012.

Horizonte	Profundidad	Características morfológicas
Ap_1	0-19 cm	Pardo oscuro (7,5 YR 4/4) en seco; pardo oscuro (7,5 YR 3/4) en húmedo; estructura débil, fina, granular, friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico; fragmentos rocosos comunes, tipo gravas pequeñas de forma angulares y redondeadas; ligeramente calcáreos; raíces comunes y finas.
Ap_2	19-35 cm	Pardo oscuro (7,5 YR 4/4) en seco; pardo oscuro (7,5 YR 3/4) en húmedo; estructura moderada, fina, granular, friable, ligeramente adherente, ligeramente plástico; fragmentos rocosos comunes, tipo gravas medianas de forma angulares y redondeadas; ligeramente calcáreos; pocas raíces y muy finas; transición plana.
C	35-78 cm	Blanco (10 YR 8/2) en seco; pardo blanquecino (10 YR 8/3) en húmedo; estructura moderada, media, granular, firme, muy adherente, plástico; fragmentos rocosos frecuentes, tipo gravas grandes de forma angulares y redondeadas; moderadamente calcáreos, muy pocas raíces y muy finas.

a b

Fotografía 4: a) Perfil referente al suelo de la parcela de tratamiento T1 y b) T3, 2012.

4.2.3 Análisis físico-químico del suelo.

En las tablas 21 y 22 se presentan los resultados del análisis físico-químico de los horizontes de los perfiles analizados para el año 2011 y 2012, respectivamente. El análisis fue realizado por el laboratorio del Servicio del Asesoramiento a la Fertilización (SAF) del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP S.A).

El pH es básico, lo que puede conducir a problemas de disponibilidad de algunos micronutrientes siendo un suelo ligeramente salino. El horizonte Ap_1 (capa arable) presenta materia orgánica adecuada, disminuyendo a mayores profundidades. El nitrógeno total está dentro del rango considerado como más normal en el suelo (0,03-0,4 %). La relación carbono-nitrógeno indica que hay un buen nivel de humificación de la materia orgánica del suelo y una adecuada liberación de nitrógeno. Los carbonatos se encuentran en valores alto y muy alto, y con valores de caliza activa altos. En relación al fósforo, éste se encuentra en niveles altos en los primeros horizontes y bajos en el último. Respecto al calcio y magnesio, ambos se encuentran en niveles altos y muy altos. Por último, el potasio oscila entre niveles altos (en los primeros horizontes) y bajos y muy bajos (en el último) y con el rango de bajo a medio para el sodio. El suelo, en general, es de textura franca con predominio de partículas gruesas y medias.

Tabla 21: Análisis físico-químico del suelo para el año de 2011.

Determinaciones	Horizontes del perfil para parcela de tratamiento T1			Horizontes del perfil para parcela de tratamiento T3		
	Ap_1	Ap_2	C	Ap_1	Ap_2	C
pH	8,67	8,62	8,40	8,66	8,71	8,81
CE (mmhol cm^{-1})	0,41	0,44	3,99	0,41	0,33	0,46
Clorudos (mg)	37,00	26,00	23,00	23,67	34,67	19,00
Sulfatos (yeso 100g de $suelo^{-1}$)	11,67	14,33	237,00	11,33	14,67	44,00
Materia orgánica total (%)	2,84	2,70	0,92	2,97	2,09	0,35
Nitrógeno total (%)	0,16	0,16	0,06	0,17	0,13	0,03
Relación C/N	10,33	10,00	9,33	10,33	10,00	7,00
Nitrógeno nítrico (ppm)	6,67	15,33	17,67	7,00	8,67	6,33
Fósforo asimilable (ppm)	35,33	32,67	10,33	24,00	19,00	5,67
Carbonatos totales (%)	38,70	52,60	33,80	43,07	30,43	34,53
Caliza activa (%)	12,87	12,40	13,50	8,27	7,97	3,47
Potasio asimilable (meq $100g^{-1}$)	0,98	0,85	0,18	0,87	0,62	0,21
Sodio asimilable (meq $100g^{-1}$)	0,92	0,97	0,96	0,98	0,79	0,62
Calcio asimilable (meq $100g^{-1}$)	20,47	18,66	19,20	20,07	18,39	15,60
Magnesio asimilable (meq $100g^{-1}$)	3,88	3,74	3,69	3,36	3,11	1,38
Relación K/Mg	0,25	0,23	0,05	0,26	0,20	0,15
Relación Ca/Mg	5,27	4,99	5,00	6,01	5,91	11,33
Capacidad Intercambio Catiónico	12,67	13,67	12,67	13,00	12,67	4,00
Textura (U.S.D.A.)	FAA[1]	FAA	FAr[2]	FA[3]	FA	AF[4]

[1]Franco arcillo arenoso; [2]Franco arcillosa; [3]Franco arenosa; [4]Arena franca. Textura (Bouyoucos);pH: (1:2,5 agua); CE: conductividad eléctrica (1:5 o pasta saturada); materia orgánica (Walkley-Black); nitrógeno total (Kjeldahl); nitrógeno nítrico (Extracción con sulfato cálcico); fósforo asimilable (Olsen); carbonatos totales (calcímetro Bernard);caliza activa (oxalato amónico; calcímetro Bernard); potasio, calcio, sodio y magnesio asimilable (acetato amónico, espectrofotometría absorción atómica)

Tabla 22: Análisis físico-químico del suelo para el año de 2012.

Determinaciones	Horizontes del perfil para parcela de tratamiento T1				Horizontes del perfil para parcela de tratamiento T3		
	Ap_1	Ap_2	B	C	Ap_1	Ap_2	C
pH	8,53	8,46	8,60	8,67	8,26	8,34	8,50
CE (mmhol cm^{-1})	0,44	0,49	0,64	0,63	0,50	0,54	0,66
Clorudos (mg)	40,00	39,50	35,50	35,50	39,50	35,50	35,00
Sulfatos (yeso 100g de $suelo^{-1}$)	30,50	32,00	89,00	78,00	27,00	45,00	111,00
Materia orgánica total (%)	1,33	1,40	0,49	0,36	2,84	2,61	0,06
Nitrógeno total (%)	0,07	0,06	0,02	0,01	0,15	0,12	0,01
Relación C/N	12,50	7,50	23,00	20,50	11,50	11,50	4,00
Nitrógeno nítrico (ppm)	17,50	13,00	7,00	16,50	31,50	29,00	4,00
Fósforo asimilable (ppm)	18,50	9,50	5,50	4,50	15,50	9,50	4,00
Carbonatos totales (%)	59,75	58,45	60,20	48,55	50,40	49,15	78,15
Caliza activa (%)	18,05	19,90	17,55	21,90	22,30	21,95	22,30
Potasio asimilable (meq $100g^{-1}$)	0,40	0,29	0,20	0,17	0,61	0,39	0,26
Sodio asimilable (meq $100g^{-1}$)	1,47	1,49	1,94	2,08	2,08	2,42	1,75
Calcio asimilable (meq $100g^{-1}$)	21,71	22,01	22,48	20,74	20,66	22,71	17,10
Magnesio asimilable (meq $100g^{-1}$)	2,34	2,91	3,87	3,20	4,13	4,32	2,76
Relación K/Mg	0,20	0,10	0,08	0,10	0,15	0,09	0,10
Relación Ca/Mg	9,31	8,00	6,00	6,50	5,01	5,27	6,23
Capacidad Intercambio Catiónico	9,50	9,00	6,50	6,00	14,00	15,00	10,00
Textura (U.S.D.A.)	FAA[1]	FAA	F[2]	FL[3]	FAr[4]	FAr	FL

[1]Franco arcillo arenoso; [2]Franca; [3]Franco limosa; [4]Franco arcillosa. Textura (Bouyoucos);pH: (1:2,5 agua); CE: conductividad eléctrica (1:5 o pasta saturada); materia orgánica (Walkley-Black); nitrógeno total (Kjeldahl); nitrógeno nítrico (Extracción con sulfato cálcico); fósforo asimilable (Olsen); carbonatos totales (calcímetro Bernard);caliza activa (oxalato amónico; calcímetro Bernard); potasio, calcio, sodio y magnesio asimilable (acetato amónico, espectrofotometría absorción atómica)

4.2.4 Curvas características de humedad.

Para la caracterización hidráulica del perfil, se obtuvieron las curvas de retención de agua, empleando para ello la cámara Richards de extracción de la humedad del suelo (Vanderlinden *et al*., 2003; Carducci *et al*., 2012), la cual está compuesta por un juego de ollas y platos de presión, una fuente de alimentación de presión (compresor) y unos manómetros para medir y controlar la misma (Fotografía 5a). El procedimiento consistió en colocar muestras de suelo, previamente pasadas por un tamiz de 2 mm, en anillos de goma; posteriormente, se ponen a saturar en agua destilada durante 24 horas (Fotografía 5b).

Tras este proceso, se introducen en la cámara de presión (Fotografía 5c), regulando la presión con un manómetro de forma gradual hasta alcanzar la presión deseada. Pasadas 24 horas, se sacan las muestras, se pesan inmediatamente y se meten a estufa a 105 ºC hasta peso constante (Fotografía 5d). El procedimiento se repite en los siguientes puntos de presión: 10, 30, 50, 70, 100, 300, 500, 700, 900, 1100, 1300 y 1500 kPa. Así se obtienen todo el rango desde saturación hasta el punto de marchitez para la representación gráfica de la humedad y la tensión con que las partículas retienen agua en el suelo (potencial mátrico).

a

b

c

d

Fotografía 5: a) Cámaras Richards, b) muestras en agua, c) muestras en las ollas de presión, y d) muestras secando en estufa.

Para obtener el ajuste de las curvas de retención de humedad, se utilizó un modelo potencial (Ec. 7), que muestra un mejor ajuste para la respuesta de la humedad y la tensión hídrica.

$$\theta = a\Psi^{b} \qquad (7)$$

Siendo θ: contenido de humedad volumétrica ($m^3\ m^{-3}$), Ψ: tensión con que las partículas del suelo retienen el agua (kPa) y a y b: parámetros de ajuste del modelo.

Para el ajuste del modelo, se utilizó el programa estadístico Statgraphics 6.0 (Statistical Graphics Corp., Englewood Cliffs, USA). Dicho ajuste se realizó para cada horizonte de los cuatro tipos de suelo. Los horizontes Ap_1 y Ap_2 constituyen la capa arable del suelo y, además tienen la misma textura, y por ello presentaron modelos muy semejantes. En este sentido se optó por hacer una misma curva de retención para estos horizontes para cada perfil estudiado (Fig. 10).

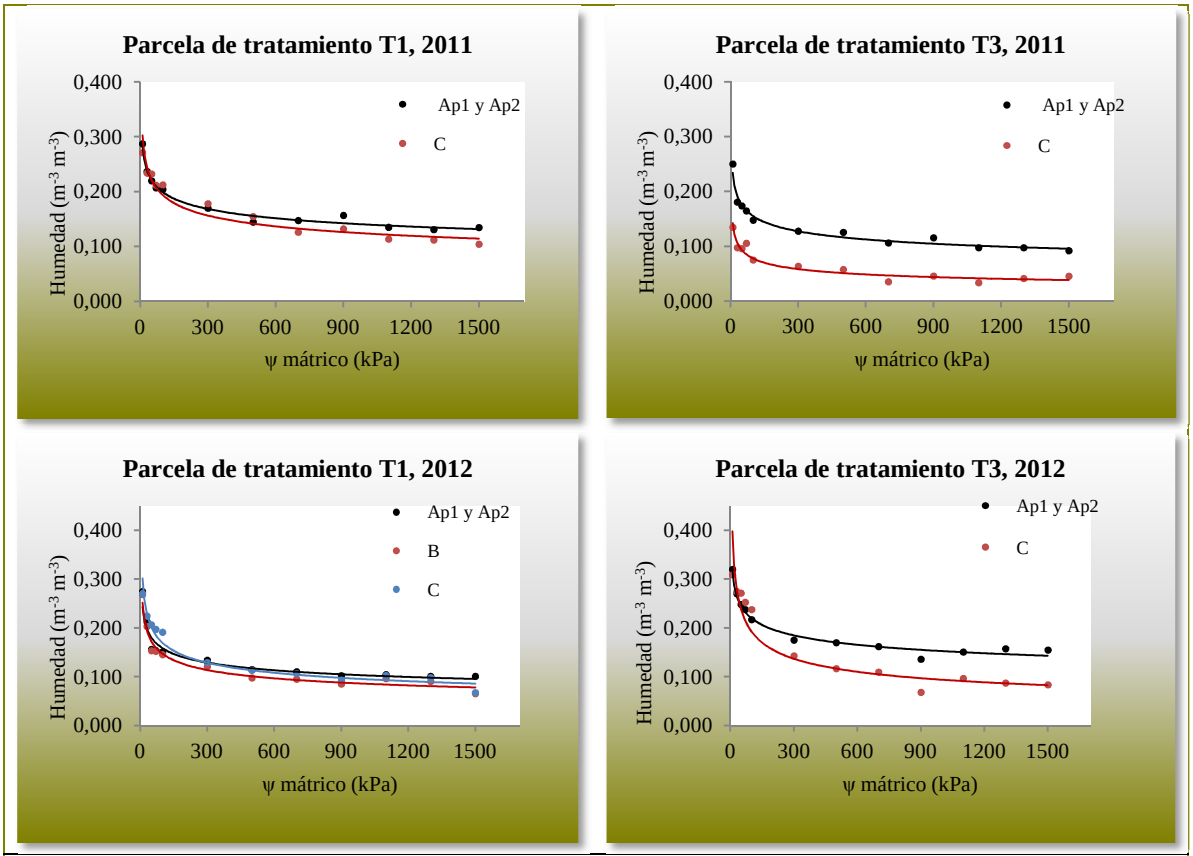


Figura 10: Curvas de retención de humedad de los suelos utilizados en los dos años de ensayo experimental.

En la tabla 23, se observa que existe un buen ajuste de los modelos en todos los horizontes analizados, obteniendo altos coeficientes de determinación (R^2), bajos valores del error estándar de la estimación y alto nivel de significación. También se describe en la tabla 23 los valores de humedad para las tensiones de 33 y 1500 kPa, (puntos de capacidad de campo y de marchitez permanente, respectivamente) (Vanderlinden *et al*., 2003; Carducci *et al*., 2012).

En caso de no disponer de instrumental para obtener las curvas, las ecuaciones de Gupta y Larson (1979) y Delgado y Barreto (1988) (Tabla 12) podrían ser útiles para obtener los puntos de capacidad de campo y de marchitez permanente en suelos de características similares a los empleados en este trabajo

Tabla 23: Modelos y parámetros estadísticos obtenidos en el análisis de las curvas de retención de humedad.

Año	Horizontes	Modelo	R^2	Nivel de significación	SE	θ (m^3 m^{-3}) a 33 kPa	θ (m^3 m^{-3}) a 1500 kPa
2011	T1- A_{p1} y A_{p2}	$\theta = 0{,}404\psi^{-0{,}154}$	0,983	**	0,007	0,236	0,131
	T1- C	$\theta = 0{,}432\psi^{-0{,}175}$	0,937	**	0,014	0,234	0,120
	T3- A_{p1} y A_{p2}	$\theta = 0{,}363\psi^{-0{,}185}$	0,969	**	0,008	0,190	0,094
	T3- C	$\theta = 0{,}242\psi^{-0{,}245}$	0,921	**	0,009	0,103	0,040
2012	T1- A_{p1} y A_{p2}	$\theta = 0{,}414\psi^{-0{,}207}$	0,936	**	0,013	0,201	0,091
	T1- B	$\theta = 0{,}454\psi^{-0{,}245}$	0,965	**	0,011	0,193	0,076
	T1- C	$\theta = 0{,}483\psi^{-0{,}228}$	0,959	**	0,013	0,218	0,091
	T3- A_{p1} y A_{p2}	$\theta = 0{,}464\psi^{-0{,}162}$	0,977	**	0,009	0,263	0,142
	T3- C	$\theta = 0{,}640\psi^{-0{,}256}$	0,885	**	0,031	0,260	0,097

R^2: Coeficiente de determinación, ** p<0,001, SE: Error estándar de la estimación.

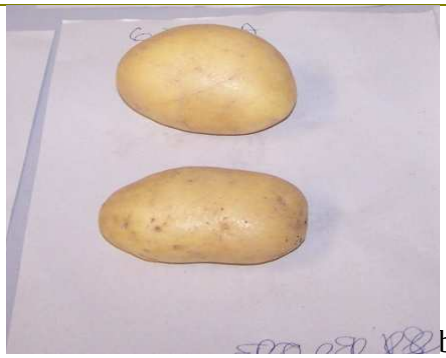
4.3 Fitotecnia de la patata en ensayo experimental.

4.3.1 Características de la variedad.

En el ensayo se utilizó la variedad Agria, que según el Catálogo Holandés de Variedad de Patata (NIVAP, 2011), presenta las siguientes características morfológicas:

- Planta alta, estructura del follaje de tipo intermedio (Fotografía 6a); tallos semierguidos a erguidos, coloración antociánica mediana; hojas grande, de color verde; silueta de abierta a semiabierta; inflorescencias numerosas, coloración antociánica ausente o muy débil de la cara interna del corola de la flor.
- Tubérculos de forma oval alargada, piel amarilla y lisa a bastante lisa (Fotografía 6b); pulpa amarilla y ojos superficiales. Según NIVAP (2011), esta variedad es apta para la industria de frito por cumplir con sus criterios de calidad (tubérculos de forma redondeada o alargada, ojos superficiales, calibre mediano (40 a 80 mm) y pulpa de color amarillo).
- Brotes grandes en forma de cilindro grueso (Fotografía 6c), coloración antociánica de muy fuerte a fuerte y pubescencia del brote de muy velloso a velloso; yema terminal mediana y coloración antociánica de muy fuerte a fuerte. En las puntas radicales (o corona) del tubérculo, los brotes son poco numerosos (Fotografía 6d).
-

a


b

c

d

Fotografía 6: a) porte de la planta con 79 días desde de la siembra, b) tubérculo, c) detalles del brote y d) numero de brotes en la corona del tubérculo partido utilizado en la siembra.

En la tabla 24 se presenta las características agrícolas de la variedad Agria.

Tabla 24: Características agrícolas de la variedad Agria

Maduración	Semitemprana a semitardía
Dormancia	Larga
Desarrollo del follaje	Bueno
Color de la piel	Amarilla
Color de la pulpa	Amarilla
Forma del tubérculo	Oval alargada
Superficialidad de los ojos	Superficiales
Tamaño de los tubérculos	Grande
Rendimiento	Muy alto
Materia seca	Bueno
Calidad culinaria	Bastante firme
Apta para	Patatas fritas
Resistencia a virus de enrolladle	Medianamente resistente
Resistencia para virus A	Muy buena resistencia
Resistencia para virus X	Resistente
Resistencia para virus Yn	Buena resistencia
Resistencia para phytophthora de la hoja	Bastante sensible
Resistencia a phytophthora del tubérculo	Bastante resistente
Resistencia a nematodo de quisto Ro1	Resistente
Sarna común	Sensible
Resistencia para azuleado	Buena resistencia

Fuente: NIVAP, 2011.

4.3.2 Marco de plantación.

La plantación se realiza con una plantadora automática de pinchos de dos líneas (1,5 m de ancho) (Fotografía 7a). Para plantación se utilizó el tubérculo madre partido en cuarto partes de un cultivar certificado (Fotografía 7b y c). Los tubérculos partidos pasaron por un tratamiento con insecticida previo a la plantación. Se utilizó un producto sistémico a base de Tiametoxan de cara a la protección de la patata semilla, de los insectos de suelo, y de la planta, de plagas que atacan hojas y/o tallos en las primeras semanas después de la germinación.

La plantación para los dos años experimentales se realizó en las fechas de 9/03/2011 y 17/03/2012. El marco de plantación fue de 0,25 x 0,75 m (plantas x filas), a los 30 cm de profundidad, constituyendo una densidad teórica de 5,33 tubérculos m^{-2} en el año de 2011 y, 0,20 x 0,75 m, a los 25 cm de profundidad, con densidad teórica de 6,66 tubérculos m^{-2} para el año de 2012.

a

b

c

Fotografía 7: a) Plantadora automática de pinchos, b) patata semilla certificada, cultivar Agria y c) patata semilla partida.

4.3.3 Operaciones y labores.

En las tablas 25 y 26 se presentan una relación de todas las labores y operaciones comunes para todos los tratamientos, durante los dos años de ensayo, así como las épocas en las que se llevaron a cabo.

Tabla 25: Itinerario de tratamiento y operaciones realizadas en el año experimental de 2011

Época	Labor/operación	Equipo	Materia prima
Enero	Labor profunda	Tractor 110 CV. Arado Chís el. 9 brazos.	
	Abonado de plantación	Tractor 110 CV. Remolque esparcidor.	8-15-15 (800 kg ha^{-1})
	Incorporación del compuesto orgánico	Tractor 110 CV. Abonadora centrifuga arrastrada, 2000 Kg.	Proveniente de la planta de compostaje de residuos sólidos urbanos de Almansa. (15000 kg ha^{-1})
Marzo	Tratamiento insecticida a la patata semilla	Equipo pulverizador	CRUISER® 350 FS líquido. Materia Activa: Tiametoxan 35 % (21 ml 100 kg^{-1} de patata)
	Plantación	Tractor 75 CV. Plantadora	21000 kg ha^{-1}
Abril	Pase para remontar caballón. Formación de mesetas	Arado	
	Tratamiento herbicida	Tractor 110 CV. Equipo pulverización suspendido	LEXONE® 70 WG_Granulado dispersable en agua. Materia Activa: Metribucina 70 % (0,6 kg ha^{-1})
Mayo	Abonado de cobertura	Tractor 110 CV. Abonadora centrifuga arrastrada, 2000 Kg.	Abono sólido nitrogenado al 21 % y 8 % de azufre. (600 kg ha^{-1})
	Tratamiento fungicida	Tractor 110 CV. Equipo pulverización suspendido	Ridomil®. Materia Activa: Folpet 40 % + Metalaxil-M 4,8 % (1,5 l ha^{-1})
Julio	Tratamiento insecticida	Sistema pivote	Clorpirifos 48 % (4,0 l ha^{-1})
Agosto	Tratamiento insecticida	Sistema pivote	Clorpirifos 48 % (4,0 l ha^{-1})
	Tratamiento herbicida desecante y mojante tenso activo	Tractor 110 CV. Equipo pulverización suspendido	Dicuat 20 % (3,0 l ha^{-1}) + mojante no iónico 20 % (3,0 l ha^{-1})
	Cosecha comercial	Arrancador hilerador arrastrado, 1,5 m	

Tabla 26: Itinerario de tratamiento y operaciones realizadas en el año experimental de 2012

Época	Labor/operación	Equipo	Materia prima
Enero	Labor profunda	Tractor 110 CV. Arado Chís el. 9 brazos.	
	Abonado de plantación	Tractor 110 CV. Remolque esparcidor.	8-15-15 (800 kg ha^{-1})
	Incorporación del compuesto orgánico	Tractor 110 CV. Abonadora centrifuga arrastrada, 2000 Kg.	Proveniente de la planta de compostaje de residuos sólidos urbanos de Almansa. (17350 kg ha^{-1})
Marzo	Tratamiento insecticida a la patata semilla	Equipo pulverizador	CRUISER® 350 FS líquido. Materia Activa: Tiametoxan 35 % (21 ml 100 kg^{-1} de patata)
	Plantación Tratamiento insecticida	Tractor 75 CV. Plantadora	1500 kg ha^{-1} Clorpirifos 48 % (4,0 l ha^{-1})
Abril	Pase para remontar caballón. Formación de mesetas	Arado	
	Tratamiento herbicida	Tractor 110 CV. Equipo pulverización suspendido	LEXONE® 70 WG_Granulado dispersable en agua. Materia Activa: Metribucina 70 % (0,6 kg ha^{-1})
Mayo	Abonado de cobertura	Tractor 110 CV. Abonadora centrifuga arrastrada, 2000 Kg.	Abono sólido nitrogenado al 21 % y 8 % de azufre. (425 kg ha^{-1})
Junio	Abonado de cobertura	Tractor 110 CV. Abonadora centrifuga arrastrada, 2000 Kg.	Abono sólido nitrogenado al 21 % y 8 % de azufre. (375 kg ha^{-1})
Julio	Tratamiento fungicida	Sistema pivote	Ridomil®. Materia Activa: Folpet 40 % + Metalaxil-M 4,8 % (4,0 kg ha^{-1})
	Tratamiento insecticida	Sistema pivote	Actara®. Materia Activa: Tiametoxame 25% (200 gr ha^{-1})
Agosto	Tratamiento insecticida	Sistema pivote	Clorpirifos 48 % (4,0 l ha^{-1})
Septiembre	Cosecha comercial	Arrancador hilerador arrastrado, 1,5 m	

En la tablas 27 se presenta los resultados del análisis químico, para los dos años de campaña, de la enmienda orgánica proveniente de la planta de compostaje de residuos urbanos del municipio de Almansa incorporado en el suelo. El análisis fue realizado por el laboratorio del Servicio del Asesoramiento a la Fertilización (SAF) del Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete (ITAP S.A).

Tabla 27: Análisis químico de la enmienda orgánica para los años de 2011 y 2012.

Determinaciones	2011	2012
Nitrógeno total (%)[1]	1,75	1,66
Nitrógeno amoniacal (%)[2]	0,17	0,12
Nitrógeno nítrico (%)[3]	0,05	0,09
Nitrógeno ureico (%)[4]	0,03	0,14
Fósforo soluble al agua y al citrato amónico (% P_2O_5)[3]	0,42	0,52
Potasio soluble al agua (% K_2O)[5]	0,88	0,99
Calcio soluble al agua (% Ca_2O)[5]	0,64	4,67
Magnesio soluble al agua (% MgO)[5]	0,22	0,13
Sodio soluble al agua (%)[5]	0,98	0,70
Hierro soluble al agua (ppm)	Inapreciable	Inapreciable
Manganeso soluble al agua (ppm)	Inapreciable	Inapreciable
Zinc soluble al agua (ppm)	Inapreciable	Inapreciable
Cobre soluble al agua (ppm)	Inapreciable	Inapreciable
Conductividad eléctrica (dS m^{-1})	1,60	2,50
Cenizas	1,23	1,21
pH[6]	9,07	8,77
Materia Orgánica total (%)[7]	27,32	28,16

[1]Kjeldahl, [2]volumetría, [3]espectofotometría ultravioleta –visible, [4]hidrólisis enzimática de la urea, nitrógeno orgánico (diferencia de las distintas formas de nitrógeno), [5]espectofotometría absorción atómica, [6]potenciometria 1:25 H_2O, [7]calcinación de la muestra.

4.4 La fenología del cultivo.

Rowe y Sector (1993) dividieron el ciclo del cultivo de la patata en cinco estadios de desarrollo principales:

- Siembra a emergencia: previamente a la emergencia, las yemas y raíces se desarrollan a partir del tubérculo, el cual constituye el único suministro de energía para la planta.
- Crecimiento vegetativo: las yemas salen a la superficie y se desarrollan las hojas y tallos. Las raíces comienzan la toma de nutrientes desde el suelo, y la energía es suministrada por la fotosíntesis.
- Inicio de la tuberización: empieza la formación de tubérculos en el extremo de los estolones.
- Tuberización: fase de llenado del tubérculo (engrosamiento). Durante esta etapa, ocurre la mayor extracción de nutrientes y por eso el adecuado suministro de agua es esencial. Esta etapa coincide con la floración plena y se finaliza la producción del follaje, realizándose la mayor actividad fotosintética.
- Maduración de los tubérculos: empieza la senescencia, la tasa fotosintética disminuye, así como, el crecimiento de los tubérculos. La epidermis del tubérculo se endurece.

En este sentido, Meier *et al*. (2009) afirma que estos estadios principales de desarrollo mencionados no son adecuados para describir con precisión las fases más cortas de desarrollo de la planta, y recomiendan el uso de la escala extendida BBCH (Hack *et al*., 1993). Por eso, se eligió dicha escala para describir la evolución del ciclo agronómico del cultivo de la patata.

La escala BBCH es un sistema para codificación uniforme de identificación fenológica de estadios de crecimiento para las especies de plantas mono y dicotiledóneas. El ciclo completo de desarrollo de las plantas se subdivide en diez fases principales claramente distinguibles. Estos estadios son descritos usando número de 0 a 9 en orden creciente (Tabla 28).

Tabla 28: Explicación de los estadios del ciclo agronómico de la patata según escala BBCH.

Estadio	Descripción
0	Germinación, brotación
1	Desarrollo de las hojas
2	Formación de brotes laterales
3	Crecimiento longitudinal (brotes principales)
4	Desarrollo de las partes vegetativas cosechables
5	Aparición del órgano floral
6	Floración
7	Formación del fruto
8	Maduración de frutos y semillas
9	Senescencia

En la clave BBCH, el código de 2 dígitos es una escala que ofrece la posibilidad de precisar y definir todos los estadios fenológicos secundarios para la mayoría de las especies de planta. En el caso de la patata, se necesita una subdivisión más detallada junto a un estadio principal de crecimiento que vaya más allá de las posibilidades de uso de los estadios secundarios, y para esto, se presenta una escala de 3 dígitos al lado de la escala de 2 dígitos (Fig. 11).

Para el cultivo de patata, también se hace necesario la inclusión de un mesoestadío, que es definido por una fase fenológica que incluye dos o más estadios principales de crecimiento, como es el caso del estadio de tuberización (Hack *et al*., 1993).

Durante toda la campaña, en los dos años de ensayo, se realizó un seguimiento del ciclo agronómico de la patata en todas las parcelas experimentales, con una periodicidad aproximada de siete días. Con los datos obtenidos, se ha realizado un análisis de la duración de las etapas, considerando los días transcurridos desde la plantación o nascencia del cultivo, recurriendo también al concepto de los grados días de crecimiento acumulados (GDD), que definen el desarrollo de las fases fenológicas en función de las condiciones acumulativas de la temperatura del ambiente (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004).

Los GDD se calculan diariamente desde los valores máximos y mínimos de la temperatura del aire (McMaster y Wilhelm, 1997) con la ecuación 8.

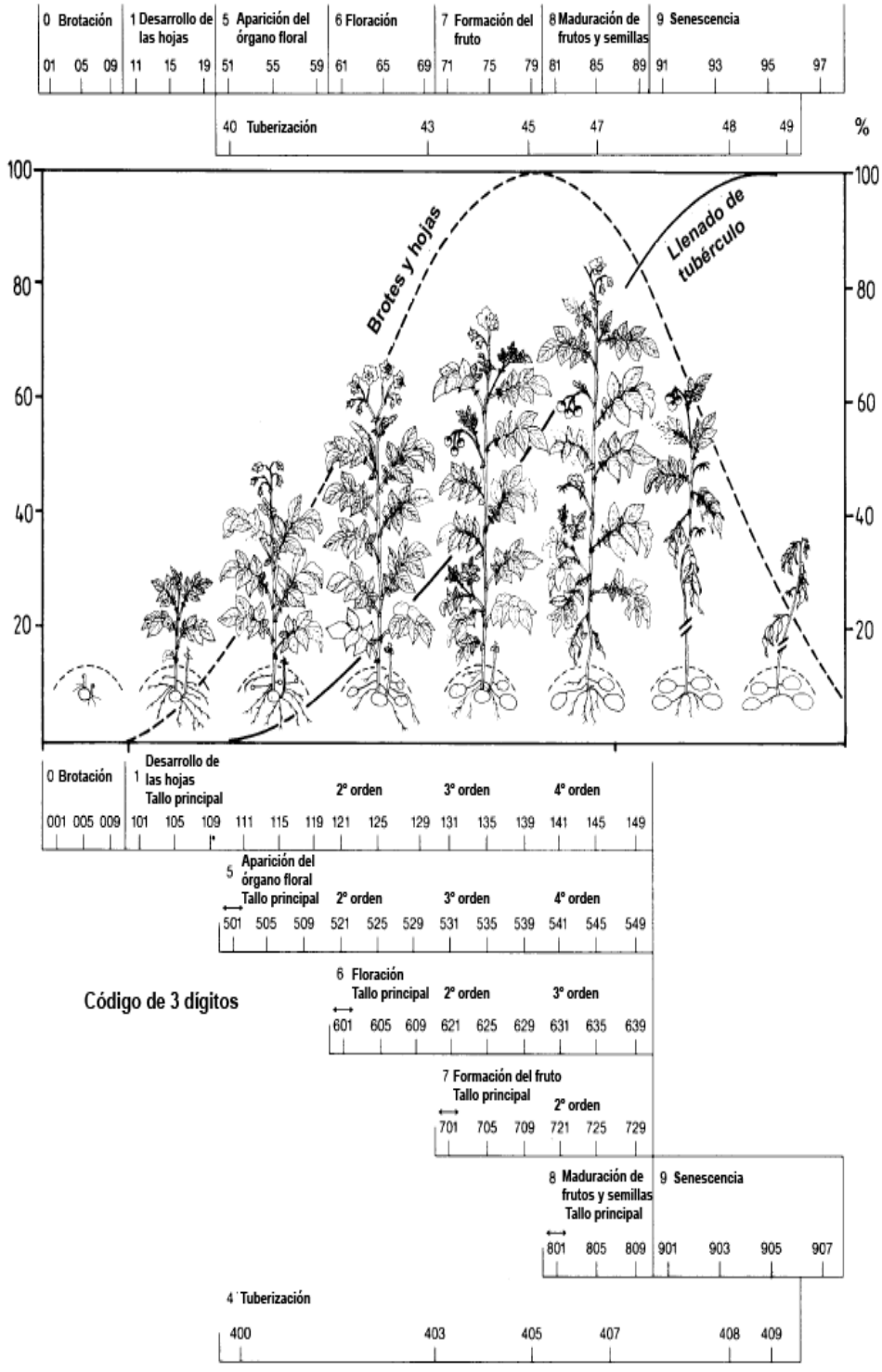
$$GDD = \left(\frac{T_{máx}+T_{min}}{2}\right) - T_b \qquad (8)$$

Con las siguientes condiciones:

Si $\left(\frac{T_{máx}+T_{min}}{2}\right) < T_b$, entonces $\left(\frac{T_{máx}+T_{min}}{2}\right) = T_b$

Si $\left(\frac{T_{máx}+T_{min}}{2}\right) > T_s$, entonces $\left(\frac{T_{máx}+T_{min}}{2}\right) = T_s$

Siendo GDD: grados días de crecimiento (ºC), $T_{máx}$: temperatura máxima diaria (ºC), T_{min}: temperatura mínima diaria (ºC), T_b: temperatura base o cero de vegetación (ºC) y T_s: temperatura superior, es decir, la temperatura máxima del aire por encima del cual cesa el crecimiento del cultivo (ºC).



Fuente: Hack *et al.*, 1993.

Figura 11: Codificación de los estadios fenológicos principales y secundarios para el cultivo de la patata.

La temperatura base (T_b) que la mayoría de los autores han utilizado para explicar el crecimiento en el cultivo de la patata se encuentra entre 2 y 7 ºC y la temperatura superior (T_s) entre 25 ºC y 36 ºC (Griffin *et al.*, 1993; Kooman y Haverkort, 1995; Ojeda-Bustamante *et al.*, 2000; Worthington y Hutchinson, 2005; Ahmadvand *et al.*, 2009). Dentro de estos intervalos y considerando las características del material vegetal, en el ensayo se utilizó la T_b de 2 ºC y T_s de 26 ºC (Steduto *et al.*, 2012).

Durante la fase de tuberización en el año de 2012, se registraron temperaturas máximas absolutas muy elevadas, llegando incluso a superar a los 40 ºC en el mes de agosto, pudiendo inducir el estrés térmico en el cultivo, con la consecuencia de la disminución del rendimiento.

4.5 Programación de riego.

La programación de riego se hizo en base a un balance hídrico simplificado, siguiendo la metodología FAO (Allen *et al.*, 1998). La evapotranspiración de referencia (ET_o) se calculó diariamente mediante la fórmula semiempírica de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2011a), a partir de los datos climáticos registrados en la estación agroclimatológica automatizada mencionada en la epígrafe 4.1.2.

El coeficiente de cultivo (Kc) también se estimó diariamente según las indicaciones de la FAO (Doorenbos y Kassam, 1986). La figura 12 representa la evolución del coeficiente del cultivo durante la programación de riego para cada año de ensayo.

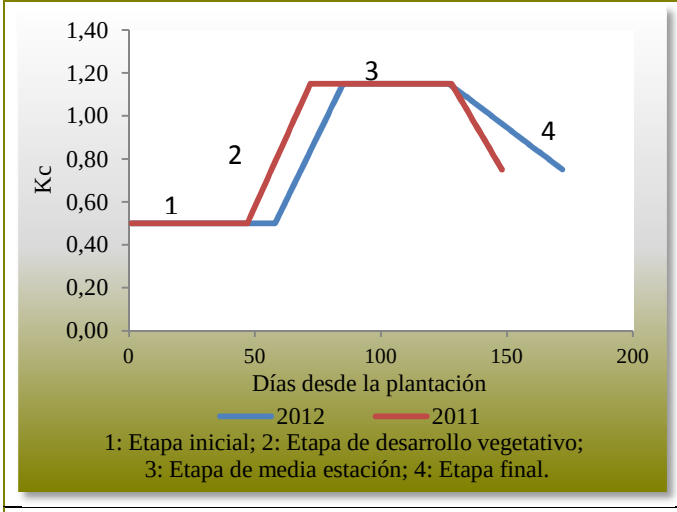


Figura 12: Evolución del coeficiente del cultivo (Kc).

En el año de 2012, la programación de riego utilizó un Kc de 0,50 hasta los 58 días desde la plantación (DDP) frente a los 47 DDP del año de 2011, debido a un retraso de la emergencia del cultivo en el segundo año de ensayo.

4.5.1 Evaluaciones de riego.

En el año de 2011, todos los riegos fueron nocturnos, de manera que se finalizaba a las primeras horas de la mañana, horario en que las condiciones climáticas son menos adversas. Sin embargo, en el año de 2012, los riegos fueron tanto nocturnos como diurnos, con el propósito de estudiar la influencia de algunos factores climáticos sobre el coeficiente de uniformidad. La carta de emisores colocada en 2011 fue la misma utilizada en el año de 2012, comprobando el correcto funcionamiento de la misma (ausencia de obstrucciones, adecuación de caudales descargados, etc.).

Se ha seguido la metodología propuesta por Merrian y Keller (1978) para la evaluación de la distribución de agua aplicada por el sistema pivote. Se utilizaron dos líneas de pluviómetros que seguían un radio del pivote en cada uno de los extremos del cuarto de la parcela experimental, con separación de 2 m entre ellos. Se colocaron los pluviómetros sobre soportes de metal de forma que estuviesen a unos 0,10 m sobre la altura máxima del cultivo y, así, evitar la interferencia de las hojas sobre el agua descargada por los emisores, quedando siempre más de 50 cm entre el borde de la recogida de agua del pluviómetro en el emisor (*Rotator*).

En el año de 2011, se hicieron 24 evaluaciones de los 46 riegos y, 31 evaluaciones en el año de 2012, de los 61 riegos. En cada evaluación, se calculó el coeficiente de uniformidad (CU) de Heermann y Hein (Tarjuelo, 2005) (Ec. 9), la uniformidad de distribución del agua aplicada (UD) (Ec. 10) y altura media recogida para cada tramo del pivote.

$$CU\ (\%) = \left[1 - \frac{\sum D_i\left(C_i - \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i D_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i}\right)}{\sum_{i=1}^{n} C_i D_i}\right] * 100 \qquad (9)$$

Siendo n: número de pluviómetros, C*i*: cantidad recogida por el pluviómetro *i* (mm) (con *i* variando entre 1 y *n*) y Di: distancia del centro pivote al pluviómetro *i* (m).

$$UD\ (\%) = \frac{AMR_{25}}{AMR} * 100 \qquad (10)$$

Siendo AMR_{25}: la altura media recogida en el 25% de los pluviómetros que menos agua recogen en el tramo (mm) y AMR: la altura media recogida en todo tramo (mm).

Asimismo, dentro de cada parcela experimental se instalaron seis pluviómetros (Fotografía 8), que permitió a su vez comprobar que los programas utilizados para cada riego fueron bien ejecutados.

Fotografía 8: Pluviómetros utilizados en su soporte sobre el cultivo de la patata.

Para minimizar el tiempo de lectura de los pluviómetros desde el final de riego, a fin de evitar el efecto de las pérdidas por evaporación, las evaluaciones se realizaban a poco tiempo del paso del equipo en la línea de pluviómetros que se encontraba en el extremo del cuarto del área.

Se desarrolló un modelo de regresión múltiple para estimar el cálculo de la altura media de agua recogida en cada parcela (AMRp), utilizándose como datos de entrada: 1) la altura media recogida en la línea de pluviómetros referentes a los tramos correspondientes a las parcelas de ensayo (AMR), 2) la altura media teórica descargada por el equipo en cada tramo (AMD) y 3) los datos climatológicos medio horarios que teóricamente influyen en las pérdidas del agua descargada (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y déficit de presión de vapor).

Tras una regresión múltiple por pasos, mediante el método de selección "hacia adelante", resulta que solamente las variables AMD y velocidad del viento son capaces de explicar la variabilidad en AMR con un R^2 de 99,66%. En la tabla 29 se describe el modelo de regresión lineal múltiple utilizada para el cálculo de AMRp. Esto modelo se aplicó en cada una de las 12 parcelas experimentales.

Tabla 29: Modelo de regresión lineal múltiple utilizada para el cálculo de agua recogida en parcela.

Modelo	R^2	SE	Nivel de significación
AMRp = 0,9339AMD + 0,2397Vv	0,9965	0,9601	**

R^2: Coeficiente de determinación, ** p<0,001, SE: Error estándar de la estimación, Vv: velocidad del viento.

Este modelo pone de manifiesto las perdidas por evaporación y arrastre por el viento obtenidas durante el proceso de aplicación del agua (diferencia entre el agua descargada y el agua recogida), habiendo obtenido resultados semejantes por Ortíz *et al.* (2009) (aproximadamente 10 %).

La programación de riego de los dos años experimentales se puede ver en las tablas 30 y 31. En ella está expuesto el programa de riego utilizado en cada fecha, así

como la dosis real promedio de agua aplicada en cada tratamiento según la velocidad a la que trabajaba el sistema pivote.

Entre los programas que llevaba el contador-secuenciador (subepígrafe 4.2.1), el programa P0 permitía el riego en todos los tratamientos, el programa P1 y P3 suspendían el riego en las parcelas del tratamiento de 60 %, el P2 suspendía el riego en las parcelas del tratamiento de 80 %, el P4 suspendía en las parcelas del tratamiento de 100 % y el programa P5 no permitía el riego en las parcelas de los tratamientos de 60 y 80 %. Así se cumplió la frecuencia de riego programada para los cuatro tratamientos (tabla 16).

Tabla 30: Calendario de riego de la cantidad media de agua real aplicado en cada tratamiento, en el año 2011.

Fecha	Programa	Velocidad del Pivote (%)	Promedio de la lámina real aplicada(mm)			
			120%	100%	80%	60%
07/04/11	P0	100	5,5	5,4	5,4	5,5
09/04/11	P0	40	13,5	13,6	13,8	13,7
13/04/11	P0	40	14,1	14,2	14,2	14,2
10/05/11	P0	100	4,9	4,9	4,9	4,9
11/05/11	P0	40	14,7	14,7	14,7	14,7
13/05/11	P0	40	14,3	14,2	14,2	14,2
18/05/11	P0	40	14,2	14,3	14,3	14,3
23/05/11	P0	40	14,2	14,3	14,2	14,3
26/05/11	P1	40	14,7	14,7	14,7	
28/05/11	P2	40	14,2	14,1		14,2
30/05/11	P3	40	13,3	13,7	13,4	
01/06/11	P4	40	15,7		16,4	17,1
04/06/11	P5	40	13,6	13,4		
06/06/11	P5	40	13,8	13,6		
10/06/11	P0	40	12,8	12,1	12,1	13,2
12/06/11	P1	40	12,1	11,6	11,2	
14/06/11	P2	40	14,1	14,1		14,1
15/06/11	P3	40	14,2	13,9	14,1	
18/06/11	P4	40	13,5		13,5	13,5
19/06/11	P5	40	13,4	13,4		
21/06/11	P0	30	17,5	17,2	17,4	17,8
23/06/11	P1	30	18,5	18,3	18,3	
24/06/11	P2	30	17,9	17,8		17,8
26/06/11	P3	30	18,2	18,1	18,3	
27/06/11	P4	30	18,9		17,8	18,0
29/06/11	P5	30	18,3	18,3		
30/06/11	P0	30	17,7	17,0	17,4	16,5
02/07/11	P1	30	18,6	18,5	18,4	
03/07/11	P2	30	18,6	18,4		18,5
06/07/11	P3	30	17,5	18,5	17,8	17,3
09/07/11	P4	30	18,4		18,4	18,5
10/07/11	P5	30	18,5	18,5		
12/07/11	P0	30	17,1	17,6	17,4	17,6
13/07/11	P1	30	18,4	18,0	17,7	
15/07/11	P2	30	17,8	17,4		17,2
16/07/11	P3	30	17,7	17,8	17,8	
18/07/11	P4	30	17,9		18,0	17,3
20/07/11	P5	30	18,0	17,7		
21/07/11	P0	100	4,4	4,4	4,5	4,5
23/07/11	P0	30	17,8	18,0	18,1	17,6
25/07/11	P1	30	17,5	17,8	17,6	
27/07/11	P2	30	16,6	17,2		14,9
29/07/11	P3	30	16,3	17,5	16,2	
31/07/11	P4	30	17,9		18,1	17,9
02/08/11	P5	30	17,1	17,5		
05/08/11	P0	80	6,3	6,5	6,7	6,4

Tabla 31: Calendario de riego de la cantidad media de agua real aplicado en cada tratamiento, en el año 2012

Fecha	Programa	Velocidad del Pivote (%)	Promedio de la lámina real aplicada(mm			
			120%	100%	80%	60%
03/04/12	P0	40	12,9	12,9	12,7	12,8
14/04/12	P0	40	12,8	12,6	12,7	12,6
21/04/12	P0	100	4,7	4,7	4,7	4,7
22/04/12	P0	40	12,7	12,7	12,8	12,7
04/05/12	P0	100	5,3	5,3	5,1	5,1
14/05/12	P0	100	5,6	5,6	5,7	5,6
16/05/12	P0	30	17,6	17,6	17,6	17,7
18/05/12	P0	40	12,5	12,7	12,6	12,6
22/05/12	P0	30	17,6	17,4	17,4	17,4
25/05/12	P1	40	12,8	12,6	12,7	
27/05/12	P2	40	12,9	13,0	12,9	
29/05/12	P3	40	12,9	12,8		12,8
31/05/12	P4	40	12,8		12,7	12,6
03/06/12	P5	40	12,9	12,9		
05/06/12	P0	30	17,5	17,6	17,5	17,5
08/06/12	P1	30	17,5	17,3	17,2	
09/06/12	P2	30	17,6	17,6		17,6
11/06/12	P3	30	17,4	17,4	17,3	
13/06/12	P4	30	17,7		17,6	17,6
14/06/12	P0	100	5,2	5,2	5,2	5,1
15/06/12	P5	30	17,2	17,1		
17/06/12	P0	30	17,5	17,4	17,4	17,4
19/06/12	P1	30	17,1	17,2	17,2	
21/06/12	P0	100	5,5	5,5	5,4	5,4
25/06/12	P0	50	10,2	10,1	10,1	10,1
27/06/12	P0	30	17,1	17,1	17,1	17,1
29/06/12	P0	30	17,4	17,3	17,3	17,4
30/06/12	P0	30	17,0	17,0	17,0	17,0
02/07/12	P0	30	17,6	17,6	17,6	17,6
03/07/12	P1	30	17,2	17,2	17,0	
05/07/12	P2	30	17,5	17,3		17,4
06/07/12	P3	30	17,4	17,3	17,3	
08/07/12	P4	30	17,7		17,6	17,7
09/07/12	P5	30	17,0	16,9		
11/07/12	P0	30	17,5	17,6	17,6	17,6
12/07/12	P0	100	5,6	5,5	5,6	5,6
14/07/12	P1	30	17,6	17,6	17,6	
15/07/12	P2	30	17,3	17,3		17,3
17/07/12	P3	30	16,9	17,0	17,2	
18/07/12	P4	30	17,3		17,2	17,1
21/07/12	P5	30	17,5	17,4		
22/07/12	P0	30	17,3	17,3	17,3	17,2
24/07/12	P1	30	16,7	16,6	16,7	
26/07/12	P2	30	17,0	16,9		17,0
28/07/12	P3	30	17,6	17,5	17,6	
30/07/12	P4	30	16,9		17,0	17,0
01/08/12	P5	30	17,4	17,5		
03/08/12	P0	30	17,7	17,6	17,5	17,5
05/08/12	P1	30	17,6	17,6	17,6	
07/08/12	P2	30	17,1	17,2		17,0
09/08/12	P3	30	17,0	17,1	16,8	
12/08/12	P4	30	17,7		17,6	17,6
15/08/12	P5	30	17,4	17,3		
18/08/12	P0	40	12,7	12,7	12,6	12,7
20/08/12	P0	40	12,6	12,7	12,9	12,7
22/08/12	P1	40	12,7	12,7	12,5	
25/08/12	P0	100	5,2	5,2	5,0	5,1
25/08/12	P1	40	12,0	12,1	12,0	12,0
29/08/12	P2	40	12,7	12,8		12,8
01/09/12	P3	40	12,5	12,4	12,6	
04/09/12	P0	40	12,8	12,8	12,9	12,7

En la fecha de 19/06/2012, parte de la provincia de Albacete sufrió una tormenta, y, por este motivo, se modificó el calendario de riego (hasta el 30/06/2012), con el objetivo de no causar ningún estrés hídrico de cara a la recuperación del cultivo.

4.6 Medidas de la humedad del agua en el suelo.

Dentro de los equipos *Frequency Domain Reflectometry* (FDR), está la sonda de capacitancia EnviroScan® desarrollado por las empresas Sentek Pty Ltd., South Australia. Estas sondas, se basan en la medición en unos lugares fijos, seleccionados previamente mediante estudio o reconocimiento de los suelos que componen la parcela de riego (Mead *et al*., 1995; Evett *et al*., 2012). La calidad de los datos obtenidos por la sonda dependerá de la calidad de la calibración obtenida entre la señal de salida del sensor, esto es, la frecuencia medida y el contenido del agua del suelo (θv, $m^3\ m^{-3}$).

Morgan *et al*. (1999), identificada la necesidad de medir de manera continua y fiable el contenido de agua en suelos de textura arenosa, cuya característica más importante es su baja retención de agua, estudiaron el comportamiento del EnviroScan® en este tipo de suelo y concluyeron que es necesaria la calibración, no aconsejándose utilizar la propuesta de modo general por el fabricante.

Para la utilización de la sonda EnviroScan® hay que tener en cuenta los errores que pueden producirse y sus causas, tales como, la utilización de una curva de calibración incorrecta para el tipo de suelo en el que se va a utilizar el equipo, los provocados por la instalación en campo (por alterar la estructura del suelo circundante a los tubos de PVC) y los producidos por variaciones en la temperatura del suelo.

Paltineanu y Starr (1997) señalan que la utilidad del sensor de capacitancia insertado en el tubo de acceso es potencialmente afectada por la humedad descontrolada dentro de los tubos de acceso, el cambio de posición en la orientación dentro de los tubos, la no uniformidad del espesor de las paredes y el aire atrapado alrededor del tubo causado por una deficiente instalación. Si se tiene cuidado en la instalación de los tubos de acceso y los sensores son cuidadosamente calibrados, estos potenciales problemas se minimizan y los registros pueden describir con mucha precisión el comportamiento y la evolución del agua en el suelo.

4.6.1 Calibración de los sensores en laboratorio.

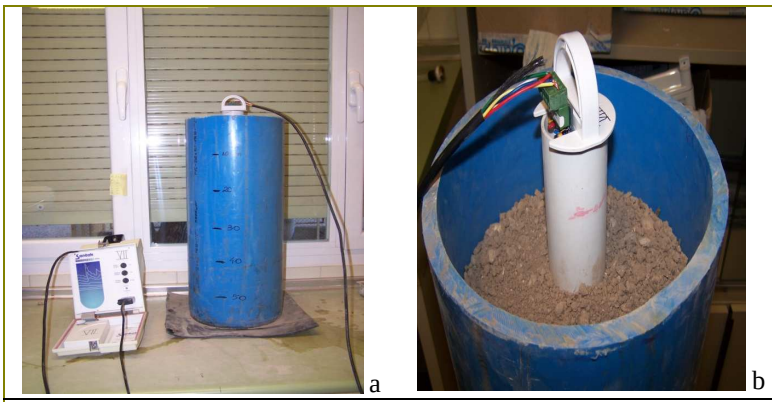
Los sensores fueron calibrados, en laboratorio, para los dos tipos de suelo utilizados en el año de 2011, según metodología de Camargo *et al*. (2012).

Para realizar la calibración, se utilizó un tubo de PVC de 30 cm de diámetro y 60 cm de alto. Este tubo se selló en su parte inferior con una goma de mayor diámetro que el tubo. En el centro, se colocó un tubo de acceso, PVC de 51 mm, pegado a la goma que hacia hermética la parte inferior de ambos tubos (Fotografía 9a).

Dicho dispositivo fue llenado con suelo en el mismo orden que se presentaba los horizontes en el perfil, respetando la profundidad de cada horizonte (Fotografía 9b), a fin de representar las mismas condiciones de campo, y secado a 105 ºC en una estufa de circulación forzada de aire.

Así, se trató de reproducir las condiciones del suelo en el dispositivo de calibración formado por el tubo de acceso central y el contenedor del suelo.

La cantidad de suelo utilizada fue la necesaria para llenar el depósito hasta las profundidades de cada horizonte; en base a esto, se estableció usar 3 proporciones de suelo para formar capas de 5 cm dentro del contenedor considerando la densidad aparente, medida con muestras no alteradas, correspondientes a cada estrato. En la parte interior y exterior del depósito se colocaron escalas con marcas desde 0 a 60 cm de altura que servían de guía para darle la altura a la cantidad de suelo agregada. A cada proporción de suelo, se le agregó, inicialmente, 5% de agua en base a peso del suelo seco y se mezcló cuidadosamente hasta homogenizar bien el suelo con el agua.



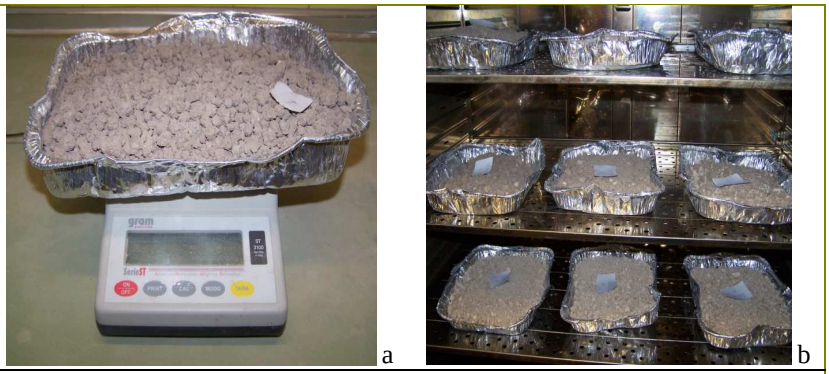
a b

Fotografía 9: a) Dispositivo para calibración y b) su interior lleno con suelo.

Una vez lleno el depósito, el EnviroScan® fue programado para hacer una lectura por minuto. Los datos fueron almacenados en un *datalogger* iSIC (Intelligent Sensor Interface & Control, Sentek Pty Ltd., South Australia) y luego visualizados mediante el *software* de Sentek Irrimax®. Se realizaron ocho medidas de frecuencia para cada humedad aplicada en seis tubos con sensores ubicados a 10, 20, 30 y 40 cm de profundidad.

Inmediatamente después de realizar las lecturas de frecuencia, se tomaron tres muestras de suelo para cada uno de los tres horizontes en el centro de la corona del suelo del contenedor, próxima a las zonas medidas con los sensores. Posteriormente, las muestras se desecaron en estufa a 105 ºC hasta peso constante, para determinación de humedad gravimétrica.

Luego, se extraía el resto de suelo del cilindro de calibración, separado por horizonte (en bandejas) con cuidado para no mezclar las muestras, (Fotografía 10a y b). Tras el secado de las muestras, nuevamente, se agregaba una cantidad de agua conocida.



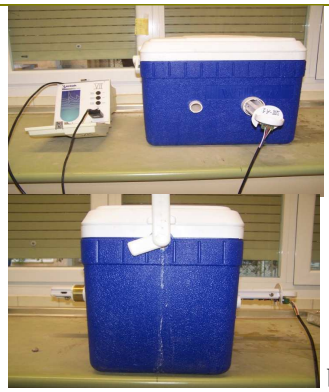
a b

Fotografía 10: a) Pesaje del suelo y b) secado en estufa.

El procedimiento se repitió tanta veces como el suelo lo permitió, ya que el mismo llega a un estado de humedad que no permite realizar la lectura, por lo pegajoso que se vuelve la mezcla agua-suelo.

Previamente, todos los sensores fueron normalizados tanto en aire como en agua (Fotografía 11a y b), lo cual consiste en meter cada sonda en un tubo rodeado de agua y otro rodeado de aire. Estas dos lecturas marcan el rango en el cual los sensores serán capaces de detectar el contenido de humedad en el suelo. La sonda calcula el valor de humedad del suelo en función de una relación existente entre la humedad y la frecuencia normalizada (SF) (Ec. 11).

a


b

Fotografía 11: a) Normalización del sensor en aire y b) en un contenedor lleno de agua.

$$SF = (fa - fs)/(fa - fw) \qquad (11)$$

Siendo fa: la lectura de frecuencia del sensor en el aire seco, fw: la lectura de frecuencia del sensor sumergido en agua y fs: la lectura de frecuencia del sensor en el suelo.

Los valores de fa y fw se fijan al aparato y salvo averías o variaciones se mantienen para todas las medidas.

El contenido de agua en el suelo (θ) es entonces una función exponencial de SF.

$$\theta = \{(SF - c)/a\}^{(1/b)} \qquad (12)$$

Donde a, b y c son coeficientes que varían según la calibración, y dependiendo de ellos se puede obtener la humedad gravimétrica o volumétrica.

4.6.2 Instalación de los sensores en campo.

Para medir la humedad de manera continua, en cada parcela experimental, se colocaron 3 sondas EnviroScan® (Fig.12 y 13) con cuatro sensores cada una a intervalos de 10 cm.

Para introducir los tubos dentro del suelo, sé utilizo el *kit* de instalación que provee y recomienda el fabricante. Para que el tubo quedara totalmente vertical se colocó en un trípode, previamente nivelado; se introdujo y se extrajo el suelo de la parte interior del tubo con una barrena; la operación se repitió hasta 40 cm de profundidad (Fotografía 12a). Previamente, se limpió el tubo y se colocó un tapón en la parte inferior del mismo para hermetizarlo, y así no tener lecturas erróneas por entrada de agua al tubo. Una vez abierto el agujero, y después de meter el tubo con las sondas, se agregó una pasta que se hizo con agua y con el mismo suelo extraído con el fin de asegurar un contacto adecuado entre el suelo y el sensor, evitando además el efecto de posibles piedras en contacto con el tubo (Fotografía 12b).

a

b

Fotografía 12: a) *Kit* de instalación Sentek con barra extractora y b) tubo instalado.

Para medir la humedad se conectaron los sensores a un *datalogger* (Fotografía 13) que registraba la humedad cada hora.

Fotografía 13: Sensores conectados al *datalogger*.

4.7 Medidas de la tensión del agua en el suelo.

Los sensores Watermark (Irrometer Corp., Riverside, CA, USA) están compuestos, básicamente, por dos electrodos concéntricos situados dentro de una matriz granular que se encuentra revestida por una malla de acero inoxidable con amplias aberturas. Los electrodos presentes en el sensor miden la resistencia al paso de la corriente eléctrica. Cuanto mayores sean las lecturas de resistencia, menor será el contenido de agua en el suelo y más negativa la tensión del agua en el mismo (Jiménez *et al*., 2010).

Para medir la evolución de la tensión de la humedad en el suelo, se instalaron, en el año de 2011, 4 sensores en las parcelas que recibían los tratamientos de 120, 100 y 80 %, 2 sensores instalados a los 20 cm de profundidad y los otros 2 a los 40 cm (Fig. 13), además de una sonda de temperatura. En el año de 2012, se instalaron grupos de 2 sensores a las profundidades de 20, 30 y 40 cm en las 12 parcelas experimentales (Fig. 14), y un sensor de temperatura en cada una. En ambos casos, los grupos de sensores de cada parcela se conectaron a un integrador AM-400 Hansen (Irrometer Corp., Riverside, CA, USA), que permite registrar continuamente la tensión con un intervalo de 8 horas.

Para realizar la instalación en campo, se utilizó una barrena de diámetro un poco mayor que el tubo donde se fijó el Watermark y, después de instalado el sensor, se siguió la misma metodología de instalación de los EnviroScan®, llenando el agujero con la mezcla de agua y el mismo suelo extraído (Fotografía 14a). Previo a la instalación, los sensores se colocaron en un cubo con agua durante 24 horas para saturar los mismos y, así, desplazar todo el aire del sensor.

a

b

Fotografía 14: a) Tubo instalado y b) proximidad de los tubos instalados de Watermark y EnviroScan®.

En cada parcela, los sensores Watermark se instalaron próximos a los sensores EnviroScan® (Fotografía 14b), para que todos los sensores estuvieran en condiciones de suelo igual o parecido y tratar de considerar la variabilidad del suelo.

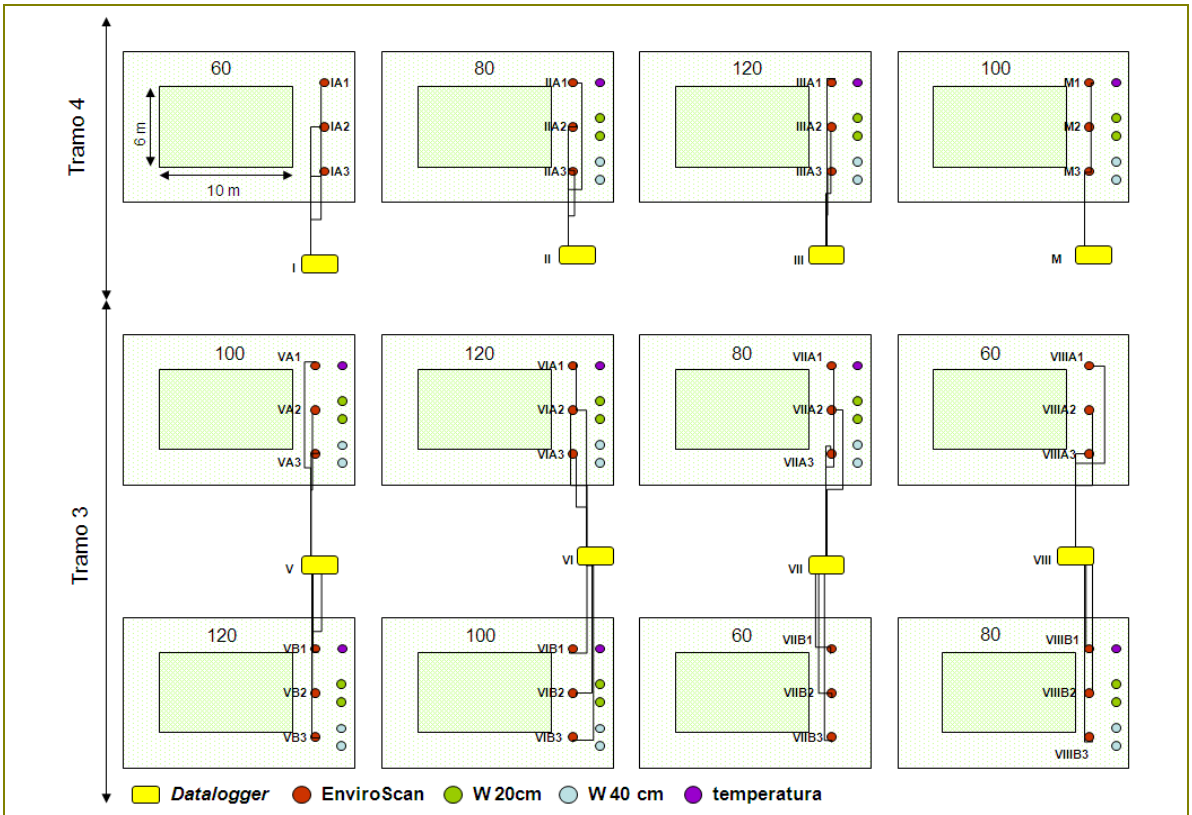


Figura 13: Croquis con la disposición de los sensores EnviroScan®, Watermark y de la temperatura en el suelo en las parcelas experimentales en el año 2011.

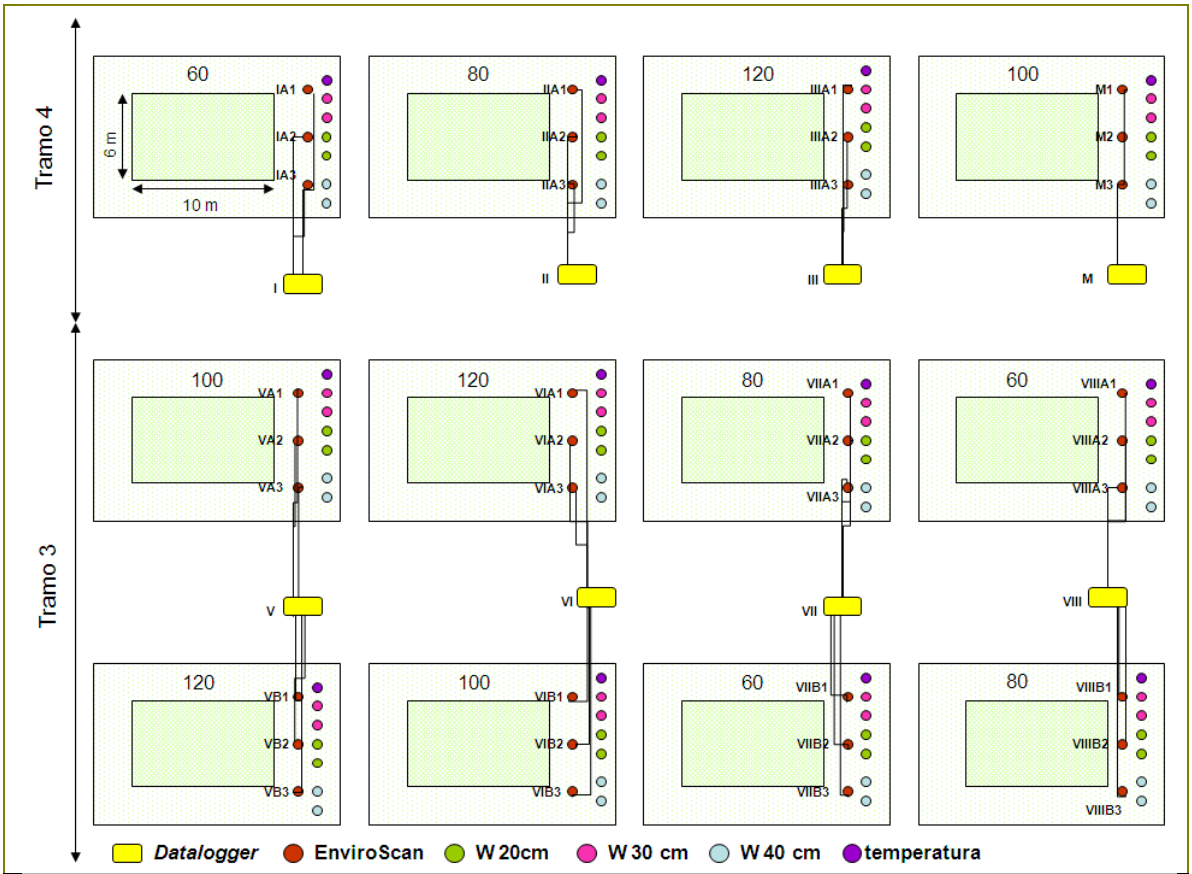


Figura 14: Croquis con la disposición de los sensores EnviroScan®, Watermark, y de la temperatura del suelo en las parcelas experimentales en el año 2012.

Es importante señalar que tras la instalación de ambos sensores (EnviroScan® y Watermark), hay que esperar un periodo para que se establezca un adecuado equilibrio entre la corona de suelo que rodea el tubo de instalación y el suelo, así pues, se entiende que, cuando las lecturas dejan de ser anómalas (tensiones bajas o humedades exageradamente altas) y pasan a tener un equilibro coherente a lo largo de los días, el suelo que circunda los tubos de instalación y el suelo natural ya presentan la misma estructura.

En el segundo año de ensayo, se optó por hacer un seguimiento de la humedad del suelo mediante medida directa, de cara a la contrastación con los datos medidos por los sensores. Con una frecuencia quincenal, se recogieron muestras para gravimetría de las doce parcelas experimentales a los 10 y 20 cm de profundidad.

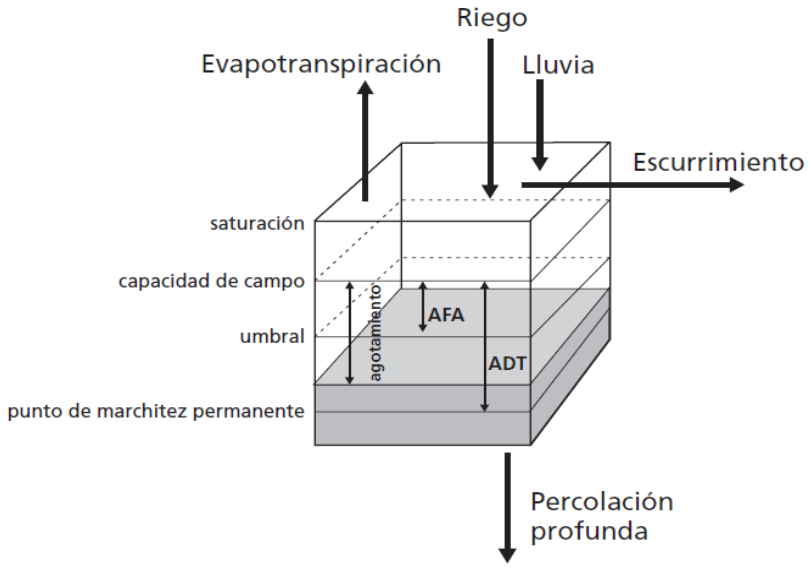
4.8 Determinación de la evapotranspiración del cultivo.

La cuantificación de la evapotranspiración (ET) del cultivo se realizó mediante el método del balance simplificado (Fig. 15). Dicho método consiste en calcular la diferencia diaria entre los valores de la humedad del suelo, en forma de lámina de agua, donde la lluvia y el riego son procesos que añaden agua a la zona radicular y, los procesos de ET y las pérdidas por percolación, que remueven agua de la zona radicular y aumentan el agotamiento de la humedad del suelo (Allen *et al*., 1998; Mermoud *et al*., 2005; Jin *et al*., 2007; Zhang *et al*., 2008). Por lo tanto, en condiciones limitantes de la disponibilidad del agua en el suelo, la ET del cultivo es calculada en función de un coeficiente de estrés (K_s) conforme la ecuación 13.

$$ET_c = K_s K_c ET_o \qquad (13)$$

Siendo ETc: evapotranspiración real del cultivo, K_s: coeficiente de estrés hídrico, K_c: coeficiente de cultivo y ET_o: evapotranspiración de referencia.

Según Allen *et al*. (1998), la estimación del K_s requiere del cálculo de un balance diario de humedad para la zona radicular del suelo, conforme representado en la figura 15.



Fuente: Allen *et al*., 1998.
Figura 15: Balance hídrico en la zona radicular.

El K_s es un factor adimensional que varía de 0 a 1 dependiendo de la cantidad de agua disponible en el suelo, pudiendo ser calculado mediante la ecuación 14.

$$K_s = \frac{ADT-D}{ADT-AFA} = \frac{ADT-D}{(1-p)ADT} \quad (14)$$

Siendo ADT: agua disponible total en la zona radicular del suelo (mm), D: agotamiento de humedad en la zona radicular (mm), AFA: agua fácilmente aprovechable por las raíces (mm) y p: fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico.

Se entiende como el agua disponible total (ADT) o agua útil (AU), el total de agua disponible en la zona radicular referente a la diferencia entre los contenidos de humedad de la capacidad de campo (CC) y del punto de marchitez permanente (PMP), puesto que el contenido de humedad por encima de la CC no pueden ser retenidos por el suelo y son drenados y, que el contenido de humedad por debajo del PMP no pueden ser extraídos por las raíces de las plantas.

De acuerdo con Allen *et al*. (1998), a pesar de que en teoría existe agua disponible hasta alcanzar el PMP, la cantidad de agua extraída por el cultivo reduce significativamente antes de alcanzar el PMP. Cuando el contenido de humedad del suelo esté por debajo del cierto valor umbral (Fig. 15), el agua del suelo no podrá ser transportada hacia las raíces con la velocidad suficiente para satisfacer la demanda transpiratoria y el cultivo comienza a sufrir estrés. Por eso, se determina el agua fácilmente aprovechable (AFA) o nivel de agotamiento permisible (NAP), que es denominado como una fracción del ADT en que el cultivo puede extraer sin sufrir estrés hídrico. En la Tesis Doctoral, se optó por seguir la metodología de Allen *et al*. (1998) para el cálculo de AFA (Ec. 15), donde la fracción del ADT, que puede ser agotada de la zona radicular antes de que el cultivo presentar estrés, es calculada mediante un valor teórico *p*, recogido en el manual de FAO 56, y la ETm (Ec. 16).

$$AFA = p\ ADT \quad (15)$$

Siendo AFA: agua fácilmente aprovechable, *p*: fracción promedio del total de agua disponible en el suelo que puede ser agotada antes de causar estrés hídrico al cultivo y ADT: agua disponible total.

$$p = p_t + 0{,}04(5 - ET_m) \quad (16)$$

Siendo p_t: fracción de agotamiento teórico para ET = 5 mm día^{-1} (para el cultivo de patata se utiliza 0,35) y ET_m: evapotranspiración del cultivo (mm día^{-1}).

4.8.1 Métodos alternativos de la estimación de la ET real del cultivo.

Con el objetivo de contrastar los valores de ET del cultivo calculado por la metodología del balance hídrico simplificado teórico, se calculó la ET real mediante dos métodos alternativos: 1- balance hídrico a través de la monitorización de la humedad volumétrica (θv) del extrato del suelo a través de los sensores FDR EnviroScan®, y 2- el método Balance de Energía - Relación de Bowen (BREB).

4.8.1.1 Sensores FDR.

Como indica el subepígrafe 4.6.2, se instalaron tres sondas en cada parcela, con sensores a 10, 20, 30 y 40 cm de profundidad, sin embargo, se estimó la ET real diaria del

cultivo hasta a la profundidad del plano de flujo cero. Hay que destacar que el mayor volumen de raíces se encuentra en los primeros 20-30 cm (Fotografía 15).

Dicho método permite estimar la ET real del cultivo, a través de un balance simplificado mediante la diferencia entre los valores máximos de la θv (correspondientes al aporte de agua por lluvia y/o riego) y los valores mininos de la θv anteriores al próximo riego (ocasionada por pérdida de agua en el estrato por ET y/o percolación) (Arauzo *et al*., 2003; Arauzo *et al*., 2007; Zhang *et al*., 2008; Evett *et al*., 2012).

La ET real diaria del cultivo se calculó para los días consecutivos entre intervalos de riego.

Fotografía 15: Raíces y tubérculos concentrados a los 20 y 30 cm de profundidad en el suelo.

4.8.1.1.1 Determinación del plano de flujo cero.

En los días en que fue posible estimar la ET real del cultivo, se representó el potencial hídrico (ψh) a los 20, 30 y 40 cm de profundidad, en base a los datos proporcionados por los sensores Watermark® instalados en el año de ensayo 2012, a fin de ubicar el plano de flujo cero (PFC) (Scanlon *et al*., 2002; Walvoord *et al*., 2002; Hammecker *et al*., 2003; Kimura *et al*., 2007; Jiménez *et al*., 2010).

Para el cálculo del ψh se siguió la metodología propuesta por Kimura *et al*. (2006) donde se suma el potencial mátrico (ψm) medido por los sensores con la profundidad en que se encuentra el sensor (Ec. 17).

$$\psi_h = \psi_m - z \qquad (17)$$

Siendo ψ_h: potencial hídrico (cbar), ψ_m: potencial mátrico (valor negativo, cbar) y z: profundidad a la que está ubicado el sensor (cbar).

4.8.1.2 Relación de *Bowen*.

Para la determinación de la ET real del cultivo mediante el método Balance de Energía - Relación de Bowen (BREB), se instaló el equipo *Bowen Ratio* (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) en los dos años experimentales, en una parcela que recibía el tratamiento de 120 % de las necesidades hídricas. La metodología BREB consiste en estimar la cantidad de calor latente (λE), que es la energía empleada en la evapotranspiración (Malek y Bingham, 1993; Malek, 1994; Todd *et al*., 2000; Peña *et al*., 2001; Payero *et al*., 2003; Zhang *et al*., 2008; Balbontín *et al*., 2011).

La instalación se llevó a cabo en función de los estados fenológicos del cultivo (Tabla 32), registrando datos durante el periodo más amplio posible en función de la programación de riegos efectuada. De esta forma, al menos se dispone de datos de 48 horas seguidas en cada momento de interés según la evaluación del crecimiento y desarrollo del cultivo.

En cuanto a los límites del área donde se instaló el equipo, el borde más cercano estableció un *fetch* (relación entre la distancia del borde del campo y la altura donde está situados los sensores) de 30:1. En la literatura, existe una variación entre los criterios de los autores en relación al *fetch*, pudiendo oscilar entre relaciones de 10:1 y 200:1 (Malek, 1994; Angell *et al*., 2001; Peña *et al*., 2001; Brotzge y Crawford, 2003; Inman-Bamber y McGlinchey, 2003; Payero *et al*., 2003; Allen *et al*., 2011). Sin embargo, Heilman *et al.*

(1994) afirman que es suficiente un *fetch* del tipo 20:1, considerando el método BREB menos crítico a tales necesidades.

Tabla 32: Fecha de instalación del equipo *Bowen Ratio*.

2011		2012	
31 de marzo	Suelo desnudo (tras plantación	23 de abril	Suelo desnudo (tras plantación)
15 de junio	Floración	05 de junio	Floración
06 de julio	Máximo desarrollo vegetativo	19 de julio	Máximo desarrollo vegetativo
02 de agosto	Senescencia	23 de agosto	Senescencia

El método BREB requiere calcular la energía disponible (Rn-G) en base a los gradientes de temperatura y humedad sobre el cultivo. La distribución de la energía entre los flujos de λE y calor sensible (H) se calcula mediante la Relación de Bowen (BR) (Ec. 18).

$$BR = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{\Delta t}{\Delta e} \qquad (18)$$

Siendo γ: constante psicométrica (kPa $^{o}C^{-1}$) y Δt (^{o}C) y Δet (kPa): gradiente de temperatura y concentración de vapor de agua a dos alturas.

Para determinar los gradientes, se utiliza un conjunto de sensores distribuidos entre los dos brazos que conforman el equipo (Fotografía 16a). Los brazos estaban separados a 1 m entre sí, encontrándose el brazo inferior ubicado a 50 cm sobre la parte aérea del cultivo. El gradiente de temperatura se evalúa con dos termopares de hilo fino tipo E (cromel-constantan, el error se estima en menos de 0,02 ^{o}C) y el gradiente de concentración de vapor de agua con un higrómetro de punto de rocío de espejo compartido por ambos brazos y alimentado alternadamente desde cada altura.

a b

Fotografía 16: a) Equipo *Bowen Ratio* (Campbell Scientific Ltd., Leicestershire, UK) y b) radiómetro.

El sistema también cuenta con los siguientes equipos:

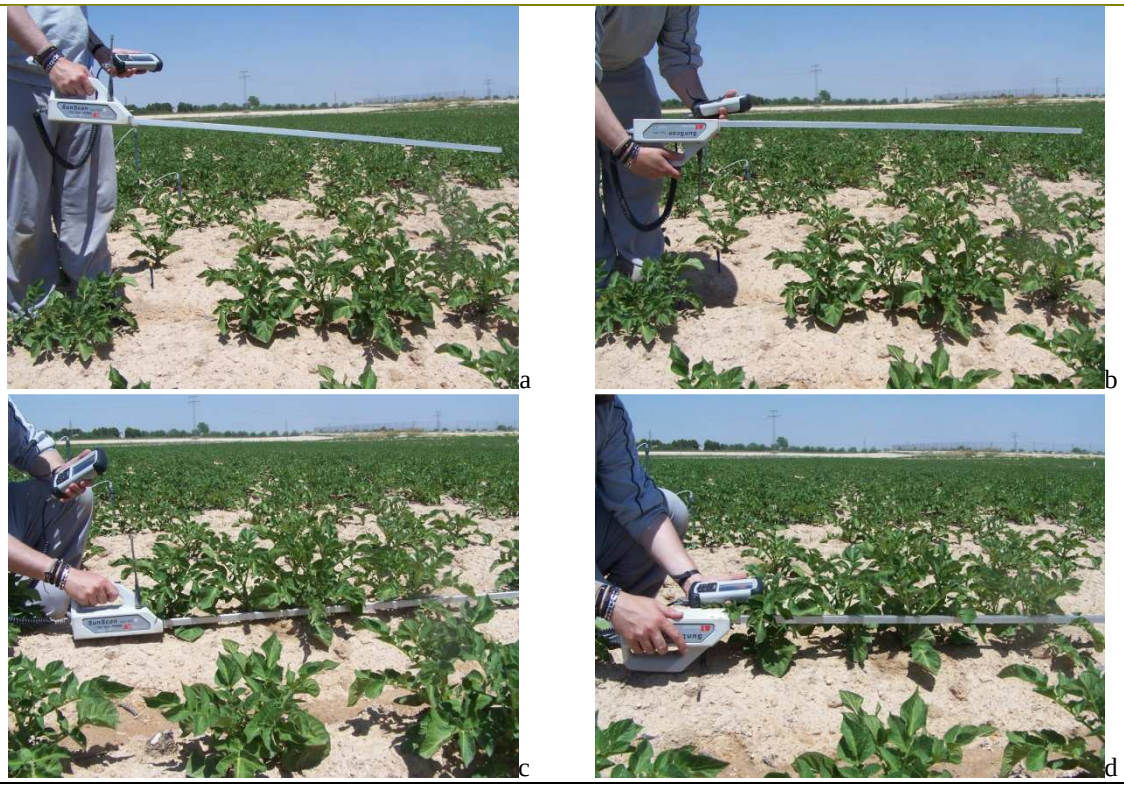
- un radiómetro neto (Fotografía 16b), registrando datos de la energía disponible (W m^{-2}). La radiación neta es el principal componente del balance de energía. Proporciona la energía necesaria para los procesos de evaporación del suelo, transpiración y la transferencia de calor entre la cobertura verde, la superficie del suelo y el aire (Bastiaanssen, 2000; Carrasco y Ortega-Farías, 2008). Se define como la suma algebraica de la radiación incidente y la que refleja la superficie terrestre. Se consideran las radiaciones de ondas cortas (0,15 a 3 μm) y largas (3 a 100 μm) (Peña *et al*., 2001).

- dos platos de flujo térmico instalados a una profundidad de 8 cm registrando los datos del flujo de calor (W m^{-2}),
- para medir la temperatura del suelo (ºC), dos conjuntos con dos termopares cada uno, instalados a 2 cm y a 6 cm de profundidad,
- un sensor de humedad volumétrica del suelo (%) tipo TDR,
- un anemómetro instalado a los 3 metros de altura (m s^{-1}) y,
- paneles solares y una batería que proporciona corriente continua.

Los datos de análisis corresponden a medias de 20 minutos registrados a esa misma frecuencia en un *datalogger*.

4.9 Balance de radiación.

Para determinar cada uno de los componentes del balance de radiación se utilizó un equipo SunScan (Delta-T Devices, Cambridge, UK), obteniendo los componentes necesarios para determinar la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR_a) e interceptada (PAR_i), tales como, radiación incidente al cultivo (PAR_{ic}), radiación reflejada por el cultivo y el suelo (PAR_{rc}), radiación que llega al suelo (PAR_s) y radiación reflejada por el suelo (PAR_{rs}) (Fotografía 17). Las mediciones fueron efectuadas en distintos momentos a lo largo del ciclo de cultivo, próximos a las fechas de muestreo de material vegetal, con un total de 6 mediciones en el año 2011 y 9 en el año 2012 (Tabla 33), muy próximo a las 12:00 hora solar y en días totalmente sin nubes. Se realizaron cinco repeticiones para cada componente en cada una de las 12 parcelas experimentales.



Fotografía 17: Orientación del sensor SunScan respecto al componente del balance de radiación medido: a) radiación incidente al cultivo (PAR_{ic}), b) radiación reflejada por el cultivo y el suelo (PAR_{rc}), c) radiación que llega al suelo (PAR_s) y d) radiación reflejada por el suelo (PAR_{rs}).

Tabla 33: Fecha y días desde la emergencia de las mediciones con el equipo SunScan.

2011		2012	
Fecha	DDE	Fecha	DDE
17 mayo	32	15 mayo	14
24 mayo	39	24 mayo	21
15 junio	61	15 junio	43
28 junio	74	28 junio	56
14 julio	90	14 julio	72
25 julio	101	25 julio	83
		06 agosto	95
		20 agosto	109
		29 agosto	118

El balance para el cálculo de la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PARa) e interceptada (PARi) se realizó con las ecuaciones 19 y 20, respectivamente.

$$PAR_a = PAR_{ic} + PAR_{rs} - PAR_s - PAR_{rc} \quad (19)$$

$$PAR_i = PAR_{ic} - PAR_s \quad (20)$$

Siendo PAR_{ic}: radiación incidente al cultivo (MJ m^{-2} d^{-1}), PAR_{rc}: radiación reflejada por el cultivo y el suelo (MJ m^{-2} d^{-1}), PAR_s: radiación que llega al suelo (MJ m^{-2} d^{-1}) y PAR_{rs}: radiación reflejada por el suelo (MJ m^{-2} d^{-1}).

Asimismo, se ha obtenido la eficiencia de absorción (ε_a) e interceptación (ε_i) (Ec. 21 y 22), para cada uno de los muestreos realizados. Además, se determinó la eficiencia de absorción diaria (ε_{ad}), mediante un ajuste polinomial entre los días desde la emergencia (DDE) y la eficiencia de absorción e interceptación (López, 2004).

$$\varepsilon_a = \frac{PARa}{PARic} \quad (21)$$

$$\varepsilon_i = \frac{PARi}{PARic} \quad (22)$$

La PAR absorbida acumulada (PAR_{ac}) durante el ciclo del cultivo se calculó con el sumatorio de los valores diarios de la radiación global (PAR_d) (medidos por un piranómetro en la estación agroclimática en la zona de estudio) multiplicada por 0,48 (factor de ajuste para considerar la fracción de PAR_d) y por la ε_{ad} (Ec. 23) (Ortíz, 2007).

$$PAR_{ac} = \sum_{i=1}^{n}(PARd\ .\ 0{,}48)\ .\ \varepsilon_{ad} \quad (23)$$

Los valores diarios de eficiencia de absorción se pueden correlacionar con el IAF de la cubierta vegetal mediante la expresión (Varlet-Grancher *et al.*, 1989) (Ec. 24).

$$\varepsilon_{ad} = \varepsilon_{amax}\left(1 - e^{-k\ .\ IAF}\right) \quad (24)$$

Donde ε_{ad}: eficiencia de absorción diaria, εa_{max}: valor máximo de la eficiencia de absorción y K: coeficiente de extinción.

De esta forma, se determinó el coeficiente de extinción (K), que representa la capacidad de una determinada área foliar en absorber fotones. El valor máximo de la eficiencia de absorción, puede ser considerado como una constante (0,95) en condiciones normales de cultivo (Gosse *et al.*, 1986).

La eficiencia en el uso de radiación (RUE) indica la cantidad de materia seca que es capaz de producir el cultivo por cada unidad de radiación absorbida y se obtuvo para los cuatro tratamientos diferenciados de riego a través de la ecuación 25.

$$\mathrm{RUE} = \frac{\mathrm{MST}}{\mathrm{PAR_{ac}}} \qquad (25)$$

Siendo MST: materia seca total (g m^{-2}), RUE: eficiencia en el uso de radiación (g MJ^{-1}) y PAR_{ac}: la PAR absorbida acumulada (MJ m^{-2}).

4.10 Análisis de crecimiento.

4.10.1 Modelización de la emergencia.

En las dos campañas de estudio, se realizó una caracterización del proceso de emergencia del cultivo, con el fin de desarrollar un modelo para su descripción. Dentro del cuarto de circunferencia donde se plantó la semilla (tubérculo madre) y alejado de las parcelas experimentales, se seleccionó una zona homogénea en cuanto a características edáficas para el ensayo de emergencia.

Así pues, y previo a la plantación, se seleccionaron un conjunto de 24 tubérculos madre que se encontraban en las mismas condiciones de desarrollo morfológico (etapa de dormición o de reposo) y se plantaron manualmente en los caballones formados por la máquina plantadora con el mismo marco de plantación del ensayo experimental (subepígrafe 4.3.2).

Posteriormente, se realizó un seguimiento del crecimiento de los tubérculos seleccionados durante la fase de emergencia (Fotografía 18), con 3 y 2 muestreos semanales en los años 2011 y 2012, respectivamente, hasta el momento en que se alcanzó el 50% de la emergencia en la zona utilizada para el ensayo experimental. Se realizaron un total de 12 muestreos en el año 2011 y 13 en el 2012.

La relación de los parámetros medidos (ambientales, edáficos y crecimiento del cultivo) se realizó siguiendo la metodología de Montoya (2012), que midió el grado de covarianza entre distintas variables relacionadas linealmente.

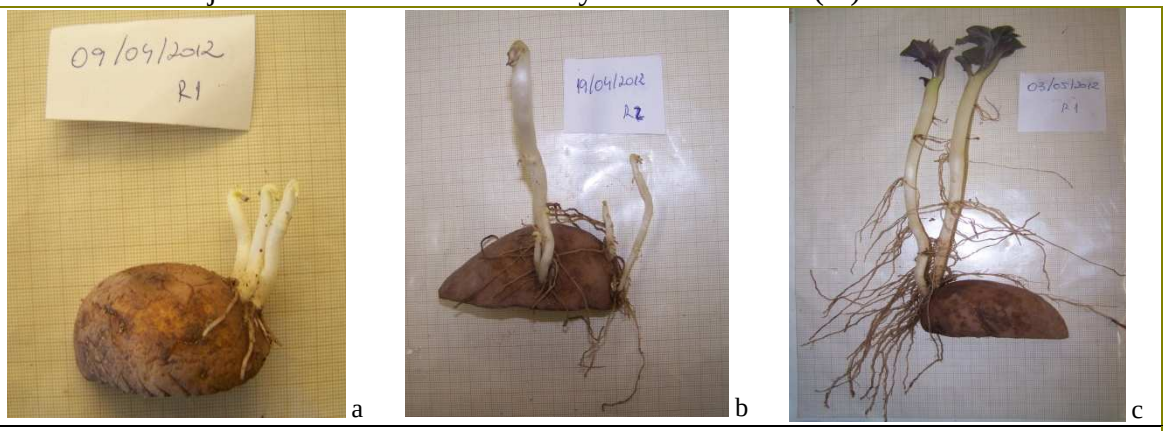
A nivel ambiental y edáfico se midieron los siguientes parámetros:

- Temperatura (máxima, mínima y media, ºC) y humedad relativa del aire (máxima, mínima y media, %). Los datos fueron proporcionados por la estación meteorológica mencionada en el subepígrafe 4.1.2.
- Temperatura del suelo (ºC) a la profundidad de plantación. Para ello, se instalaron cuatro sensores de temperatura distribuidos en diferentes caballones próximos a la zona de ensayo, conectados a un integrador AM-400 Hansen (subepígrafe 4.7). Los datos eran almacenados a cada ocho horas.
- Humedad volumétrica (%) del suelo a la profundidad de plantación. Los datos fueron obtenidos mediante gravimetría, a partir de muestras de tierra tomadas semanalmente a los 0,20 m de profundidad en la zona de seguimiento.

Los parámetros morfológicos medidos en cada uno de los muestreos realizados, formado por dos repeticiones, son los siguientes:

- Peso fresco del tubérculo madre (g)
- Peso seco del tubérculo madre (g)
- Porcentaje de Materia Seca del tubérculo madre (%)
- Número de yemas y número de brotes en desarrollo
- Longitud de brotes, tanto del apical como de los secundarios (cm)
- Longitud máxima de raíz (cm)

- Peso fresco de brotes y raíces formadas (g)
- Peso seco de brotes y raíces formadas (g)
- Porcentaje de Materia Seca de brotes y raíces formados (%)



Fotografía 18: Aspecto morfológico del tubérculo madre a los a) 23 días desde la plantación (DDP), b) 33 DDP y c) 47 DDP, en el año 2012.

Con los datos de temperatura del suelo se ha obtenido los grados días de crecimiento acumulados (GDD, ºC) siguiendo el método propuesto por McMaster y Wilhelm (1997) (subepígrafe 4.4).

Los modelos de MacKerron y Waister (1985), Griffin *et al*. (1993) y Kooman y Haverkort (1995) establecen que el tiempo térmico, a través de la temperatura del suelo, es la única variable que tiene mayor capacidad para explicar el momento de la emergencia. MacKerron y Waister (1985) asumían que el tubérculo-semilla requieren 125 ºC (con la temperatura base de 5 ºC a 10 cm de profundidad) para la germinación de yemas, y, una vez germinado, el crecimiento de los brotes se produce a una tasa de crecimiento de 1 mm por ºC, pero a la temperatura base de 2 ºC (a 10 cm de profundidad).

4.10.2 Modelización de los índices de crecimiento.

Para la modelización de los parámetros de crecimiento de la planta en los distintos tratamientos se llevaron a cabo muestreos de material vegetal a lo largo del ciclo de acuerdo con el seguimiento fenológico del cultivo, y con una periodicidad de entre 10 y 15 días. La toma de muestras comenzó cuando el cultivo estaba establecido (23/05 y 38 DDE en 2011 y 18/05 y 17 DDE en 2012) y finalizó en una fecha muy próxima a la recolección (05/08 y 112 DDE en 2011 y 30/08 y 119 DDE en 2012).

En cada muestreo se seleccionaron y extrajeron dos plantas (Fotografía 19a) situadas dentro de la zona afectada por cada tratamiento, procurando que fuera representativa del estado en que se encuentra cada parcela experimental.

También se extrajeron las plantas de muestreo en zonas diferentes en cada caso, para asegurar que las plantas fuesen representativas del cultivo y no se encontrasen condicionadas por una menor densidad poblacional u otro efecto distorsionador.

Una vez las muestras en laboratorio, se separó sus diferentes órganos determinando en cada planta el número total de tallos subterráneos, hojas, estolones y tubérculos formados a partir del tubérculo madre. De cada uno de los órganos (hojas, tallos aéreos, tallos subterráneos, estolones, raíces y tubérculos) se determinó la materia seca (MS) mediante secado en estufa a 70 ºC hasta alcanzar peso constante.

Asimismo, en cada muestreo se obtuve el área de la superficie foliar fotosintéticamente activa, empleando para ello, un medidor de área foliar (AF) modelo LI-3000 (LI-COR, Lincoln, NE, USA) (Fotografía 19b).

a

b

Fotografía 19: a) Planta de muestreo en el seguimiento de crecimiento y b) medidor de área foliar.

A partir de la información de los parámetros básicos de crecimiento indicados, se determinaron los índices de crecimiento. La metodología seguida para el análisis de crecimiento es la denominada funcional (Castrignano *et al.*, 1987). En esta metodología se describe el crecimiento del cultivo de manera continua, analizando los datos obtenidos a través de regresión no lineal para desarrollar un modelo matemático que mejor representa la evolución de los parámetros de crecimiento en el tiempo.

Para obtener la evolución de la materia seca total (MST) se utilizaron modelos de tipo sigmoideo, utilizando como variable dependiente la MST y como variable independiente la duración del periodo expresado en días desde la emergencia (DDE) del cultivo.

Entre los índices planteados destacan:

El **índice de área foliar** (IAF) es un parámetro adimensional que se define como la relación entre el AF (m^2) y la superficie donde se desarrollan el cultivo (definido a través de la densidad poblacional, en número de plantas por m^2 de superficie). Para obtener la evolución del IAF se recurrió al uso de los modelos de regresión no lineales simples más comúnmente utilizadas en la literatura (Tei *et al.*, 1996; Botella *et al.*, 1997; Rinaldi *et al.*, 2010).

Tras la elección de los modelos que mejor simulan la evolución de la MST y IAF, de acuerdo con la metodología funcional, se calculan los demás índices de crecimiento.

- La **duración del área foliar** (DAF, días) se calcula a través de la integral del modelo del IAF con relación al tiempo ($\int_{t_1}^{t_2} IAF\ dt$), expresando el área comprendida entre la curva representativa del IAF y el eje de abscisas.
- El índice **relación del área foliar** (RAF, $cm^2\ g^{-1}$) se define como la relación entre la superficie foliar y la materia seca. Se obtiene según la relación entre los modelos de IAF y MST (IAF/MST).
- La **tasa de asimilación neta** (TAN, $g\ m^{-2}$ día^{-1}) se expresa a través de la relación entre la derivada del modelo de MST y el modelo de IAF mediante la relación: $(dMST/dt)/IAF$). Representa el incremento de peso de la MST a lo largo del tiempo en función de una superficie foliar fotosintéticamente activa.
- La **velocidad de crecimiento relativo** (VCR, $g\ g^{-1}$ día^{-1}) se refiere al incremento de peso de MST de la planta en relación a su peso anterior. El índice se expresa mediante una relación entre el modelo derivado de MST y el modelo de la propia MST, de acuerdo con la siguiente expresión: $((dMST/dt)/MST)$.
- La **velocidad de crecimiento del cultivo** (VCC, $g\ m^{-2}$ día^{-1}) se calcula a través de la derivada del modelo de la MST en relación al tiempo ($dMST/dt$),

indicando la capacidad del cultivo de producir materia seca a lo largo del tiempo.

4.11 Grado de cobertura.

El cálculo del grado de cobertura (GC) se llevó a cabo a partir de interpretaciones de imágenes, tomadas a baja altura (alrededor de 40 m) sobre las parcelas experimentales, hechas por una cámara de fotos digital acoplada a un vehículo aéreo no tripulado (UAV).

El sistema está constituido por: 1) una estación de control en tierra (GCS) que recibe toda la información que es transmitida mediante telemetría desde el controlador en el vehículo (Fotografía 20b), 2) el controlador, 3) los sensores que garantizan la estabilidad del vehículo (giroscopo y acelerómetro), 4) el GPS (delimita y verifica la trayectoria del vehículo en planes de vuelo programados), 5) los servomotores que son los responsables por el movimiento mecánico del vehículo y 6) el control remoto (Fotografía 20c).

Se utilizó una cámara fotográfica digital PENTAXTM® (Golden, CO, USA) con zoom y resolución de 12 Mpx, memoria interna de 21 Mb y una tarjeta de memoria Secure Digital (SD), acoplada al quadricóptero tipo microdrone md-400 (Microdrones, Inc., Kreuztal/Germany) (Fotografía 20a).

Fotografía 20: a) UAV tipo quadricóptero, b) estación de control en tierra (GCS), c) control remoto y d) demostración de uno vuelo del UAV.

Los vuelos de seguimiento se realizaron de acuerdo con el estadio fenológico del cultivo, coincidiendo, siempre que las condiciones ambientales eran favorables (días con velocidad del viento hasta 5 m s^{-1}), con los días de los muestreos del material vegetal para el análisis del crecimiento (subepígrafe 4.10.2). En el año 2011 se realizaron ocho vuelos, cinco de ellos en la fase del desarrollo vegetativo y los otros tres a partir de la senescencia del cultivo. En el año 2012 sólo fue posible realizar cinco vuelos, debido a que en algunos días de los muestreos (también planteado para los vuelos) presentaron velocidades del viento por encima del permitido (5 m s^{-1}), tres en la fase del desarrollo vegetativo y los otros dos a partir de la senescencia (Tabla 34).

Tabla 34: Fecha y días desde la emergencia de los vuelos con el UAV

2011		2012	
Fecha	DDE	Fecha	DDE
12 mayo	27	16 junio	46
23 mayo	38	13 julio	71
02 junio	48	11 agosto	100
16 junio	62	25 agosto	114
29 junio	75	03 septiembre	123
13 julio	89		
23 julio	99		
01 agosto	113		

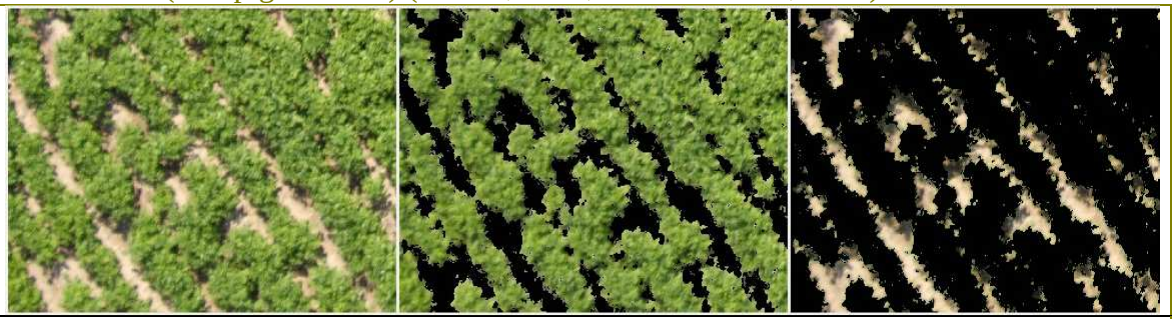
El cálculo del grado de cobertura (GC) se realizó mediante análisis de las imágenes (Fotografía 21) en el *software* LAIC desarrollado en la plataforma MATLAB, según metodología de Córcoles *et al*. (2013).

Tras cargar el programa LAIC con la fotografía, se identificó la parcela estudiada en la imagen, luego se seleccionando una parte de la fotografía para el análisis.

Según Córcoles *et al*. (2013), el análisis de la imagen entera, a nivel computacional, requiere mayor capacidad de procesamiento y, por eso, se recomienda el análisis de una pequeña parte representativa del área de estudio.

Fotografía 21: Imagen obtenida con el UAV usado para el seguimiento del cultivo y cálculo del grado de cobertura.

El *software* permite distinguir, mediante análisis *cluster*, la parte de la cubierta verde y material no vegetal (suelo, piedras, etc.), y genera tres imágenes: la primera de la parte seleccionada de la fotografía, la segunda correspondiente a la cubierta vegetal y la tercera correspondiente al resto del material no vegetal (Fotografía 22). Para esto es necesario transformar la imagen RGB (*red-green-blue*) para una imagen con espacio de color L*a*b (subepígrafe 4.12) (Robles, 2008; Córcoles *et al*., 2013).



Fotografía 22: Imágenes aéreas analizadas por el *software* LAIC. La primera en RGB e las siguientes transformadas en L*a*b.

4.12 Análisis del rendimiento y calidad de la cosecha.

La valoración del rendimiento de las parcelas experimentales de los tratamientos y sus repeticiones se realizó el 8 de agosto (120 DDE), en el 2011, y 5 de septiembre (125 DDE), en el 2012. Para la determinación del rendimiento medio comercial, de cada una de las 12 parcelas experimentales, se pesó individualmente los tubérculos de seis pequeñas franjas de 3 m^2, correspondientes a dos hileras con 2,0 m de largo

representativas de la parcela (Fotografía 23a), resultando así en 18 m^2, de los 60 m^2 que constituye cada parcela experimental.

De las seis repeticiones de cada parcela experimental también se determinaron los siguientes parámetros en campo: densidad poblacional (plantas m^{-2}), peso de la masa aérea (hojas y tallos) (Fotografía 23b), peso de la masa subterránea (tallos subterráneos, raíces y estolones) (Fotografía 23c), así como el número y peso de los tubérculos según el calibre. A partir de estas informaciones, se calculó el rendimiento del tubérculo fresco (kg ha^{-1}) y la biomasa total fresca.

Finalmente, en el laboratorio, se cuantificó la materia seca del tubérculo (MStub) y la materia seca total (MST), tras la desecación en estufa de ventilación forzada a 70 ºC hasta peso constante. Estos datos sirvieron para llegar a obtener el índice de cosecha (IC) definido conforme la ecuación 26.

$$IC = \left(\frac{MStub}{MST}\right).100 \qquad (26)$$

Siendo IC: índice de cosecha (%), MStub: materia seca del tubérculo (kg ha^{-1}) y MST: materia seca total (kg ha^{-1}).

Fotografía 23: a) Superficie correspondiente a una de las seis repeticiones de cada parcela experimental, con un área de 3 m^2, b) determinación del peso de la biomasa aérea, c) separación de la biomasa subterránea, por una parte los tallos subterráneos, raíces y estolones y por otra parte los tubérculos y d) clasificación del calibre de los tubérculos.

El análisis de calidad, de cada parcela experimental para los dos años de ensayo, se obtuvo a partir de la clasificación de los tubérculos según su calibre (Ø), agrupándose en tubérculos con Ø > 80 mm, entre 40 mm < Ø ≤ 80 mm y Ø ≤ 40 mm (Fotografía 23d). Robles (2008) clasifica los calibres comerciales aquellos que están comprendidos entre los 40 – 80 mm de diámetro ecuatorial, y los calibres no comerciales los que están por debajo y por encima de éstos.

Los parámetros de calidad estudiados fueron los siguientes:

- Dureza del tubérculo mediante penetrometría utilizando un texturómetro TA.XT Plus (Stable Micro Systems Ltd., Godalming, Londres, UK). Se siguió la metodología de Robles (2008), donde se hicieron medidas para determinar la dureza de la peridermis del tubérculo en la corona (zona que sufre más, por ser la que se va abriendo paso a través del suelo en el crecimiento) (Fotografía 24a) y en la zona ecuatorial (para averiguar la influencia de la resistencia que ofrece el suelo al ser compactado por el crecimiento del tubérculo). A continuación se realizon tres mediciones de la dureza del anillo vascular, de las que se obtuvo una media final, y una medición de la médula del tubérculo (Fotografía 24b).

El texturómetro permite obtener gráficas de todo el proceso de penetración, lo que posibilita comparaciones entre ellas y sobre todo los parámetros derivados de las curvas (Feltran *et al*., 2004; Solís-Pacheco *et al*., 2006; Mercado-Flores *et al*., 2010; Barrera *et al*., 2012).

a

b

Fotografía 24: a) Medición de la corona de la patata en el texturómetro y b) resultado de la penetración en el anillo vascular y en la medula.

Estos parámetros son: la fuerza máxima de rotura o punto de cedida (kgf) (dureza), distancia de rotura, es decir, la profundidad de penetración en el punto de rotura (mm) y la fuerza aplicada por cada mm que la punta penetra en la patata (kgf mm^{-1})

- Contenido de sólidos solubles (ºBrix) empleando un refractómetro digital (Fotografía 25a) (modelo Palette PR-100, Atago Co. Ltd., Itabashi-ku, Tokio, Japon). Para el análisis se obtuvo zumo de los tubérculos (Fotografía 25b) (Feltran *et al*., 2004; Robles, 2008). Para la preparación del zumo, se pelaron y trituraron en una licuadora seis tubérculos seleccionados (dos de cada calibre), posteriormente, tras su filtrado, se pudo utilizar el zumo en el refractómetro (Pardo *et al*., 2000).

a

b

Fotografía 25: a) Refractómetro digital y b) zumo del triturado de las patatas.

- La acidez total mediante una valoración potenciométrica con una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) 0,1 N. En un vaso, se vertió una muestra de 40 mL del zumo de patata, se introdujo un agitador y se fue dejando caer el NaOH de una bureta hasta que el pH del zumo, medido de manera continua, fuera superior a 8 (pH = 8,1) (Fotografía 26a) (Feltran *et al*., 2004). De este resultado, se obtuvieron los gramos de ácido cítrico por cada 100 mL de muestra (Ec. 27).

$$Ac = \frac{6{,}4 \cdot V_1 \cdot N_{NaOH}}{V_2} \qquad (27)$$

Siendo Ac: acidez total (g de ácido cítrico 100 mL^{-1}), V_1: volumen de NaOH utilizado en la valoración (mL), N_{NaOH}: normalidad de NaOH (= 0,1 N) y V_2: volumen del zumo de patata (= 40 mL).

- El color de la epidermis mediante un colorímetro MINOLTA® (Fotografía 26b). Se midió el color, tras el lavado del tubérculo, en la zona ecuatorial. El equipo nos ofrece los valores de *L* (luminosidad) que va de 0 (negro) a 100 (blanco) y, valores de *a* y *b* que representan variaciones entre rojizo-verdoso (60 a -60) y amarillento-azulado (60 a -60), respectivamente. La composición de los tres valores indican todos los colores y tonos que se puede medir (Pardo *et al*., 2000; Robles, 2008). Para conocer mejor el color, de cada medida se calculó el croma, que consiste en una relación de los parámetros *a* y *b* mediante la ecuación 28.

$$Croma = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (28)$$

Siendo a y b son parámetros de variaciones del color.

a

b

Fotografía 26: a) Valoración potenciométrica en un zumo de patata con una disolución de NaOH 0,1N y b) análisis del color de la epidermis del tubérculo.

4.13 Análisis estadístico.

Las técnicas estadísticas utilizadas en el análisis de los datos fueron: el análisis de la variabilidad de la muestra mediante la estadística descriptiva unidimensional y bidimensional, el análisis de varianza y el análisis de regresión lineal y no lineal. Los paquetes informáticos empleados para llevar a cabo los análisis estadísticos fueron: Microsoft Excel (Microsoft Office Professional Edition 2007, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA), SPSS (v. 13.0 para Windows, SPSS Inc., Chicago, IL, USA), Statgraphics (v. 5.1 para Windows, Statistical Graphics Corp., Herndon, VA, USA) y SigmaStat (v. 3.5 para Windows, Systat Software Inc., San Jose, California, USA).

4.13.1 Estadística descriptiva.

El primer paso en el análisis de un conjunto de datos debe ser siempre un tratamiento descriptivo sencillo de los mismos. Dicho tratamiento busca poner de manifiesto las características y regularidades existentes en los datos y sintetizarlas en un número reducido de parámetros o mediante representaciones gráficas adecuadas (Romero y Zunica, 2005).

En el trabajo se han empleado medidas descriptivas unidimensionales (diagrama de barras, parámetros de posición y dispersión de la media, tales como, recorrido, varianza, desviación típica y coeficiente de variación) y descriptivas bidimensionales (covarianza y coeficiente de correlación, recta de regresión y análisis de los residuos).

Con este primer nivel de análisis no se pretende obtener conclusiones sobre la población de la que se procede la muestra, lo que constituye el objeto de las técnicas de Inferencia Estadísticas.

Se han utilizado estas técnicas para representación de los siguientes parámetros: CU, UD, AMR, presión de trabajo, GC, PAR_a, PAR_i, ε_a, ε_i, humedad volumétrica y tensión en el suelo.

4.13.2 Inferencia estadística.

La inferencia estadística se define como el procedimiento que permite realizar afirmaciones de naturaleza probabilística respecto a una población, en base a los resultados obtenidos en una muestra seleccionada de esta población (Batanero, 2001; Días y de la Fuente, 2005; Romero y Zunica, 2005).

4.13.2.1 Análisis de varianza.

El análisis de varianza (ANOVA) constituye una de las herramientas de la inferencia estadística, y consiste en descomponer la variabilidad total observada en unos datos en una serie de términos, asociado a los efectos de cada factor estudiado y a sus posibles interacciones (Romero y Zunica, 2005).

Tras realizar un ANOVA, se obtiene la suma de los cuadrados total (suma de los cuadrados de las desviaciones de cada dato respecto a la media general del experimento), el valor estadístico F de *Snedecor* y el nivel de significación (α o p valor). Se ha tomado como niveles de significación $p \geq 0,05$ no significativo, $0,01 \leq p < 0,05$ significativo y $p < 0,01$ muy significativo. Para estimar si las diferencias entre los tratamientos son significativas o no, se emplearon los test de *Tukey* y *Duncan*.

Los parámetros sometidos al ANOVA fueron: rendimiento (kg ha^{-1}), IC (%), EUA (kg m^{-3}), RUE (g MJ^{-1}), densidad poblacional (plantas m^{-2}), valores de IAF y MST y para los parámetros de calidad (calibre comercial del tubérculo, acidez, ºBrix, dureza y color).

4.13.2.2 Análisis de regresión

El estudio del análisis de regresión trata de encontrar una función matemática que ajuste de la mejor manera posible los valores de la variable bidimensional. Los modelos de regresión (lineal o no lineal) permiten analizar la relación existente entre la pauta de variabilidad de una variable aleatoria y los valores de una o más variables, de las que la primera puede depender (Guerra *et al*., 2003).

Las fases que deben seguirse en un estudio mediante modelos de regresión son: 1) definir el problema a resolver por el modelo y los objetivos, 2) seleccionar las variables, es decir, los componentes del sistema y las relaciones entre los mismos; 3) recogida de datos mediante muestreos en el diseño experimental, 4) formulación del modelo mediante paquetes estadísticos computacionales, 5) verificación de la funcionalidad del modelo, es decir, verificar si el modelo reproduce la realidad con suficiente precisión y 6) explotación del modelo.

Los modelos de regresión se basan en el principio de minimizar los cuadrados de los residuos, es decir, la diferencia entre el valor simulado por el modelo y el valor real observado. Frente al problema abordado, es imprescindible que el modelo pueda representar la interacción del sistema de forma satisfactoria para garantizar la funcionalidad del modelo, sobretodo, en aplicaciones futuras.

En la Tesis Doctoral, se aplicó el análisis de regresión no lineal para ajustar los datos de evolución de MST e IAF. Tras la estimación y validación, se seleccionaron los modelos que posteriormente se utilizan para describir los parámetros de crecimiento del cultivo (DAF, RAF, TAN, VCR y VCC). Además, se utilizó el análisis de regresión

múltiple en el desarrollo de modelos que describen el momento de la emergencia y la AMR en las parcelas experimentales.

4.13.2.2.1 Criterios de selección del modelo.

La metodología estadística que se utiliza para elegir un modelo, exige comprobar la capacidad de predicción del modelo a través de algunos parámetros (Guerra *et al*., 2003; Romero y Zunica, 2005; Novales, 2008):

- **Bondad del modelo ajustado**: Se utiliza el coeficiente de determinación (R^2) como medida de la bondad del modelo, siendo necesario haber realizado los cálculos previos de ajustes, y así, informar cual de los modelos estudiados ajusta mejor a los datos experimentales. El coeficiente de determinación indica la variabilidad de la variable dependiente que es explicada por el modelo y toma valores comprendidos entre 0 y 1, de manera que cuanto más se aproxima a la unidad mejor ajuste presenta. En este caso, para cada valor de la variable independiente (x), se dispone de varios valores repetidos de la variable dependiente (y), lo que permite estudiar la falta de ajuste de los datos al modelo (Novales, 2008). Este R^2 indica el cuadrado del coeficiente de correlación calculado entre las parejas de valores observados y predichos por el modelo.
- **Error estándar de la estimación**: El error estándar (SE) trata de resumir la disparidad entre los datos, es decir, trata de medir la diferencia promediada entre los valores observados y los valores estimados de acuerdo al modelo (Guerra *et al*., 2003). Puede considerarse como un indicador del grado de precisión con que la ecuación de regresión describe la relación entre las dos variables.
- **Significación de los parámetros de ajuste**: El estadístico *p* informa la significación estadística de cada parámetro a partir de la relación entre el valor estimado por el modelo y su error típico (Novales, 2008).
- **Análisis de los residuos**: A cada observación experimental, se le asocia un residuo que, en valor absoluto, mide la mayor o menor adecuación del valor estimado por el modelo a los observados en los ensayos realizados (Novales, 2008). Los residuos son variables aleatorias que se consideran distribuidos normalmente y que, en función de la homogeneidad, puede poner en duda la bondad de ajuste del modelo. La forma más adecuada para detectar las distribuciones raras de los residuos, es mediante la representación gráfica sobre ejes cartesianos, estando el valor de estos en el eje de ordenadas, y en abscisas, el valor de la variable independiente (Romero y Zunica, 2005).

4.13.2.2.2 Verificación del modelo.

Con el análisis de los residuos se pueden validar los modelos estimados, comprobando que se cumplen las hipótesis de normalidad, homocedasticidad e independencia sobre las que se apoyan (Costa, 2003; Guerra *et al*., 2003; Torman *et al*., 2012).

- **Normalidad**: Hay distintos procedimientos estadísticos para verificar la normalidad de los residuos, entre ellos el contraste de la χ^2 (Chi cuadrado), *Shapiro-Wilks* (W), *Shapiro-Francia* (F), *Kolmogorov-Smirnov* (KS), *Cramer-von Mises* (CM), *Anderson-Darling* (AD), *Jarque-Bera* (JB) (Torman *et al*., 2012). Otra alternativa de comprobar la normalidad es mediante el gráfico de probabilidad normal, que permite comparar gráficamente la función de distribución observada en la muestra con la función de distribución normal (0,1), de esta forma, si dichos valores fuesen aproximadamente iguales, se entiende que la distribución de los residuos es normal (Costa, 2003). En la presente Tesis

Doctoral se utiliza el método de *Kolmogorov-Smirnov*. Torman *et al.* (2012) recomiendan este test por presentar el mayor porcentual de aciertos, frente a los demás métodos, principalmente cuando se aplica a ensayos con pequeño tamaño de muestra (hasta 100). En este test, cuando el p-valor asociado al estadístico de contraste es menor que 0,05, se rechazará la hipótesis nula al nivel de significación, siendo dicha hipótesis que la muestra procede de una población en la que su distribución es normal.

- **Homocedasticidad**: La hipótesis de homocedasticidad implica que para cada valor de la variable independiente, la varianza de los valores de las subpoblaciones sea constante (Guerra *et al*., 2003). El programa estadístico utilizado proporciona los valores calculando la correlación de *Spearman*, facilitando su interpretación al incluir el nivel de significación (p-valor). Un nivel de significación p<0,05 indicará un rechazo de la hipótesis de igualdad de varianzas; por el contrario, para p>0,05 se acepta la hipótesis de igualdad de varianzas siendo por tanto el modelo homocedástico. La comprobación de la adecuación del modelo también puede hacerse de manera global, observando si la nube de puntos de la gráfica de residuos está distribuida de manera uniforme, en caso contrario, permite suponer un modelo no adecuado (Romero y Zunica, 2005).
- **Independencia**: La independencia de los residuos (o autocorrelación) indica que los mismos constituyen una variable aleatoria (Costa, 2003). Si no existe independencia entre los residuos es porque hay datos que no han sido utilizados por el modelo (Romero y Zunica, 2005). La existencia o no de autocorrelación en los residuos se ha probado mediante el estadístico de *Durbin-Watson* (D), el cual es un test para averiguar la correlación serial entre los términos de errores adyacentes, oscilando su valor entre 0 y 4. Si su valor es próximo a 2 no hay correlación, si se aproxima a 4 están negativamente autocorrelados, y si se aproxima a 0 están positivamente autocorrelados. Sin embargo, puede asumirse que los residuos son independientes cuando el estadístico D toma valores entre 1,5 y 2,5(Guerra *et al*., 2003).

4.13.3 Modelos ajustados.

Para describir la evolución de los parámetros de crecimiento y desarrollo del cultivo, se utilizaron los modelos de regresión no lineales, tipo polinomiales y expopolinomiales (Tei *et al*., 1996; Botella *et al*., 1997; Rinaldi *et al*., 2010) y tipo sigmoidal (Ratkowski, 1983; López, *et al*., 2000; Borges, 2008; Aguilar, 2010; Barker *et al*., 2010; Ruiz *et al*., 2012). Entre los modelos tipo sigmoides se emplearon los modelos Gompertz y Logístico (Tablas 35 y 36) (Winsor, 1932).

Tabla 35: Propiedades matemáticas del modelo Gompertz.

Propiedades	Expresión
Ecuación	$MST = a.e^{-e^{(b-c.DDE)}}$
Numero de constantes	3
Asíntota	MST = a (peso asintótico)
Inflexión	$DDE = b/e \;\; y \;\; MST = a/e$
Simetría	Asimétrico
Tasa de crecimiento	$dMST/dDDE = c.MST.e^{b-c.DDE} = c.MST.log(a/MST)$
Tasa máxima de crecimiento	$(c.a)/e$
Tasa relativa de crecimiento en función de DDE	$(1/MST)(dMST/dDDE) = c.e^{b-c.DDE}$
Tasa relativa de crecimiento en función de MST	$(1/MST)(dMST/dDDE) = c(\log a - \log MST)$

Fuente: Winsor, 1932.

Tabla 36: Propiedades matemáticas del modelo Logístico.

Propiedades	Expresión
Ecuación	$MST = a/\left(1 + e^{(b-c.DDE)}\right)$
Numero de constantes	3
Asíntota	MST = a (peso asintótico)
Inflexión	$DDE = b/e \;\; y \;\; MST = a/2$
Simetría	Simétrico alrededor de la inflexión
Tasa de crecimiento	$dMST/dDDE = (c/a).MST.(a - MST)$
Tasa máxima de crecimiento	$(c.a)/4$
Tasa relativa de crecimiento en función de DDE	$(1/MST)(dMST/dDDE) = c/(1 + e^{-b+c.DDE})$
Tasa relativa de crecimiento en función de MST	$(1/MST)(dMST/dDDE) = (c/a)(a - MST)$

Fuente: Winsor, 1932.

Los modelos Gompertz y Logístico poseen propiedades similares que los hacen útiles para la representación empírica de los fenómenos de crecimiento, no presentando cualquiera de los modelos ventajas substanciales sobre el otro en el intervalo de datos que se ajusten. Según Winsor (1932), el modelo logístico ofrece mejores resultados sobre la simulación de crecimiento que presenta una inflexión entre las asíntotas, mientras que el modelo Gompertz da buenos ajustes en simulaciones que muestran una inflexión alrededor del 37 % a lo que se refiere al peso respecto al final, al tiempo del crecimiento. Conclusiones similares fueron encontrados por Borges (2008), Barker *et al*. (2010), Silveira (2010) y Aguilar (2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Evaluaciones de riego.

Para el cálculo del coeficiente de uniformidad (CU) y de la distribución del agua aplicada (UD), se contabilizaron en los riegos los cuales el programa ejecutado permitía que el equipo pivote, en el momento del paso sobre la línea de pluviómetros, estuviera con todos los tramos de emisores abiertos, totalizando siete riegos en el primero año y trece en el segundo.

La figura 16 representa los valores de CU y UD en cada uno de los años de estudio. El CU, en el año 2011, se encontró dentro del intervalo de 88 – 92 % y, en el 2012, dentro de 88 – 96 %. Por su parte, la UD osciló entre 82 – 86 % (2011) y 81 – 93 % (2012).

Cabe destacar que los valores menores de CU (88 %) y UD (81 %), en el año 2012, corresponden a una evaluación de un riego diurno, el 30 de junio. En esta fecha, la velocidad media diurna del viento correspondía a 4,6 m s^{-1} con máxima de 6,9 m s^{-1}. Dechmi *et al.* (2003b) afirman que a partir de un valor de umbral de 2,1 m s^{-1} se produce un descenso del CU.

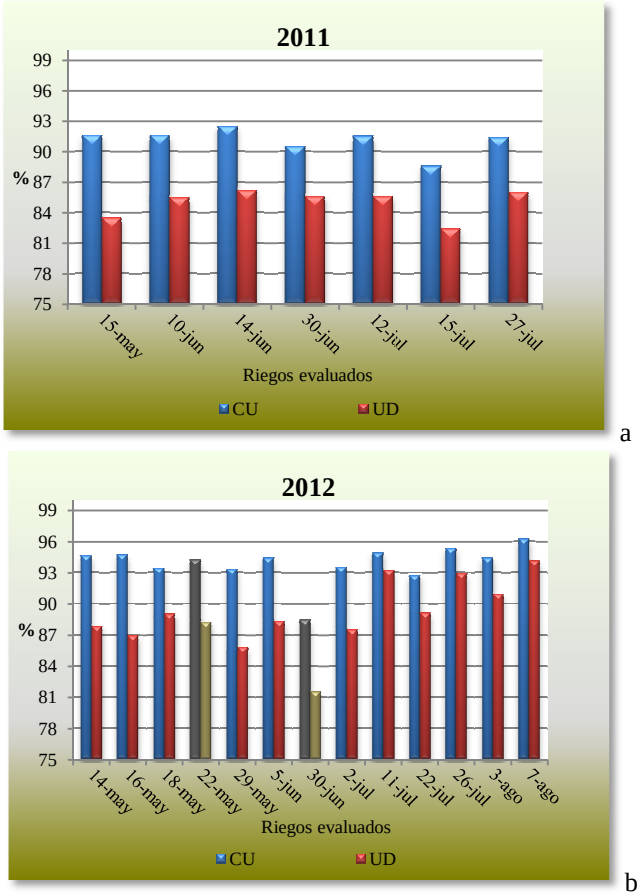


Figura 16: Coeficiente de uniformidad (CU), uniformidad de distribución del agua aplicada (UD) y coeficiente de variación del agua media recogida (CV_{AMR}) en el año a) 2011 y b) 2012*.
*los coeficientes calculados en las evaluaciones del 22/05 y 30/06, en el año 2012, se refieren a riegos diurnos.

Las figuras 17 y 18 representan el acumulado de las AMR en las fechas en que se regaba con todo los tramos abiertos (subepígrafe 4.5.1), por cada torre del pivote, así como la carta de emisores utilizada en los dos años de ensayo (representada por los diámetros de las boquillas de los emisores, entre 2,78 y 6,55 mm). La media de AMR acumulada en los tramos en que se ubicaba las parcelas experimentales fueron los siguientes:

- En 2011: 113,7 mm (CV de 6,5 %) en la torre 3 y 113,0 mm (CV de 6,7 %) en la torre 4.
- En 2012: 71,1 mm (CV de 4,4 %) en la torre 3 y 71,6 mm (CV de 3,6 %) en la torre 4.

El resultado de los bajos valores de coeficientes de variación de las láminas medias recogidas, la diferencia mínima entre las AMR entre los años experimentales y los altos índices de uniformidad, confirman la alta eficiencia del sistema pivote, así como la elección de la carta de emisores, en la aplicación del agua.

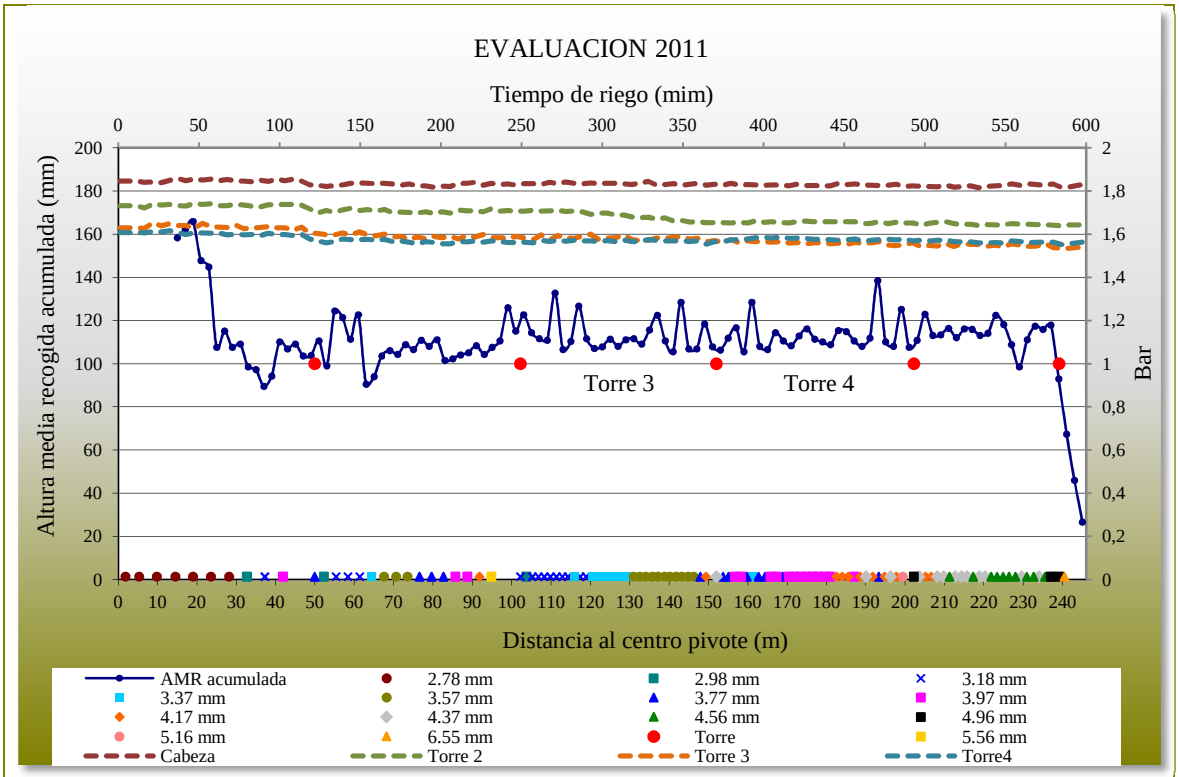


Figura 17: Altura media recogida acumulada en los riegos evaluados con todos los tramos abiertos y las presiones en que se trabajaba el sistema pivote en cabeza y en las torres 2, 3 y 4 del equipo, en el año 2011.

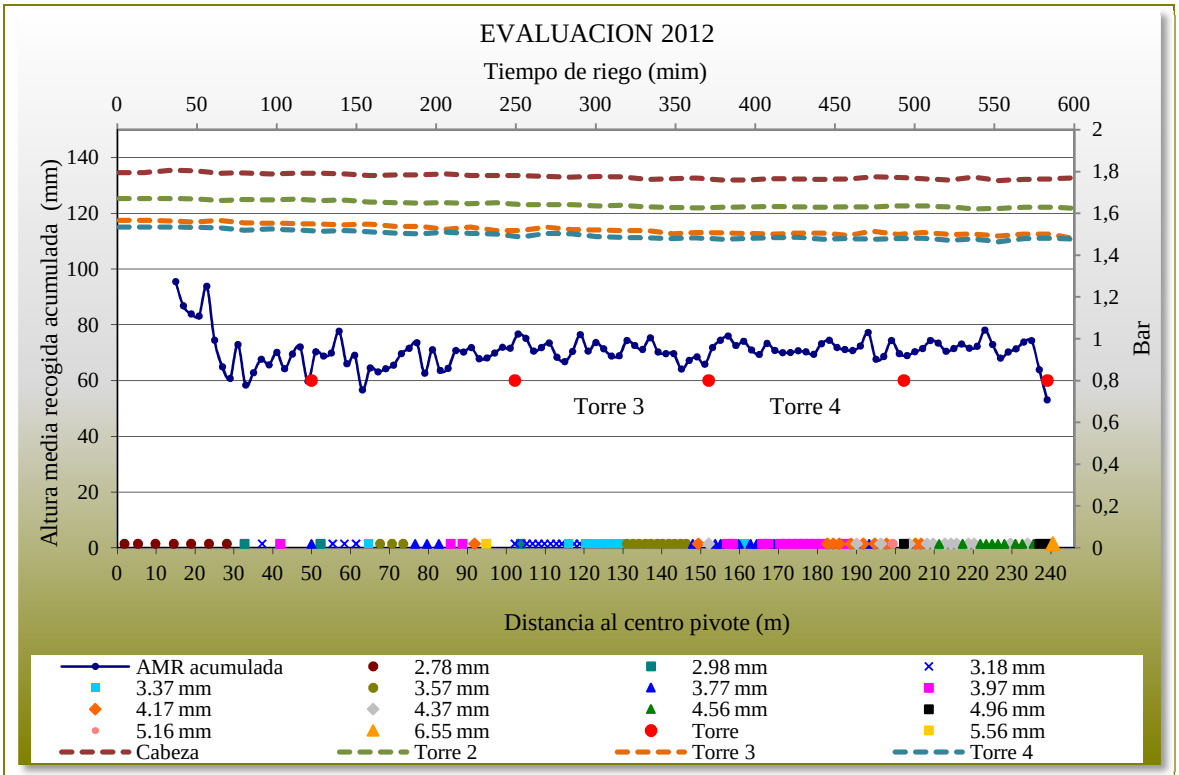


Figura 18: Altura media recogida acumulada en los riegos evaluados con todos los tramos abiertos y las presiones en que se trabajaba el sistema pivote en cabeza y en las torres 2, 3 y 4 del equipo, en el año 2012.

Para el seguimiento del funcionamiento del sistema pivote, se instalaron transductores de presión en la cabeza del equipo y en las torres 2, 3 y 4. En las figuras 17 y 18, también están representadas las evoluciones de las presiones en las que funcionaba el pivote durante un riego de diez horas. La presión de trabajo registrada en cabeza fue de 1,8 bar, siendo el CV de la misma inferior a 1 % en los dos años. La ausencia de variación de las presiones también se registra en las torres 2 (1,6 bar), 3 y 4 (1,5 bar).

Como comentario final de las uniformidades, analizando las gráficas (Fig. 16), se observa que, en los sucesivos riegos, el CU tiende a ser constante a lo largo del ciclo del cultivo, así como las presiones en que se trabaja el equipo (Fig. 17 y 18), y por ello, se mantiene una alta uniformidad independiente del tratamiento hídrico aplicado.

Es importante destacar que, si el CU calculado es alto (> 90 %), la uniformidad del agua en el suelo es habitualmente superior (Jiménez *et al*., 2010). Ortíz *et al*. (2010) comparando la uniformidad de la humedad en el suelo con el CU de un sistema pivote, encontraron una uniformidad en el suelo, a 30 cm de profundidad en suelo franco-arcillo-arenosos, 12 % superior al de aplicación de la máquina.

5.1.1 Altura media recogida en parcelas.

En el año 2011, el inicio de los riegos tuvo lugar el 07 de abril, 29 días después de la plantación (DDP), sin embargo, el comienzo de los tratamientos de riego diferenciados fue 75 DDP (23 de mayo) (Tabla 30). De cara al segundo año de estudio, se iniciaron los riegos en 03 de abril (21 DDP) y el comienzo de los tratamientos diferenciados en 22 de mayo (70 DDP), una vez establecido el cultivo (Tabla 31).

La altura media recogida en cada parcela experimental (AMRp) se estimó mediante la aplicación del modelo de regresión múltiple desarrollado en base a la AMR en la línea de pluviómetros (subepígrafe 4.5.1, Tabla 29).

El resultado promedio del agua recibida en cada tratamiento se presenta en las tablas 30 y 31. Las dosis de riego recibidas por el cultivo oscilaron entre 4,9 y 18,6 mm, en el año 2011, y 4,7 y 17,7 mm en el 2012, según las velocidades de avance de la máquina. El número total de riegos que se practicaron a los distintos tratamientos y el total del agua recibida se muestra en la tabla 37, para cada tratamiento.

El análisis estadístico del agua recibida, tanto desde el inicio de los tratamientos como durante todo el ciclo, muestra que existen diferencias con alto nivel de significación ($p<0,001$), cumpliendo el objetivo del estudio de tener tratamientos diferenciados en cuanto al requerimiento hídrico del cultivo (RHC). En cuanto a la relación del agua que han recibido los distintos tratamientos, con respecto al 100 % (referencia), confirma que han alcanzado el objetivo marcado en el diseño experimental, manteniéndose las diferencias a lo largo de todo el ciclo de cultivo.

Según el plan de explotación de la Junta Central de Regantes Mancha Oriental, en base a los consumos medios en la zona durante una serie climática amplia, el consumo medio de agua de riego para la patata es de 5800 m^3 ha^{-1}. El tratamiento de 100 % (RHC), en el primer año, aunque algo superior a lo establecido por el plan de explotación (5982 m^3 ha^{-1}), es considerado conforme a estos datos medios. Sin embargo, en el segundo año, el consumo del agua de riego del tratamiento de referencia se aleja del promedio (7911 m^3 ha^{-1}), justificándose en base a la características climáticas de este año, seco y muy caluroso, resultando en una ET_0 superior al año anterior (ET_{0_2012} 30 % superior a la ET_{0_2011}).

Tabla 37: Agua recibida en los diferentes tratamientos hídricos.

	2011				2012			
	120 %	100 %	80 %	60 %	120 %	100 %	80 %	60 %
Numero de riego	46	40	34	29	61	55	48	40
Agua de riego recibida durante el ciclo (mm)	700,3a	598,2b	483,0c	396,0d	892,3a	791,1b	679,3c	550,7d
Agua de riego recibida desde el inicio de los tratamientos	604,8a	502,6b	387,2c	300,2d	803,2a	702,2b	590,6c	462,0d
Ratio entre tratamientos desde el inicio del ciclo (respecto al 100 %)	1,17	1,00	0,81	0,66	1,13	1,00	0,86	0,70
Ratio entre tratamientos desde el inicio de riegos diferenciados (respecto al 100 %)	1,20	1,00	0,77	0,60	1,14	1,00	0,84	0,66
Lluvia efectiva durante el ciclo (mm)	127,8				104,3			
ET_0 del ciclo (mm)	721,2				937,8			
Agua total recibida (ciclo + precipitación efectiva)	828,1	726,0	610,8	523,8	996,6	895,4	783,6	655,0

5.2 Determinación de la humedad volumétrica en el suelo.

5.2.1 Calibración de los sensores FDR en laboratorio.

Durante la calibración de los sensores FDR EnviroScan®, se fijaron los valores de fa (Frecuencia del sensor en el aire seco) y fw (Frecuencia del sensor sumergido en agua) al aparato y se mantuvieron para las lecturas de las medidas en todo el ciclo de cultivo.

Con el análisis de los datos de SF (Frecuencia normalizada) de cada tubo de calibración, calculado a través de la ecuación 10, se observaron bajos valores del coeficiente de variación (% CV) para cada humedad testada, mostrando que, los datos de partida, utilizados en el desarrollo de la ecuación de calibración, son fiables.

Como ejemplo, la figura 19 muestra los valores de SF, así como su CV (%), a la profundidad de 20 cm para cada uno de los tubos de estudio, en suelo seco y en la máxima humedad testada.

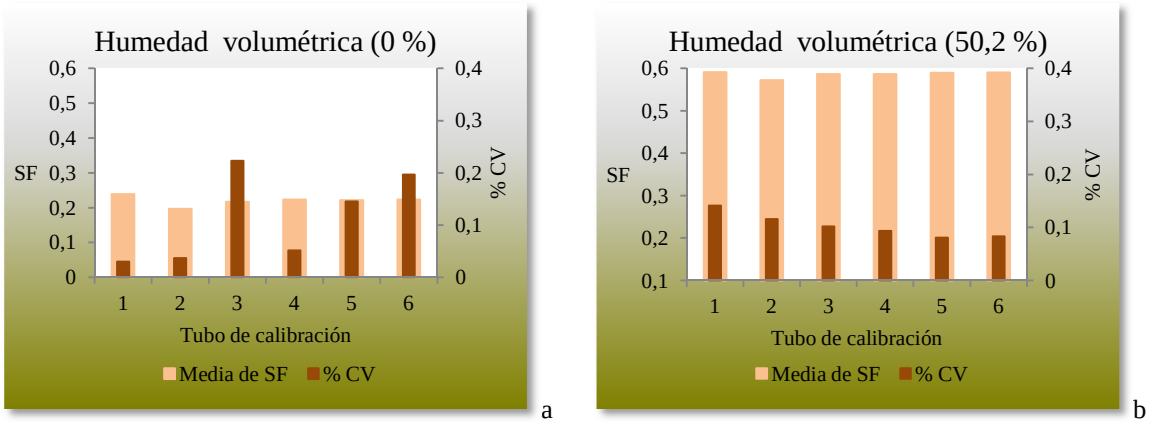


Figura 19: Promedio de los valores de SF y el coeficiente de variación de los seis tubos de calibración, a) en el suelo seco y b) con la máxima humedad testada.

A partir de las lecturas realizadas para cada humedad fue posible sacar una ecuación de calibración para cada profundidad estudiada, utilizando el promedio de la lectura de capacitancia de los seis tubos de ensayo (Tabla 38). El análisis de los residuos

comprobó que los modelos cumplieron las hipótesis de normalidad, homocedasticidad e independencia.

Tabla 38: Parámetros a, b y c de la ecuación calibrada para cada una de las profundidades.

Ecuación	Profundidad (cm)	a	b	c	R^2
$SF = a\theta^b + c$	10	0,1047	0,3540	0,1710	0,981
	20	0,1700	0,2663	0,0955	0,985
	30	0,3720	0,1395	0,0969	0,947
	40	0,4372	0,1133	0,1359	0,948

Debido la similitud de las curvas los valores de SF frente a las humedades testadas, se optó por obtener una ecuación general calibrada para todo el perfil estudiado (Tabla 39).

Tabla 39: Parámetros a, b y c de la ecuación general calibrada.

Ecuación	a	b	c	R^2
$SF = a\theta^b + c$	0,1090	0,3376	0,1631	0,925

5.2.2 Evolución de la humedad volumétrica.

Una vez obtenida la función de calibración y, tras la instalación de los sensores en las parcelas experimentales fue posible comprobar la evolución de la humedad en el suelo durante las campañas.

En las figuras 20 y 21 se presentan las gráficas de la evolución de la humedad volumétrica del suelo, a partir de los datos obtenidos con las sondas EnviroScan® para todos los tratamientos en cada uno de los años estudiados, además de los riegos aplicados en cada tratamiento y la precipitación efectiva de cada campaña.

Como mencionado anteriormente, los sensores registran datos horarios de la humedad, sin embargo, las gráficas representan los registros de una hora en concreto (alrededor de las 8:00 am). Se ha seleccionado esta hora por tener un momento de bajo movimiento del agua en el suelo, ya que la planta aún no se encuentra en alta actividad debido al incremento de la transpiración.

Hay que destacar que, debido a la necesidad de agregar una pasta hecha con agua y el mismo suelo extraído del agujero en el que se instalaron los sensores (subepígrafe 4.6.2), las lecturas de la humedad volumétrica iniciales de las sondas son demasiado altas. Dicho efecto se nota en ambas campañas, hasta que el suelo no alterado se encuentre en equilibrio con el suelo en el entorno del tubo de acceso.

Aunque estos datos no aportan una información relevante, se optó por representarlos con el objetivo de mostrar el funcionamiento de los sensores durante una campaña completa en estas condiciones de instalación. Por ello, las lecturas validas empiezan a producir a los 15 días desde la instalación.

En ambas campañas, aunque se midió las humedades volumétricas a 10 cm de profundidad, se ha optado por no representar su evolución, porque presenta mucha oscilación y sus resultados no aportan información relevante al objetivo del experimento.

En la campaña de 2011, en el tratamiento que recibió la menor lámina de riego (60 %), el contenido de humedad volumétrica siempre alcanzó valores por encima del 20 %, a la profundidad de 20 cm. Se observa también que, por un lado en esta profundidad más superficial, donde está concentrado el mayor volumen de raíces, existe un cambio más brusco de la humedad. Por otra parte, en las profundidades de 30 y 40 cm, la humedad se mantiene constante o con incrementos muy poco importantes, lo que indica que el aporte del agua a las mismas era bastante bajo.

También puede observarse, en la figura 20, que en los tratamientos de 60 y 80 %, la humedad decreció a partir de la segunda quincena de mayo, en las profundidades de 30 y 40 cm, coincidiendo con la fecha en que se inició los tratamientos con riego diferenciado (23 de mayo).

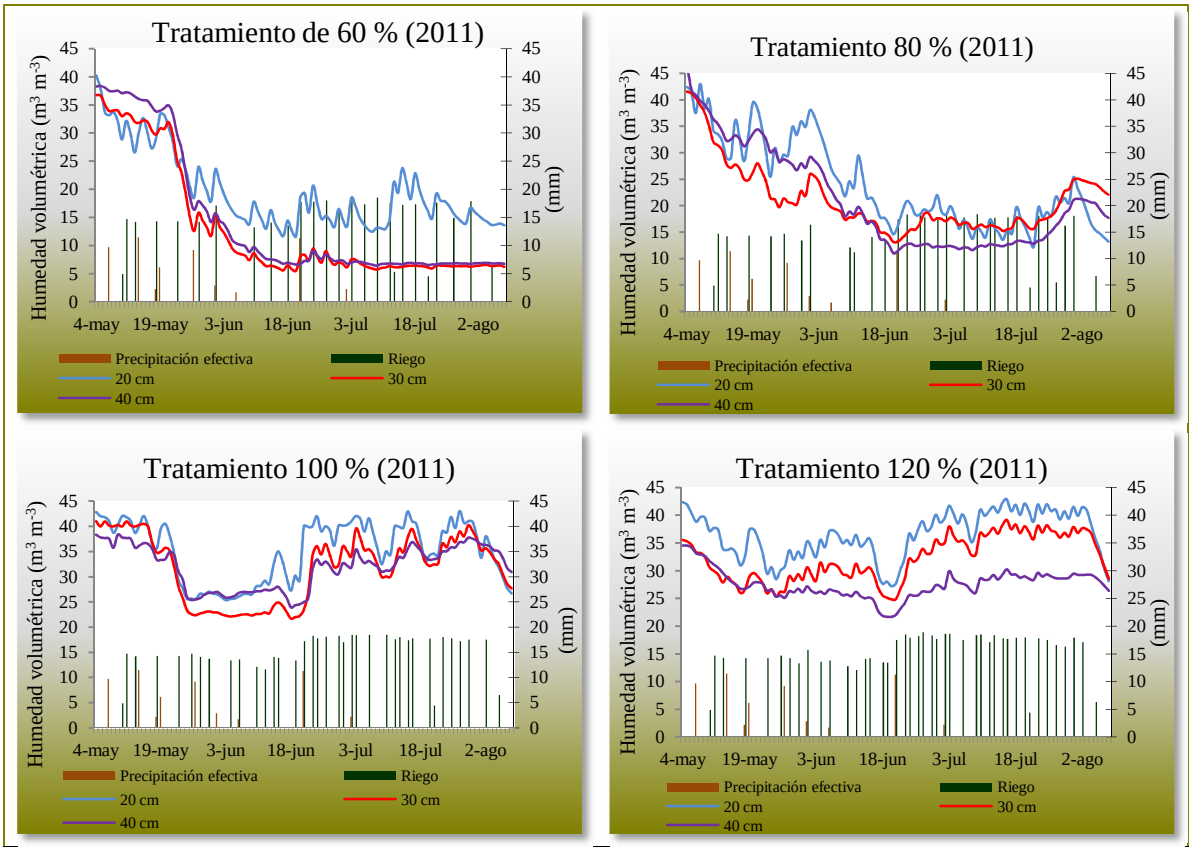


Figura 20: Evolución de la humedad volumétrica a diferentes profundidades del perfil del suelo con las sondas EnviroScan®, riego aplicado (mm) y precipitación efectiva (mm). Año 2011.

Por el contrario, en los tratamientos que recibían mayor lámina del agua (100 y 120 %), se aprecia un incremento de la humedad a partir de mediados de junio (meses más cálidos con altos valores de la ET_o) (Fig. 20), por lo cual se intensifica la frecuencia y lámina de riego de cara a suplir las necesidades hídricas del cultivo.

El descenso de la humedad a finales de julio se registra en todos los tratamientos. Tal hecho, se debe a la progresiva disminución del riego de acuerdo a la evolución del cultivo, encontrándose a finales de julio en un estadio avanzado de la senescencia.

La campaña de 2012 presentó resultados similares en las variaciones del contenido de humedad (Fig. 21). Sin embargo, en este año se optó por complementar el seguimiento de la humedad en el suelo mediante gravimetría, en las profundidades de 10 y 20 cm, de cara a la contrastación con los resultados obtenidos por los sensores FDR.

En la figura 21, se observa la evolución de la humedad de los sensores EnviroScan® contrastado con los valores de humedad obtenidos por gravimetría en todos los tratamientos hídricos. En general, los valores de humedad, en ambos métodos, se mantienen en un mismo rango de lecturas, principalmente en los tratamientos más deficitarios (60 y 80 %).

Destacar que el tratamiento de 80 % registró valores más altos de humedad a las profundidades de 30 y 40 cm a principios de la campaña, superiores a los registrados a 20 cm. Sin embargo, a partir de la diferenciación de los tratamientos hídricos (22/05/12),

ocurre un descenso continuo de la humedad en estas profundidades hasta el final de la campaña (Fig. 21), resultado de un agotamiento del agua a mayores profundidades.

Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por Arauzo *et al*. (2003), donde concluyen que las sondas EnviroScan® ofrecen medidas muy precisas del contenido de agua en el suelo, en tiempo real.

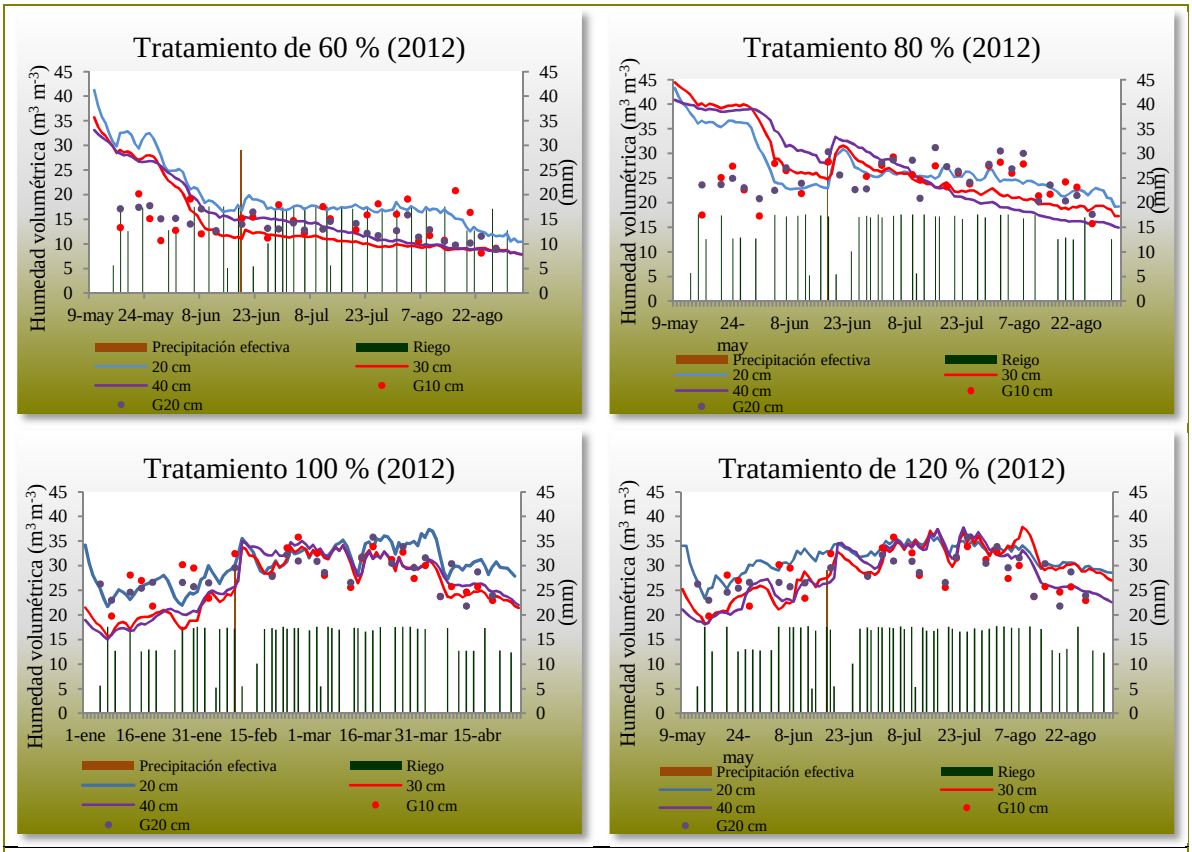


Figura 21: Evolución de la humedad volumétrica a diferentes profundidades del perfil del suelo con las sondas EnviroScan® y gravimetría a los 10 y 20 cm de profundidad, riego aplicado (mm) y precipitación efectiva (mm). Año 2012.

5.3 Evolución del potencial mátrico del suelo.

En las figuras 22 y 23 se exponen las gráficas de la evolución del potencial mátrico del suelo (ψ_m), medidos con los sensores Watermark®. En el año 2011, se instalaron los sensores en los tratamientos de 80, 100 y 120 %, mientras que en el segundo año experimental también se instaló en el tratamiento más deficitario (60 %).

De acuerdo con McCann *et al*. (1992), la respuesta del sensor Watermar® en suelos más secos no es tan clara, debido a la baja conductividad hidráulica no saturada en la matriz de los sensores. Por lo tanto, en la campaña de 2011 se optó por no instalar los sensores en las parcelas que recibirían menores cantidades del agua (tratamiento de 60 %).

En general, en suelos no saturados, el ψ_m se expresa en valores negativos, pues indica la energía con la que el agua es retenida en la matriz del suelo, donde el suelo más seco presenta valores más negativos. Sin embargo, los datos descargados de estos sensores se expresan en valores positivos, de modo que, en la Tesis Doctoral, se optó por representar los valores absolutos de ψ_m.

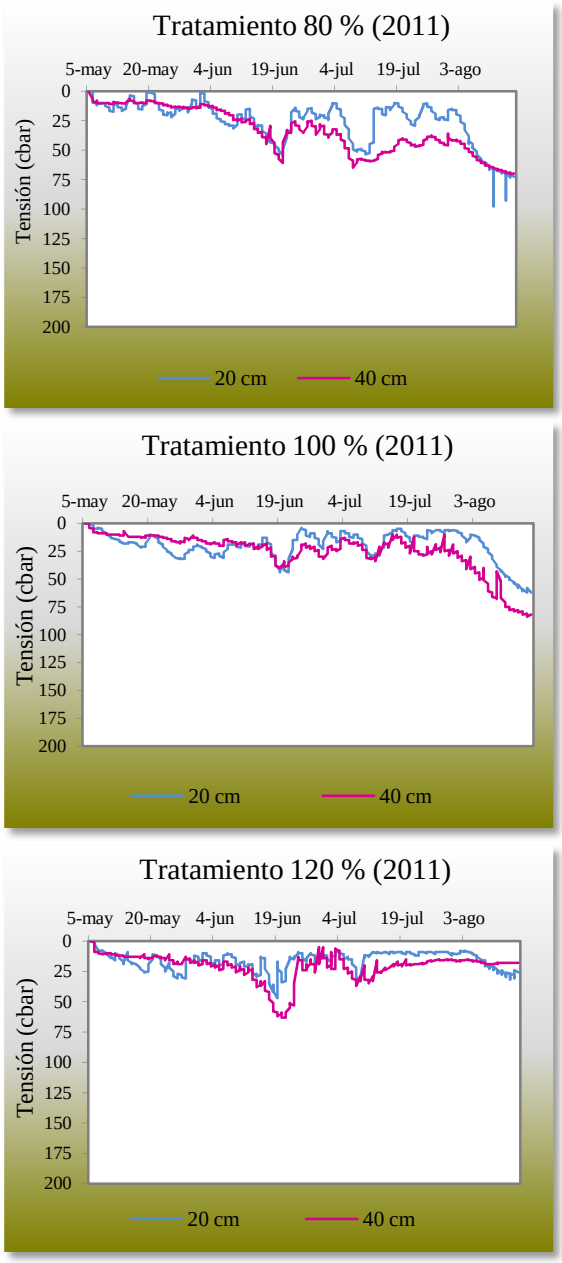


Figura 22: Evolución de los valores absolutos del potencial mátrico (cbar) a las profundidades de 20 y 40 cm. Año 2011.

En la figura 22, referente al primero año de estudio, puede observarse que la tensión del contenido de humedad en el suelo a los 20 cm de profundidad, en los tres tratamientos presentados, fue descendente hasta mediados de junio y luego ascendió, coincidiendo con la fecha en que se cambia la estrategia de riego (mayor frecuencia de los riegos debido a una mayor demanda hídrica del cultivo). El ascenso más acentuado se observa en el tratamiento de 80%, donde anteriormente, marcaba cifras superiores a 50 cbar.

Es importante destacar que el descenso observado en todos los tratamientos entre los días 15 y 19 de junio y 6 y 9 de julio, se debe a la instalación del equipo Bowen Ratio, debido a que en este periodo no era posible realizar los riegos aumentándose al máximo incremento. Dicho descenso, también fue mayor en el tratamiento de 80 %.

Para la profundidad de 40 cm, en el tratamiento de 80 %, la tensión fue, en general, descendente. A partir del 6 de julio se mantuvo entre 40 y 70 cbar, lo que indica un progresivo secado del suelo a esa profundidad. Tras el último riego (5/08) la tensión decrece de manera muy importante en los tratamientos de 80 y 100 %, llegando a alcanzar cifras que superan los 75 cbar, y de manera más moderada en el tratamiento de 120 %.

En el tratamiento de 120 %, la tensión en las dos profundidades, se mantiene en cifras superiores a 25 cbar durante todo el ciclo del cultivo, salvo en las fechas en que se instaló el equipo Bowen Ratio.

En el segundo año experimental, visto el buen funcionamiento de los sensores en el año anterior, se decidió instalarlos también en el tratamiento más deficitario. Además, el objetivo de tratar de conocer la profundidad máxima a considerar a partir de la cual se puede estimar la ET real, mostró la necesidad de instalar los sensores a los 30 cm para ubicar el plano de flujo cero (subepígrafe 4.8.1.1.1).

En la figura 23 se presenta la evolución de las tensiones en los cuatro tratamientos en el año 2012. Los valores registrados en todas las profundidades, en los tratamiento de 60 y 80 % presentan un descenso prácticamente continuo, sin embargo, el tratamiento más deficitario presenta una disminución de la tensión más crítica a 40 cm, superando los 150 cbar. Este comportamiento indica que la estrategia de riego adoptada en este

tratamiento no permitía que llegase agua a tal profundidad, coincidiendo con los resultados observados en los sensores FDR.

En cuanto a los tratamientos de 100 y 120 %, la representación gráfica muestra que las oscilaciones observadas en la segunda campaña son similares a las presentadas en la campaña anterior. Por su parte, las variaciones de ψ_m son menos marcadas en estos tratamientos respecto a los del 80 y 60 %.

Así, al igual que lo registrado por los sensores FDR, la gráfica de las tensiones del tratamiento de 80 %, también presenta mayores humedades a la profundidad 40 cm respecto a la de 20 cm, al inicio de la segunda campaña. Sin embargo, a lo largo del ciclo, y en función del tratamiento hídrico, ocurre una disminución de la humedad a mayores profundidades (Fig. 23).

A 30 cm de profundidad, en el tratamiento de 100 % no se registran modificaciones importantes del ψ_m en función de los riegos aplicados, además se registra una disminución de la humedad a 40 cm, por tanto parece descartable que existiera percolación.

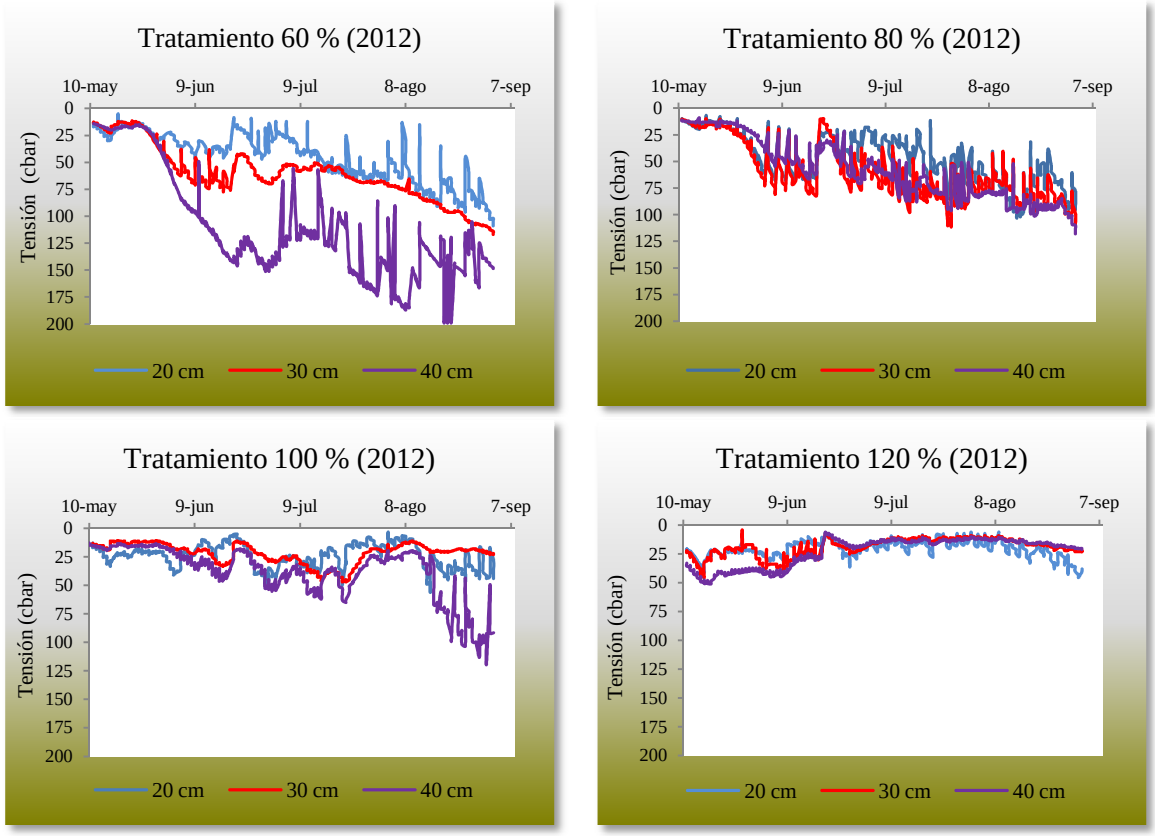


Figura 23: Evolución de los valores absolutos del potencial mátrico (cbar) a las profundidades de 20, 30 y 40 cm. Año 2012.

5.3.1 Plano de flujo cero.

Se utilizaron los datos de los sensores Watermark® instalados en el año 2012 para ubicar el plano de flujo cero (PFC).

La figura 24 muestra, a modo de ejemplo, la evolución del potencial hídrico (Ψh) en los días transcurridos entre dos riegos, de 19 a 21 de julio para los tratamientos de 80 y 60 %, y de 18 a 20 de julio para los tratamientos de 100 y 120 %. En el momento de comparar los gráficos, hay que tener en consideración que, para una mejor visualización,

se optó por exponer distintos intervalos de la escala del Ψh, de 0 a -200 cbar en los tratamientos que menos recibía agua, y 0 a -50 en los que más recibían.

En todos los casos, el Ψh se hace más negativo (el suelo se queda más seco) con el transcurrir de los días tras el riego aplicado. En el tratamiento más deficitario (60 %) son apreciables valores muy negativos del Ψh, sobrepasando a los 100 cbar, principalmente a partir del 30 cm de profundidad, resultado de que la escasa lámina aplicada en este tratamiento no fue suficiente para alcanzar mayores profundidades.

De acuerdo con Khalil *et al.* (2003), el PFC separa dos zonas de movimiento ascendente y descendente del agua en el suelo, el agua se mueve en una dirección hacia arriba del PFC por evapotranspiración, y hacia abajo por el drenaje. Es llamado flujo cero el punto donde el agua no fluye ni hacia arriba ni hacia abajo, es decir, donde el gradiente hidráulico es cero (Jiménez *et al.*, 2010). Se supone que, salvo variaciones insignificantes, la zona del flujo cero es hidráulicamente plana, es decir, no posee un gradiente de potenciales hidráulicos que originen un movimiento del agua en el suelo (Khalil *et al.*, 2003).

En todos los tratamientos, alrededor de los 30 cm de profundidad es donde se presentan valores del Ψh menos negativos (Fig. 24), y en base a este comportamiento se situó en PFC a esta profundidad. Considerando que no existió percolación, visto que a mayores profundidades el Ψh permanece constante o se hace más negativo, se tomó la decisión de realizar el balance hídrico simplificado (teórico y sobre las lecturas de los sensores FDR) hasta la profundidad de 30 cm para los cuatro tratamientos.

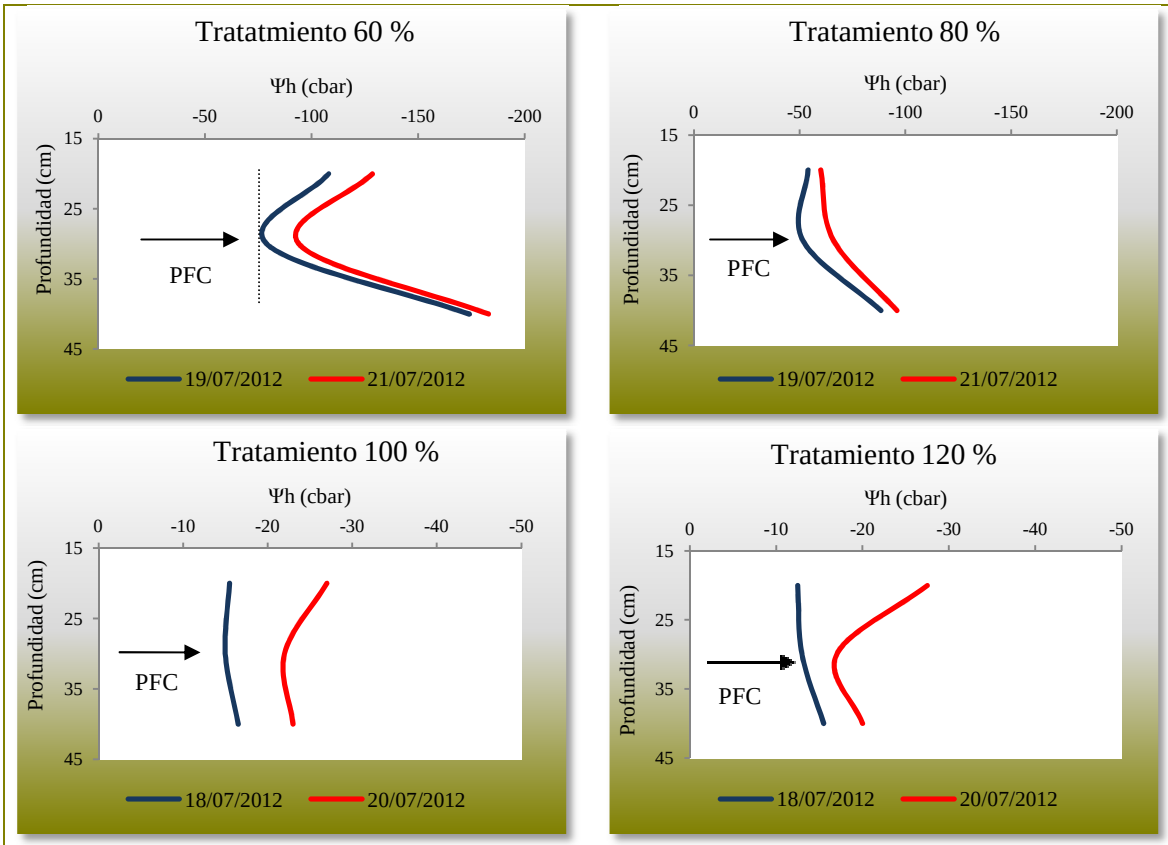


Figura 24: Distribución vertical del potencial hídrico (Ψh) en los cuatro tratamientos hídricos. Año 2012.

5.4 Estimación de la evapotranspiración real.

Se utilizaron dos metodologías para estimar la ET real entre riegos durante las campañas de 2011 y 2012. La primera mediante el balance hídrico simplificado utilizando los sensores FDR (BS_{FDR}), y el segundo mediante el Balance de Energía Relación de Bowen (BREB). El resultado de ambas metodologías fue contrastado con los valores de la ET del cultivo estimado por el balance hídrico simplificado teórico (BS_T) basado en la metodología FAO aplicada con los datos recomendados y ajustados a la zona con experiencias previas a este ensayo (Fabeiro *et al*., 2001; SIAR, 2008).

Se han seleccionado días distribuidos entre los diferentes estadios de crecimiento, desarrollo y demanda evaporativa del cultivo. En estos días (siempre entre riegos), las condiciones de movimiento de agua en el suelo fueron adecuadas para poder analizar el balance con suficientes garantías.

5.4.1 Comparación de la ET del cultivo y de la ET real mediante distintas metodologías.

Para días concretos y con el objetivo de analizar el valor de ET real en momentos clave del ciclo del cultivo, coincidiendo con los principales estadios FAO en la evolución de la demanda hídrica y analizar los valores del coeficiente del cultivo (Kc), se representa en la figura 25, la evolución de la ET del cultivo calculado por medio del BS_T y los puntos obtenidos de la ET real mediante la metodología BS_{FDR}, en el tratamientos de referencia (100 %).

Las gráficas muestran una gran similitud entre los resultados de los balances hídricos, sin embargo, la variación de los puntos de la ET real en función de la ET del cultivo indican que una calibración del Kc para las condiciones locales resultarían en una mayor precisión en la estimación de las necesidades hídricas del cultivo.

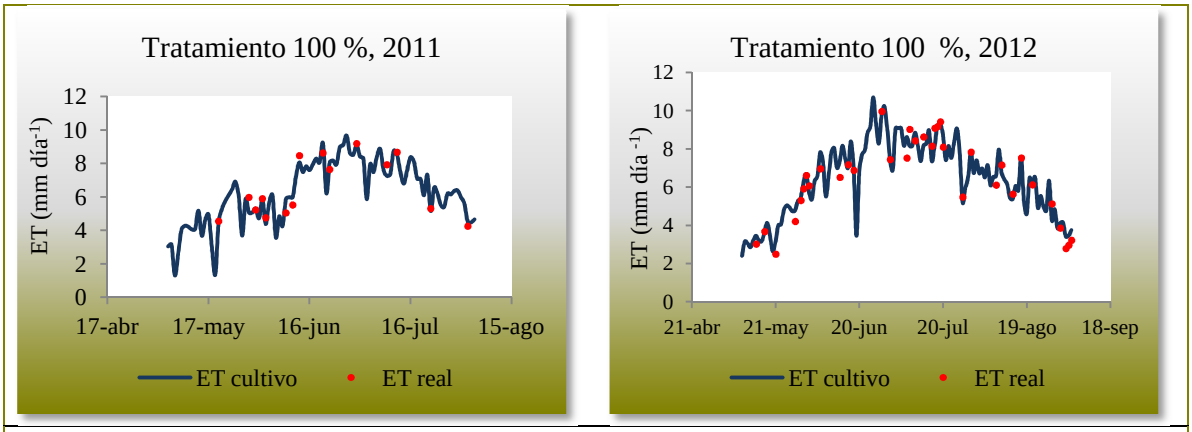


Figura 25: Evolución de la evapotranspiración a lo largo del ciclo agronómico en los años 2011 y 2012.

Se elegieron días concretos en función del estadio fenológico del cultivo para comparar y analizar puntualmente los valores de la ET del cultivo y la ET real, así como los valores del Kc teótico (Doorenbos y Kassam, 1986) y estimado. Dichos resultados se presentan en las tablas 40 y 41, así como los valores de la evapotranspiración de referencia (ET_o).

Sin embargo, las comparaciones entre los balances hídricos solamente se pueden hacer entre los tratamientos de 120 y 100 %, dado que son los casos en los que, de acuerdo con el diseño experimental y con los resultados obtenidos, no han aparecido diferencias de rendimiento que justifiquen la existencia estrés hídrico y deben responder adecuadamente al modelo teórico, presentando una relación directa entre la ET y el

coeficiente del cultivo (Kc). En cualquier caso, este hecho se contrastará con estos datos y con el ensayo en su globalidad, formando parte de la discusión de los resultados y del valor final que se estimará del Kc.

En el año 2011, la ET real es más baja en el 22 de julio, variando entre 2,5 y 5,1 mm día $^{-1}$ para BS_{FDR} (Tabla 40), puesto que en esta fecha, el cultivo se encontraba en un estadio avanzado de senescencia. Los valores de Kc estimados, en 2011, tienen gran similitud con los teóricos, salvo en el 22 de julio donde el Kc estimado es menor.

Tabla 40: Evapotranspiración y coeficiente de cultivo teórico y estimado, en el año 2011.

Fecha	ET_o (mm día^{-})	ET (mm día^{-1})							
		120 %		100 %		80 %		60 %	
		BS_T	BS_{FDR}	BS_T	BS_{FDR}	BS_T	BS_{FDR}	BS_T	BS_{FDR}
31 mayo	4,6	5,3	6,5	5,3	5,2	-	6,4	-	4,3
11 junio	5,2	5,9	6,5	5,9	5,8	-	3,6	-	3,8
22 junio	7,0	8,1	9,1	8,1	8,0	-	8,3	-	8,7
22 julio	5,1	5,1	5,1	5,1	4,7	-	3,1	-	2,5
	Kc teórico			Kc estimado					
31 mayo	1,15			1,13					
11 junio	1,15			1,12					
22 junio	1,15			1,14					
22 julio	1,01			0,93					

La correspondencia entre los resultados de los balances hídricos para valores de la ET y Kc estimado frente el Kc teórico, también se observa en la campaña de 2012 (Tabla 41). Sin embargo, a partir del 14 de agosto de 2012 los valores del Kc teórico son ligeramente superiores los del Kc estimado, indicando que, así como en la campaña anterior, en el estadio de senescencia las necesidades hídricas del cultivo son inferiores a las estimadas por el balance teórico. Por ello, es necesario disminuir el valor del Kc recomendado de la FAO (0,75) en la etapa final del cultivo.

A partir del 30 de mayo (inicio de la floración y tuberización) hasta la primera quincena de agosto de año 2012 (estadio de senescencia), se observa la mayor demanda hídrica del cultivo, llegando a valores de 9,3 y 9,4 mm día^{-1} (BS_T *vs* BS_{FDR}) en el tratamiento de 120 %, y, 8,3 y 9,4 mm día^{-1} (BS_T *vs* BS_{FDR}) en el tratamiento de 100 %.

Los bajos valores de la ET real observados en los tratamientos de menor aporte hídrico, observados a partir del 30 de mayo en el $BS_{FDR,}$ es una clara respuesta del cultivo a una situación de estrés hídrico (Tabla 41).

Tabla 41: Evapotranspiración y coeficiente de cultivo teórico y estimado, en el año 2012.

Fecha	ET_o (mm día^{-})	ET (mm día^{-1})							
		120 %		100 %		80 %		60 %	
		BS_T	BS_{FDR}	BS_T	BS_{FDR}	BS_T	BS_{FDR}	BS_T	BS_{FDR}
30 mayo	5,8	5,4	5,7	5,4	5,3	-	5,6	-	4,0
19 julio	8,1	9,3	9,4	8,3	9,4	-	6,0	-	6,0
14 agosto	5,8	5,4	5,3	5,4	5,2	-	4,3	-	3,0
31 agosto	5,3	4,1	4,9	4,1	3,8	-	1,0	-	2,2
4 septiembre	5,0	3,7	3,4	3,7	3,2	-	3,8	-	4,5
	Kc teórico			Kc estimado					
30 mayo	0,93			0,91					
19 julio	1,15			1,16					
14 agosto	0,93			0,89					
31 agosto	0,78			0,72					
4 septiembre	0,75			0,64					

Para una mejor visualización de la similitud de los resultados de la ET, se ha utilizado todos los datos de los dos años de estudio, analizando la correlación entre los balances BS_T y BS_{FDR}. La figura 26 muestra un ajuste lineal con R^2 = 0,92 y una raíz del error medio cuadrático de 0,17 mm día^{-1}, lo que indica un buen ajuste entre la ET estimada y calculada por los dos balances hídricos.

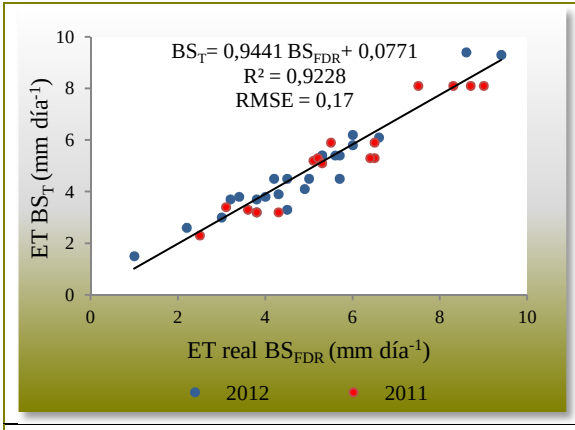


Figura 26: Comparación de la ET estimada por el BS_T y el BS_{FDR}, con los datos de ambas campañas.

En el momento del máximo desarrollo vegetativo, se empleó la metodología del Balance de Energía Relación de Bowen (BREB) a fin de obtener una contrastación más de los valores de la ET real.

Las tablas 42 y 43 nos permiten comparar los valores de ET, en los dos años de campaña, estimados mediante las metodologías del balance hídrico simplificado y del BREB. Dichas comparaciones se han hecho únicamente para el tratamiento que corresponde a aplicación de 120 % de las necesidades hídricas.

En la primera campaña, los valores de la ET real por el método BREB y BS_{FDR}, corresponden al 75 y 92 % de la ET estimada por el BS_T, en el 15 de junio, y, 90 y 97 %, en el 06 de julio. Sin embargo, en el 02 de agosto, la ET real estimada por la metodologías BREB (6,2 mm día^{-1}) es mayor que la teoría calculada por el BS_T (4,5 mm día^{-1}) (Tabla 42). La misma tendencia de mayores valores de la ET real estimadas por BREB a finales del ciclo, también se observa en la segunda campaña (Tabla 43).

En dichas fechas (02/08/11 y 23/08/12), fueron muy próximas a la cosecha (08/08/11 y 05/09/12) y el cultivo se encontraba en estado avanzado de senescencia, sin embargo los datos medidos por el BREB presentaron una demanda hídrica superior al presentado por los balances hídricos. Por ello, se considera que la ET real estimada por el BREB puede sobrestimar la demanda hídrica cuando es calculada para estadios más avanzados del cultivo.

El método BREB presentó menores valores de la ET real en el momento de máximo desarrollo del cultivo en ambas campañas. De acuerdo con Zhang *et al.* (2008), los bajos valores de la ET real estimada por el BREB podría ser resultado de la subestimación de la demanda hídrica del cultivo durante periodos nocturnos.

Tabla 42: Valor de la ET real estimada mediante diferentes metodologías en el año 2011.

Fecha	ET_o (mm día^{-})	ET real 2011 (mm)		
		BS_T	BREB	FDR
15 de junio	6,8	7,8	5,9	7,2
06 de julio	7,3	8,4	7,6	8,2
02 de agosto	5,7	4,5	6,2	4,2

Tabla 43: Valor de la ET real estimada mediante diferentes metodologías en el año 2012.

Fecha	ET_o (mm día^{-})	ET real 2012 (mm)		
		BS_T	BREB	FDR
05 de junio	6,1	6,5	5,1	5,5
19 de julio	8,1	9,3	8,5	9,4
23 de agosto	5,8	4,9	6,5	5,0

5.5 El análisis del cultivo.

5.5.1 Evolución de la fenologia del cultivo.

La figura 27 recoge la evolución en función de los grados días de crecimiento acumulado (GDD) de los dos ciclos agronómicos de la patata siguiendo la clave BBCH. El desarrollo del cultivo fue homogéneo a lo largo de toda la campaña de los dos años experimentales, no apareciendo diferencias en la fecha de alcance de los principales estados fenológicos en los diferentes tratamientos, sin embargo, en el segundo año experimental, se observó una mayor duración de las fases fenológicas, registrando un total de 2854 GDD acumulados durante todo el ciclo agronómico en el año 2012, frente 2324 GDD en el año 2011.

El estadio de germinación/emergencia (00-09) se alcanzó con 319 GDD en 2011 y 372 GDD en 2012, cuando 50 % de las plantas del área de cultivo habían emergido. Estas diferencias se deben fundamentalmente a que las temperaturas medias registradas en el suelo fueron distintas en ambos años, siendo la temperatura en el 2011 superior a la del 2012, constatando que el momento de la emergencia está altamente relacionado con el tiempo térmico (tema más ampliamente desarrollado en el subepígrafe 5.5.3).

Según la clave BBCH, la fase del desarrollo vegetativo, en el cultivo de la patata, es considerada un mesoestadio, es decir, incluye dos o más estadios principales del crecimiento. Dentro de este mesoestadio, se puede identificar los estadios principales de la floración e inicio de la tuberización hasta la senescencia de las hojas (10-89). De acuerdo con la clasificación, el inicio de los estadios de la floración (51-69) y tuberización (40-49) coinciden y, fue identificado tras alcanzar más 310 GDD en 2011 y 379 GDD en 2012 después de la emergencia.

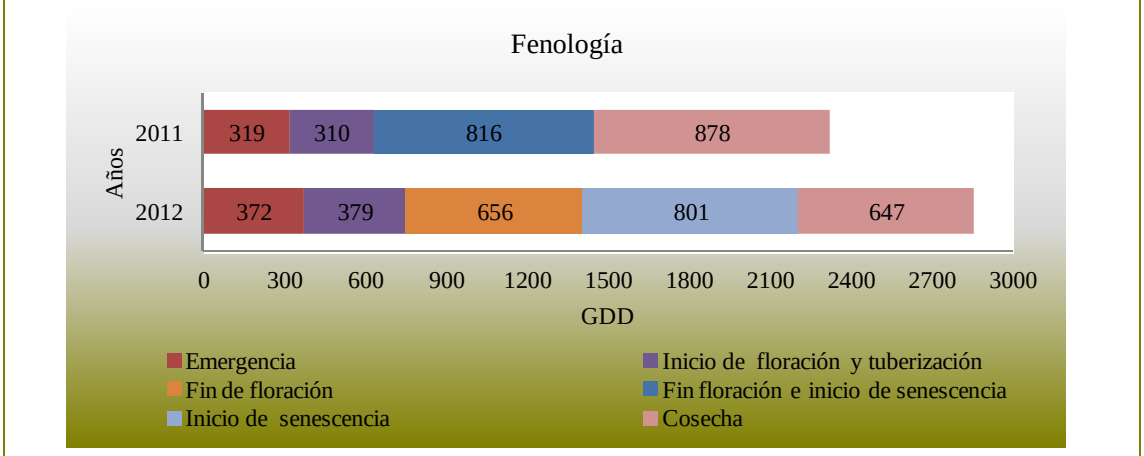


Figura 27: Ciclo agronómico de la patata en los dos años de ensayo.

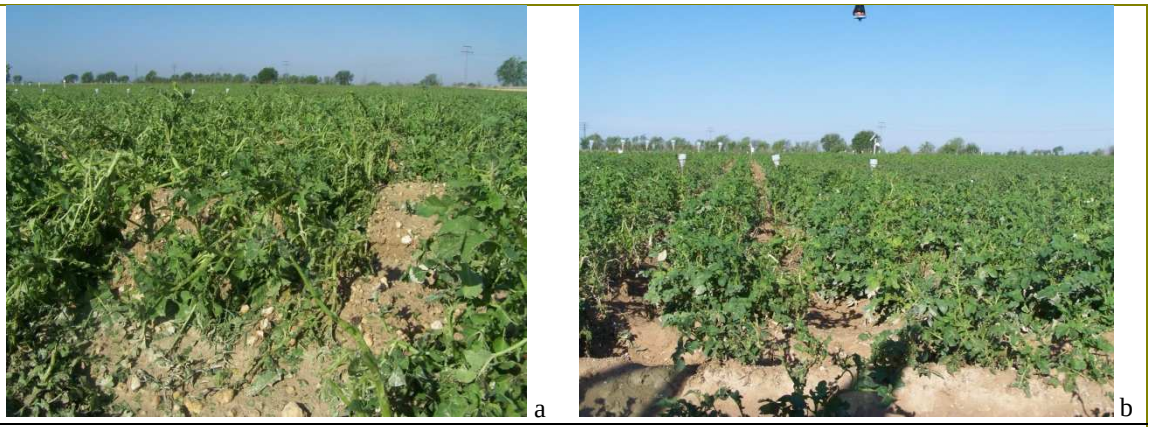
En la tabla 44 se recoge la duración en días desde la plantación (DDP) de las principales fases fenológicas del cultivo de la patata.

Tabla 44: Duración de las principales fases fenológicas del cultivo de la patata.

2011			2012		
Fecha	DDP	Fase Fenológica	Fecha	DDP	Fase Fenológica
09 de marzo	0	Plantación	16 de marzo	0	Plantación
15 de abril	37	Emergencia	03 de mayo	48	Emergencia
12 de mayo	64	Inicio de la floración y tuberización	28 de mayo	73	Inicio de la floración y tuberización
29 de junio	112	Fin de la floración e Inicio de la senescencia	01 de julio	107	Fin de la floración
08 de agosto	152	Cosecha	07 de agosto	144	Inicio de la senescencia
			05 de septiembre	173	Cosecha

La clasificación indica el fin de la fase de la floración conjuntamente con el inicio del estadio de la senescencia de las hojas, como observado en el año 2011 tras acumular más 816 GDD. Sin embargo, las fases fenológicas mencionadas no coincidieron en el segundo año de estudio, donde para empezar la senescencia, el cultivo necesitó acumular 801 GDD tras el final de la floración. Tal hecho se debe a dos factores principales:

- El primero factor es que, en el 19 de junio de 2012 (95 DDP), parte de la provincia de Albacete se registró una tormenta, 21 días después en que se han identificado el inicio de la floración y tuberización en el cultivo. Se aplicó un tratamiento curativo (abono orgánico Siapton® - 57,1 % materia orgánica, 8,7 % N, 7,9 % aminoácidos libres + fungicida Ridomil®) y no se restringió el suministro del agua con el fin de garantizar la recuperación del cultivo. Trece días después de la tormenta el cultivo ya había recuperado el porte (Fotografía 27). La necesidad del cultivo de emitir nuevos brotes y hojas contribuyeron a la senescencia tardía, y el consiguiente alargamiento del ciclo.



Fotografía 27: a) Condiciones del cultivo en el día de la tormenta y b) trece días después del la tormenta.

- Las altas temperaturas (diurnas y nocturnas) producidas en el año 2012 contribuyeron también al alargamiento del ciclo. La diferencia entre las temperaturas de los años experimentales se muestran en la figura 28. A partir del inicio de la tuberización, en 2011 se registraron 45 días con temperaturas máximas superiores a 30 ºC, frente a 75 días en 2012.

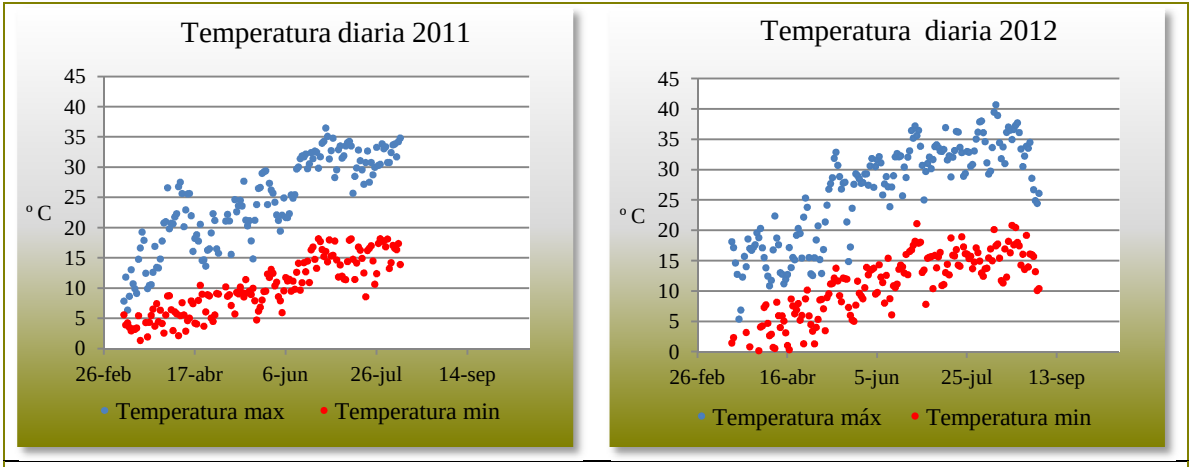


Figura 28: Evolución de las temperaturas máximas y mínimas durante el ciclo agronómico de los dos años estudiados.

Según Struik (2007) y Fleisher y Timlin (2006) las altas temperaturas pueden ampliar el periodo de formación de la hoja a través de su efecto positivo en el crecimiento simpodial (capacidad de la planta de la patata de emitir nuevas hojas en las yemas laterales del los tallos). Fleisher *et al.* (2008) observaron una tasa de emisión de hojas de 0,89 hojas por planta y día en régimen de temperatura de 34/29 ºC (diurna/nocturna) y, 0,46 en régimen de 17/12 ºC. Struik (2007) comenta que, aunque el efecto de las altas temperaturas produzca un menor índice de cosecha (IC), también prolonga la duración del ciclo del cultivo, siempre que las condiciones ambientales y de manejo (adecuado suministro de agua y nutrientes) permiten la continuación del crecimiento.

Kooman *et al.* (1996a), estudiando el efecto del clima en la acumulación de materia seca total y en la duración del ciclo de crecimiento en diferentes genotipos de patata, dividieron el ciclo agronómico de la patata en tres fases principales: **1**- desde la emergencia hasta el inicio de la tuberización, **2**- desde la tuberización hasta el final del crecimiento foliar (cuando 90 % de la materia seca están acumuladas en los tubérculos) y **3**- del final del crecimiento de las hojas hasta el término del crecimiento del cultivo (definido cuando la cobertura del suelo está reducida a 50 % de su total). Estos autores observaron que las altas temperaturas producían un incremento en la duración de la segunda fase del cultivo, puesto que para temperaturas elevadas la fuerza de la relación fuente-sumidero es más débil, resultando en una baja demanda de carbohidratos a los tubérculos y una tasa de senescencia foliar más lenta. Además, Kooman *et al.* (1996a) concluyeron que el aumento de la duración de la primera fase del cultivo, resulta en un incremento dos veces mayor en las fases 2 y 3 combinadas.

5.5.2 Densidad poblacional en parcelas.

La densidad poblacional en recolección de ambas campañas de estudio no presentó diferencias significativas entre los distintos tratamientos (Fig. 29). Las medias para cada tratamiento de las parcelas de ensayo oscilaron entre 6,1 y 5,7 plantas m^{-2} (en los tratamientos de 60 y 80 %), en 2012, y 5,1 y 6,2 plantas m^{-2} (en los tratamientos de 120 y 100 %), en 2011.

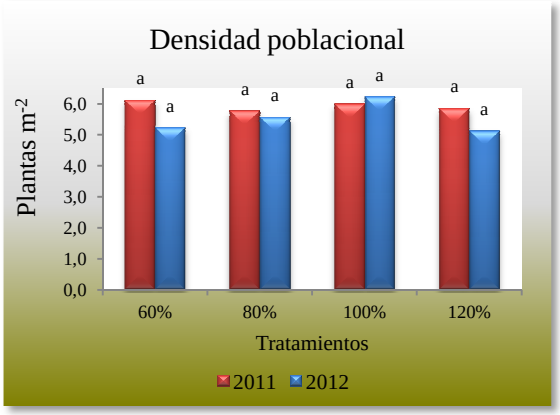


Figura 29: Densidad poblacional en recolección. Letras minúsculas iguales no indican diferencias significativas entre los tratamientos (Duncan, α=0,05 %)

Estos valores de densidad poblacional están de acuerdo con los recomendados por Robles (2008), que analizando la influencia de la densidad del cultivo sobre la producción de dos cultivares de patata, concluyó que las densidades que varían entre 4,0 y 6,8 plantas m^{-2} no influyen en la producción comercial de la variedad Agria.

5.5.3 Análisis y modelación de la emergencia.

En este apartado se describen los principales parámetros que influyen en la emergencia en el cultivo de la patata. Con el análisis de los datos fue posible desarrollar un modelo que simula el momento de la emergencia.

En la tabla 45 se analiza todos los datos en conjunto (año 2011 y 2012). La matriz de correlación indica que entre las variables, el tiempo térmico o grados días acumulados (GDD) es la principal variable ambiental capaz de explicar los cambios en el crecimiento

y desarrollo de los brotes en el tubérculo madre, es decir, los GDD influyen directamente en la velocidad de la emergencia del cultivo de patata.

La materia seca del tubérculo madre (MS.tub) es una variable que tiene un alto grado de correlación negativa (-0,69) con la longitud del brotes (L.brote) y la longitud de las raíces (L.raíces). Este hecho indica que a medida que se gana longitud en brotes y raíces, el tubérculo madre pierde materia seca y se aproxima el momento de la emergencia.

La baja relación de la humedad volumétrica (θv) con las demás variables analizadas comproba que se ha mantenido el suelo con humedad suficiente para que no influyese en el análisis y modelado de la emergencia. El objetivo del ensayo ha sido disponer de unas parcelas experimentales sin diferencias significativas sobre las que, una vez establecido el cultivo, iniciar tratamientos diferenciados de riego.

Tabla 45: Matriz de correlaciones del conjunto de todos los datos entre las variables estudiadas en los años 2011 y 2012.

	DDP	MStub	MS.brote	L.brote	Nº brote	L.raíces	Tm suelo	Tm aire	GDD	Hv
DDP	1,00	-0,66	0,30	0,83	0,44	0,81	0,69	0,60	0,99	0,19
MStub	-0,66	1,00	0,06	-0,69	-0,23	-0,77	-0,46	-0,49	-0,67	-0,35
MS.brote	0,30	0,06	1,00	0,05	0,27	-0,43	0,20	0,20	0,29	0,33
L.brote	0,83	-0,69	0,05	1,00	0,29	0,92	0,72	0,52	0,87	0,19
Nº brotes	0,44	-0,23	0,27	0,29	1,00	-0,32	0,13	0,04	0,45	0,33
L.raíces	0,81	-0,77	-0,43	0,92	-0,32	1,00	0,35	0,19	0,87	0,24
Tm suelo	0,69	-0,46	0,20	0,72	0,13	0,35	1,00	0,85	0,73	-0,20
Tm aire	0,60	-0,49	0,20	0,52	0,04	0,19	0,85	1,00	0,62	-0,14
GDD	0,99	-0,67	0,29	0,87	0,45	0,87	0,73	0,62	1,00	0,15
θv	0,19	-0,35	0,33	0,19	0,33	0,24	-0,20	-0,14	0,15	1,00

DDP: días desde la plantación; MStub: materia seca del tubérculo madre; MS.brote: materia seca del brote; L.brote: longitud del brote; Nº brote: número de brotes; L.raíces: longitud de las raíces; Tm suelo: temperatura media del suelo; Tm aire: temperatura media del aire ; GDD: grados días acumulados y θv: humedad volumétrica

*Las celdas sombreadas separa la diagonal y destaca los valores con alta correlación.

La germinación de las yemas en los tubérculos fue a los 85 y 163 GDD para los años de 2011 y 2012, respectivamente, teniendo en cuenta que, en ambos años, la semilla (tubérculo madre) utilizada para el ensayo de emergencia se encontraban en el mismo estado de desarrollo. Estas diferencias se deben fundamentalmente a que las temperaturas medias registradas en el suelo fueron distintas en ambos años.

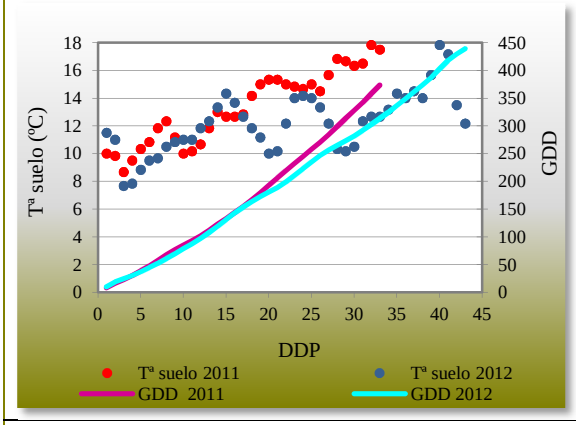


Figura 30: Evolución de la temperatura del suelo y los grados días de crecimiento acumulado.

En la figura 30 se observa que la temperatura registrada en el suelo en el 2011 en general fue superior a la del 2012, destacándose, principalmente, entre los 3 y 8 DDP, y posterior a los 18 DDP. Este hecho se ha traducido en una diferencia media de la temperatura de 1,1 ºC entre ambos años.

La tasa de crecimiento de los brotes hasta que tiene lugar a su emergencia se ha determinado relacionando la profundidad de plantación con la diferencia entre los GDD acumulados desde la plantación hasta la emergencia (373,5 y 439,5 GDD, para los años 2011 y 2012) y los GDD acumulados hasta el momento en que se reproduce la germinación de los brotes. De esta forma se obtuvo que en la primera campaña la tasa de crecimiento fuera de 0,70 mm GDD^{-1} y en la segunda

campaña fuera de 0,72 mm GDD^{-1}, que es 0,29 mm GDD^{-1} inferior al determinado por Griffin *et al*. (1993).

Como los GDD acumulados es la variable que explica el momento de emergencia con mayor relevancia, con los datos del año 2011 se desarrolló un modelo, mediante regresión múltiple, que permite simular el momento de la emergencia (Ec. 29), con un grado de ajuste de 98,9%.

$$DDP = 2{,}376 + 0{,}0866\ GDD \qquad (29)$$

Siendo DDP: días desde la plantación y GDD: grados días acumulados.

La figura 31 expone la similitud de los datos del momento de la emergencia observado (a los 43 días) frente al simulado (a los 41 días), en el año 2012, presentando una variación de 4,6 %.

De acuerdo con los criterios de Domínguez *et al*. (2012), si la correlación del valor simulado con su correspondiente valor observado se encuentran dentro de una variación de ± 10 %, se puede considerar que el grado de robustez del modelo es adecuado en cuanto a la capacidad de simulación.

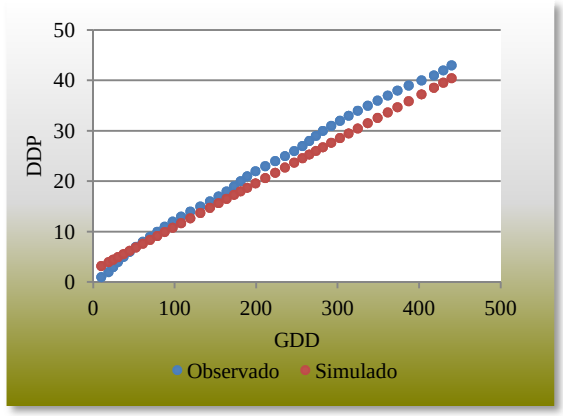


Figura 31: Datos observados frente a los simulados de los días desde la plantación en el que ocurre la emergencia, para el año 2012.

5.5.4 Análisis del crecimiento.

5.5.4.1 Evolución de la materia seca total.

Los datos obtenidos de la materia seca total (MST) durante el ciclo agronómico han sido ajustados, mediante el análisis de regresión no lineal, a los modelos Gompertz y Logístico, en los años 2011 y 2012. La evolución de la MST se explica muy bien a través de ambos modelos, sin embargo, se optó por seleccionar el modelo Gompertz tanto por su elevado coeficiente de determinación en el modelo y en los parámetros como porque el perfil resultante (valores simulados frente a los observados) se ajusta mejor al comportamiento biológico de la planta, en comparación con el modelo logístico.

Arazi *et al*. (1993) al probar tres modelos (Gompertz, Logística y Richards) para describir el acumulo de MST en el cultivo de patata, comprobó que el modelo Gompertz fue el que mejor se ajustó a los datos observados en campo.

El nivel de significación de los parámetros de ajuste de los distintos modelos que relacionan la MST con los días desde la emergencia (DDE), están resumidos en las tablas 46 (para los tratamientos que aportaban 120 y 100 % de las necesidades hídricas del cultivo) y 47 (para los tratamientos que aportaban 80 y 60 %). Las tablas también muestran los coeficientes de determinación (R^2) de los modelos, su significación y la comprobación de la validez del modelo, a través de los estadísticos de normalidad (KS), homocedasticidad (S) e independencia (D).

En las doce parcelas elementales de estudio, los cuatro tratamientos diferenciados con sus tres repeticiones, para ambas campañas, el ajuste del modelo Gompertz resultó estadísticamente muy significativo a nivel de confianza de 99%. En general, sus parámetros también presentaron alto nivel de confianza, donde representan el peso máximo alcanzable, la intercepción del peso en el origen y el coeficiente de respuesta al

agua (parámetros a, b y c, respectivamente). Además, en todas las parcelas, el R^2 está comprendido entre 94,6 y 99,6 %, en 2011, y 93,9 y 99,9 %, en 2012.

Koning (1994) utilizó el modelo Gompertz para analizar el crecimiento y la distribución de la materia seca del cultivo de tomate en invernadero, visto que el modelo representaba más de 99% de la varianza de los datos utilizados. Diversos autores recurrieron al modelo Gompertz para describir el crecimiento del cultivo de la patata (Arazi *et al.*, 1993; Mills, 2002; Fleisher *et al.*, 2008; Ahmadvand *et al.*, 2009; Bojacá *et al.*, 2011; Monteiro *et al*., 2011).

En relación a los estadísticos para la validación del modelo, el test de normalidad, para el estadístico *Kolmogorov-Smirnov* en el modelo Gompertz, muestra que en las parcelas de ensayo para ambas campañas (2011 y 2012), puede considerarse que los residuos tienen una distribución normal, al nivel de significación del 5 %. Sin embargo, en 2012, tres parcelas no cumplieron la hipótesis de normalidad. En general, la correlación de *Spearman* muestra que 75 % de las parcelas experimentales, en ambas campañas, presentan una varianza de los residuos constante, cumpliendo así, la hipótesis de homocedasticidad en el modelo Gompertz.

La hipótesis de independencia, que se prueba con el estadístico de *Durbin-Watson*, se cumple en por lo menos una de las parcelas por tratamiento hídrico, menos en el tratamiento de 100 % en el año 2011. En las parcelas en las que no se cumplieron las hipótesis de independencias, representan que hay correlación entre los residuos del modelo Gompertz.

En general, se cumplieron los criterios de calidad y significatividad del modelo Gompertz. No obstante, existen algunos casos concretos que no cumplen algún parámetro, sin embargo, por ser unos casos puntuales y se tratar de un modelo muy robusto, estos datos no representan un problema de cara a la interpretación de los resultados.

Tras la elección del modelo, se representó gráficamente, para las doce parcelas, la evolución de los datos observados y simulados, por el modelo Gompertz, de la MST en las figuras 32 a 35.

Tabla 46: Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos Gompertz y Logístico que describen las relaciones entre la materia seca total y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo de los tratamientos de 120 y 100 %, para los dos años de estudio.

Trat.	Parcela	Modelo	Función	Año experimental 2011							Año experimental 2012					
				R^2	p	p par		KS	D	Se	R^2	p	p par		KS	D	Se
Tratamiento hídrico 120 %	81A	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,946	**	a<0,001 b=0,032 c=0,039	** * *	sí	sí	sí	0,957	**	a<0,001 b=0,021 c=0,035	** * *	sí	no	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,964	**	a<0,001 b=0,009 c=0,012	** ** *	sí	sí	sí	0,968	**	a<0,001 b=0,006 c=0,009	** ** **	sí	no	sí
	63B	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,969	**	a<0,001 b=0,012 c=0,015	** * *	sí	sí	sí	0,980	**	a=0,003 b=0,002 c=0,016	** ** *	no	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,981	**	a<0,001 b=0,002 c=0,003	** ** **	sí	no	sí	0,986	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	no	sí
	45C	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,955	**	a=0,109 b=0,009 c=0,117	ns ** ns	sí	sí	no	0,988	**	a<0.001 b=0,001 c=0,001	** ** **	no	sí	no
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,964	**	a=0,003 b=0,003 c=0,016	** ** **	sí	sí	sí	0,982	**	a<0,001 b=0,001 c=0,002	** ** **	sí	sí	sí
Tratamiento hídrico 100 %	81B	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,976	**	a<0,001 b=0,004 c=0,014	** ** *	sí	no	sí	0,996	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,973	**	a<0,001 b=0,002 c=0,006	** ** **	sí	sí	sí	0,991	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	no	sí
	63A	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,960	**	a=0,002 b=0,013 c=0,033	** ** *	sí	no	sí	0,981	**	a<0,001 b=0,004 c=0,004	** ** **	no	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,971	**	a<0,001 b=0,003 c=0,007	** ** **	sí	no	sí	0,983	**	a<0,001 b=0,002 c=0,002	** ** **	sí	sí	no
	27C	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,969	**	a<0,001 b=0,028 c=0,031	** * *	sí	no	sí	0,999	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,974	**	a<0,001 b=0,012 c=0,013	** * *	sí	sí	sí	0,999	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí

Trat: tratamiento; R^2: coeficiente de determinación; p: nivel de significación; p par: nivel de significación de parámetros del modelo; KS: normalidad mediante método de *Kolmogorov-Smirnov*; D: independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*; Se: homocedasticidad mediante correlación de *Sperarman*; ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Tabla 47: Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos Gompertz y Logístico que describen las relaciones entre la materia seca total y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo de los tratamientos de 80 y 60 %, para los dos años de estudio

Trat.	Parcela	Modelo	Función	Año experimental 2011							Año experimental 2012					
				R^2	p	p par		KS	D	Se	R^2	p	p par		KS	D	Se
Tratamiento hídrico 80 %	63C	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,977	**	a<0,001 b=0,007 c=0,014	** ** *	sí	no	sí	0,983	**	a<0,001 b<0,001 c=0,003	** ** **	sí	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,968	**	a<0,001 b=0,005 c=0,009	** ** **	sí	sí	sí	0,972	**	a<0,001 b<0,001 c=0,003	** ** **	sí	no	sí
	45B	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,967	**	a=0,426 b<0,001 c=0,221	ns ** ns	sí	no	sí	0,991	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	no
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,962	*	a=0,282 b=0,001 c=0,046	ns ** *	sí	no	sí	0,986	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí
	27A	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,980	**	a=0,085 b<0,001 c=0,055	ns ** ns	sí	sí	sí	0,953	**	a<0,001 b=0,012 c=0,020	** * **	sí	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,973	**	a=0,016 b<0,001 c=0,013	* ** *	sí	sí	sí	0,935	**	a<0,001 b=0,011 c=0,021	** * *	sí	sí	sí
Tratamiento hídrico 60 %	81C	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,996	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	no	sí	0,980	**	a=0,001 b=0,001 c=0,009	** ** **	no	no	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,992	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí	0,975	**	a<0,001 b<0,001 c=0,003	** ** **	sí	no	sí
	45A	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,966	**	a<0,001 b=0,016 c=0,017	** * *	sí	sí	no	0,939	**	a<0,001 b=0,053 c=0,054	** * *	sí	sí	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,979	**	a<0,001 b=0,004 c=0,004	** ** **	sí	no	no	0,954	**	a<0,001 b=0,021 c=0,023	** * *	sí	sí	sí
	27B	Gompertz	MST=a*exp(-exp(b-c*DDE))	0,903	**	a<0,001 b=0,101 c=0,103	** ns ns	sí	sí	sí	0,995	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	no	sí
		Logística	MST=a/(1+exp(b-c*DDE))	0,907	**	a<0,001 b=0,143 c=0,141	** ns ns	sí	no	sí	0,992	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí

Trat: tratamiento; R^2: coeficiente de determinación; p: nivel de significación; p par: nivel de significación de parámetros del modelo; KS: normalidad mediante método de *Kolmogorov-Smirnov*; D: independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*; Se: homocedasticidad mediante correlación de *Sperarman*; ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

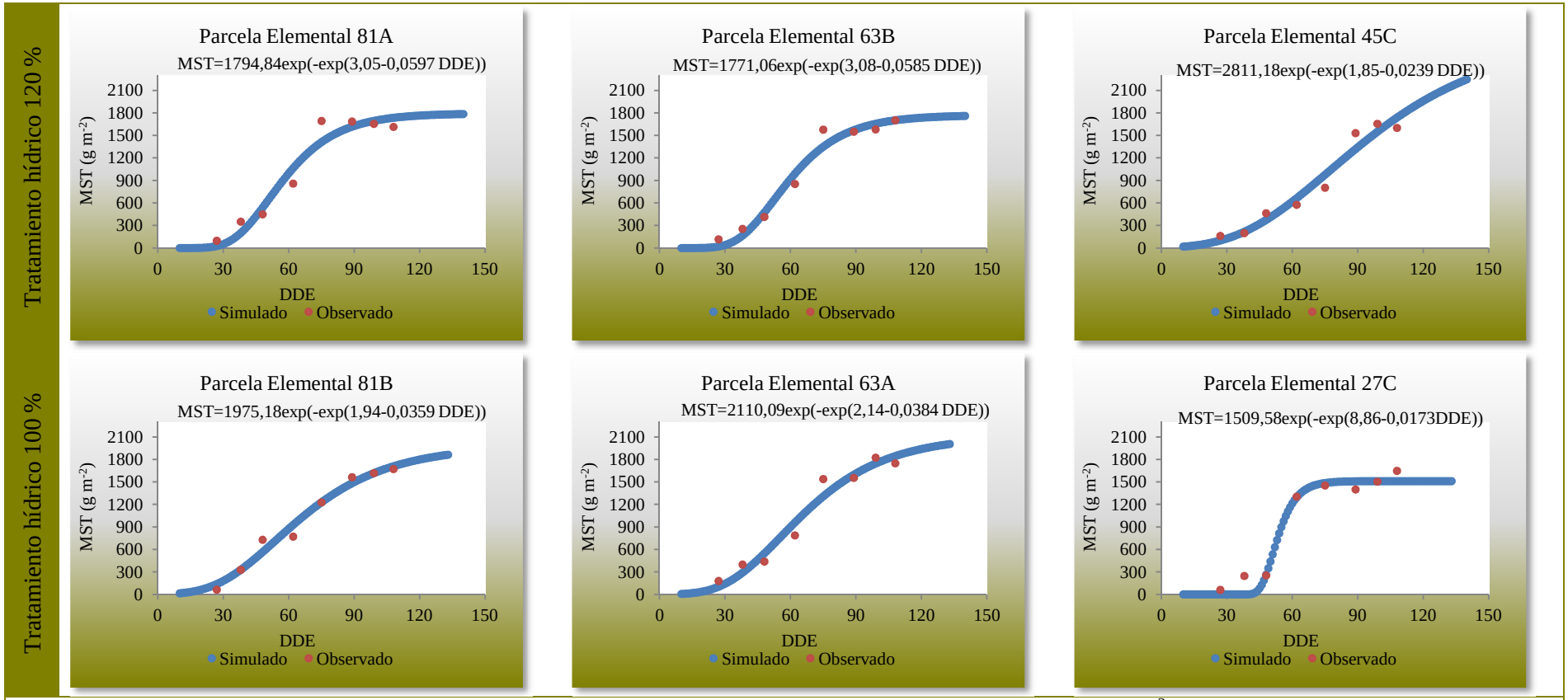


Figura 32: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2011.

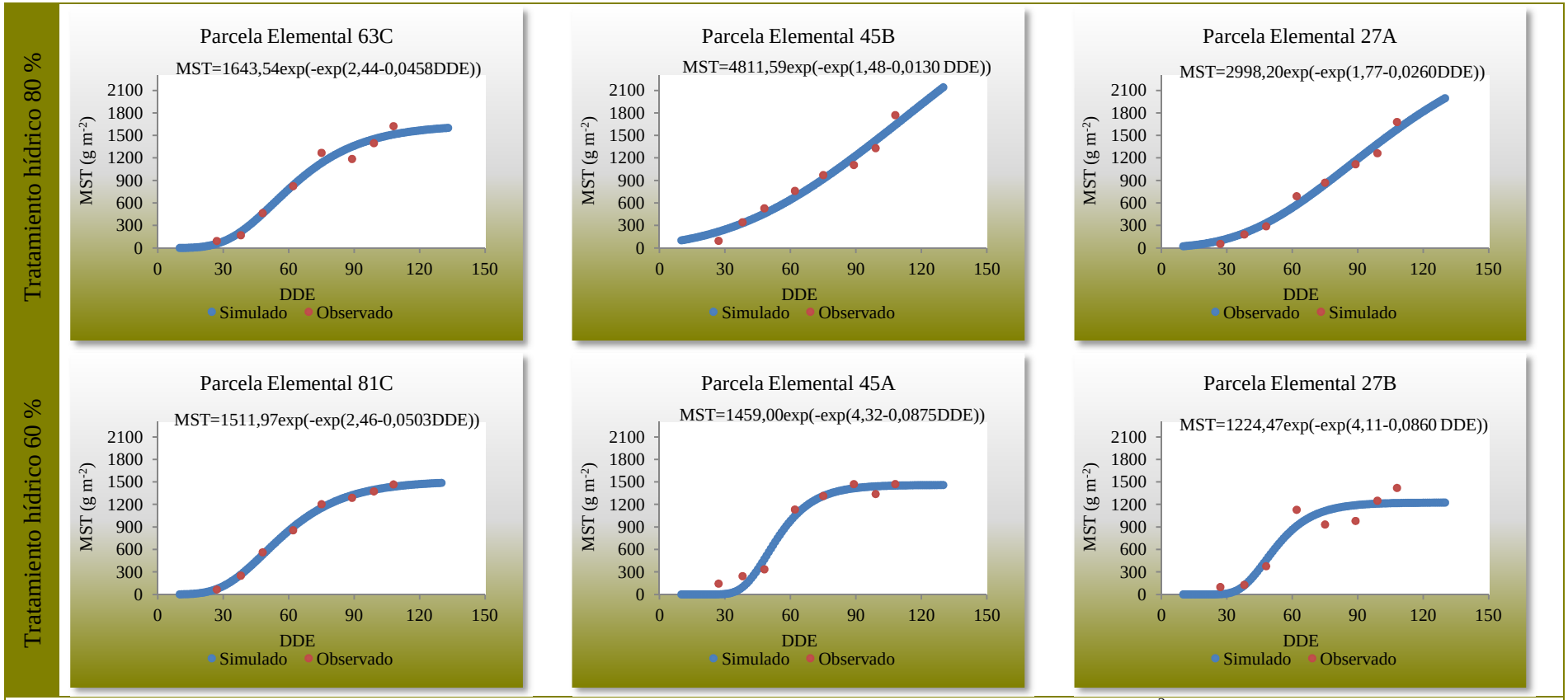


Figura 33: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2011.

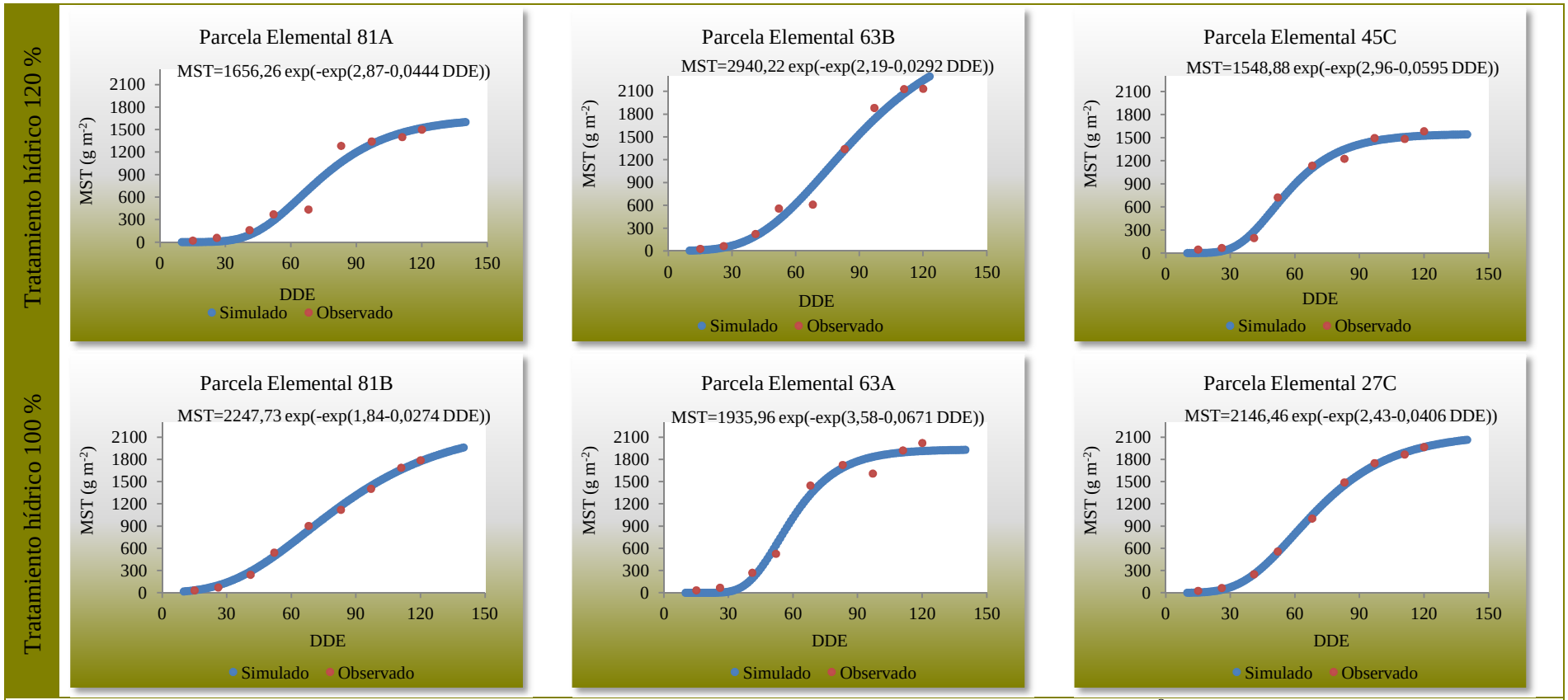


Figura 34: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2012.

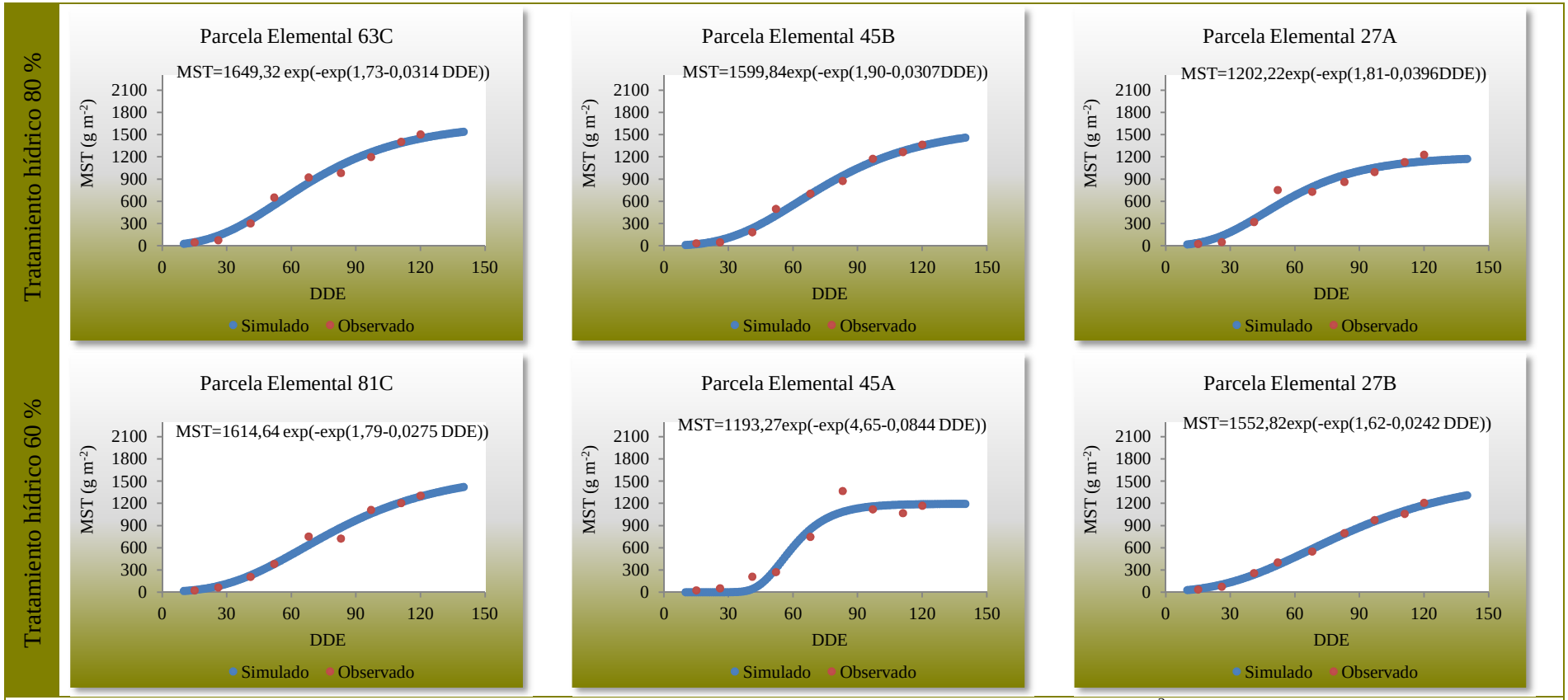


Figura 35: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores de materia seca total (MST, g m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo Gompertz, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2012.

En las tablas 48 y 49 se recogen los valores promedios de los datos medidos de la materia seca total a lo largo del ciclo agronómico del cultivo de la patata en los años 2011 y 2012, respectivamente. El análisis de varianza realizado sobre estos datos demuestra la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos hídricos a partir del día 89 desde la emergencia (DDE) en 2011 y 52 DDE en 2012.

En la primera campaña, el cultivo se encontraba en el momento de la diferenciación en el inicio de la senescencia. A los 89 DDE el tratamiento de 80 % presentaba el menor valor de MST (1136,9 g m^{-2}), estadísticamente diferenciado de los demás tratamientos (Tabla 48), sin embargo, a los 99 DDE el tratamiento de 80 % alcanza los valores de MST del tratamiento más deficitario (1330,5 g m^{-2} *vs* 1320,0 g m^{-2}), llegando a superarlo a los 108 DDE (1691,9 g m^{-2} *vs* 1451,5 g m^{-2}), hasta el punto de no presentar diferenciación con los máximos alcanzados por los tratamientos de 100 y 120 %.

En el segundo año de estudio, la diferenciación del tratamiento de 60 % con el resto empezó a notarse en el momento en que se acercaba el final de la floración (52 DDE) (Tabla 49), sin embargo, a partir de los 68 DDE el tratamiento de 80 % ya presentaba diferenciación significativa entre los tratamientos, lo que más adelante (83 DDE) formó dos grupos con diferencias bastante claras entre los tratamientos que aportaban más agua (100 y 120 %) y los más deficitarios (80 y 60 %). Las diferencias encontradas se mantuvieron hasta al final del ciclo, donde la MST de los tratamientos más deficitarios representó el 70 % de la MST de los tratamientos no deficitarios.

Los valores medidos para ambos años reflejan que el incremento en la dotación hídrica provocó mayor acumulación de la MST. Este hecho se ha puesto de manifestó en las experiencias de diversos autores (Jefferies, 1993; Singh *et al*., 1993; Fabeiro *et al*., 2001; Kashyap y Panda, 2003; Lahlou y Ledent, 2005; Fleisher *et al*., 2008). En general, los mismos tratamientos acumularon más materia seca, sin embargo, el tratamiento de 80 % constituye una excepción. Estas diferencias anuales se deben a las distintas condiciones climáticas del segundo año, derivadas de las altas temperaturas producidas a partir del inicio de la tuberización.

Resulta que, en condiciones adecuadas de temperatura y fotoperiodo, en 2011, la inducción de un moderado estrés hídrico incluso aumentó la producción de MST en el cultivo de la patata, pero la inducción del tratamiento deficitario combinado con las altas temperatura producidas en 2012, disminuyó la acumulación de la MST en los tratamientos más deficitarios.

Kooman *et al.* (1996a) comentan que el crecimiento de la hoja es el principal factor que contribuye en la acumulación diaria de materia seca por el cultivo, y, puesto que las altas temperaturas influenciaron negativamente el desarrollo de las hojas de los tratamientos más deficitarios. Este comportamiento se observa claramente en el año 2012, donde al analizar los bajos resultados de acumulación de MST en el tratamiento de 80 %.

Tabla 48: Análisis estadístico de la evolución de la materia seca total (g m^{-2}) del cultivo de la patata en el año 2011.

Tratamiento	2011 DDE							
	27	38	48	62	75	89	99	108
120%	125,1 a	268,4 a	442,5 a	763,0 a	1358,1 a	1589,2 a	1630,1 a	1639,6 a
100%	100,1 a	323,6 a	472,3 a	952,8 a	1404,9 a	1504,6 ab	1651,6 a	1687,8 a
80%	82,1 a	231,9 a	427,8 a	759,2 a	1037,5 a	1136,9 c	1330,5 b	1691,9 a
60%	102,2 a	206,7 a	423,5 a	1037,9 a	1148,2 a	1245,3 b	1320,0 b	1451,5 b
p valor	ns	ns	ns	ns	ns	*	**	**

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Tabla 49: Análisis estadístico de la evolución de la materia seca total (g m^{-2}) del cultivo de la patata en el año 2012.

Tratamiento	2012 DDE								
	15	26	41	52	68	83	97	111	120
120%	30,1 a	61,1 a	191,7 a	582,5 a	925,5 a	1281,9 a	1571,6 a	1703,1 a	1739,8 a
100%	30,7 a	68,1 a	254,6 a	541,9 a	1018,0a	1445,3 a	1587,9 a	1825,7 a	1925,8 a
80%	35,1 a	57,5 a	269,2 a	634,7 a	785,3 ab	906,8 b	1123,2 b	1266,4 b	1366,5 b
60%	28,2 a	63,1 a	224,5 a	351,3 b	652,0 b	828,4 b	1067,3 b	1042,3 b	1225,1 b
p valor	ns	ns	ns	*	*	*	*	**	**

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Las curvas de regresión promedio de cada tratamiento, para ambos años, reflejan los mismos momentos de diferenciación y los máximos valores de MST alcanzados en cada tratamiento, como se indicó anteriormente (Fig. 36). En 2011, la MST de los tratamientos de 60, 100 y 120 % va incrementando a lo largo de los DDE hasta estabilizarse alrededor de los 85 DDE, mientras que el tratamiento de 80 % demuestra una ascensión pronunciada.

Para la segunda campaña, la figura 36 muestra un perfil semejante en todos los tratamientos, presentando un incremento de la MST hasta los 80 DDE, y a partir de esto una tendencia a la estabilización, exhibiendo dos grupos bastante diferenciados (120 y 100 % *vs* 80 y 60 %).

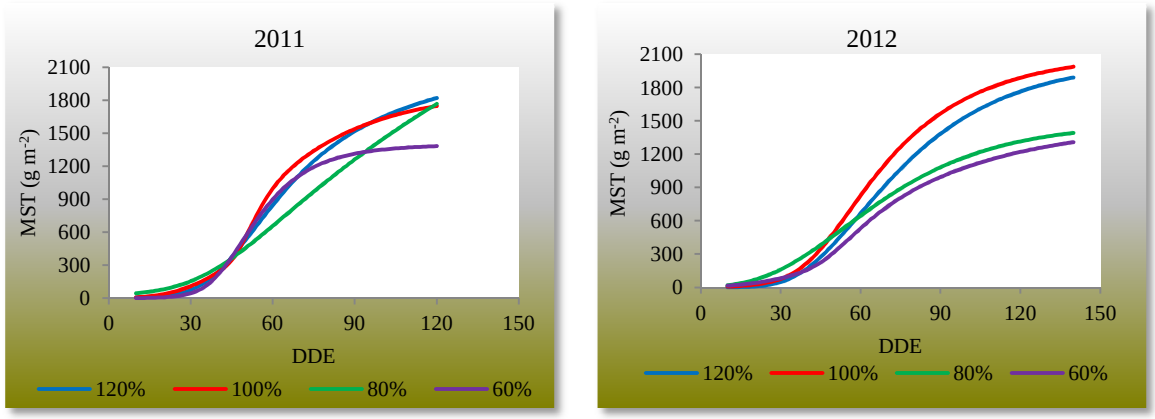


Figura 36: Evolución de la materia seca total acumulada promedia por tratamiento en el año 2011 y 2012.

5.5.4.2 Reparto de la materia seca en los distintos órganos de la planta.

En las figuras 37 y 38 se muestra para cada tratamiento en los dos años ensayados, en forma de histogramas, la contribución porcentual de la materia seca de cada órgano en el total de la planta.

Como se observa en estas figuras, el crecimiento de los órganos aéreos (hojas y tallos) supone una gran porción del incremento de la materia seca en la fase inicial del crecimiento. Hasta el inicio de la tuberización, el porcentaje de materia seca aérea del cultivo, como media para todos los tratamientos, fue alrededor de 66 %, en 2011, y 68 %, en 2012.

A partir de la tuberización, la acumulación de materia seca en los tubérculos empieza a suponer una parte significativa del peso total de la planta. Con el avance en el tiempo el desarrollo de los tubérculos es rápido y creciente, a la vez que se presenta un descenso en la materia seca de los órganos aéreos. Este mecanismo representa la translocación de los fotoasimilados para el llenado del tubérculo (Geremew *et al.*, 2007).

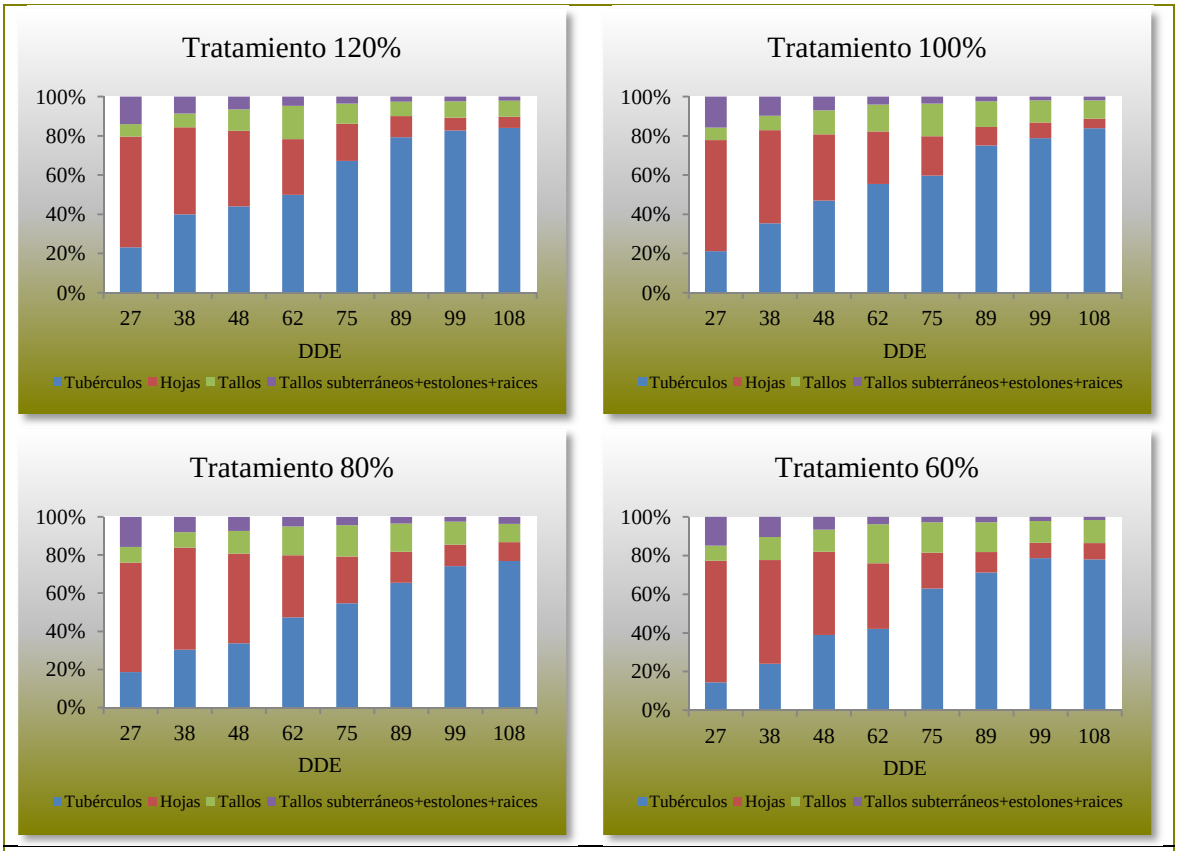


Figura 37: Reparto porcentual de la materia seca entre los órganos, de los cuatro tratamientos hídricos durante el año 2011.

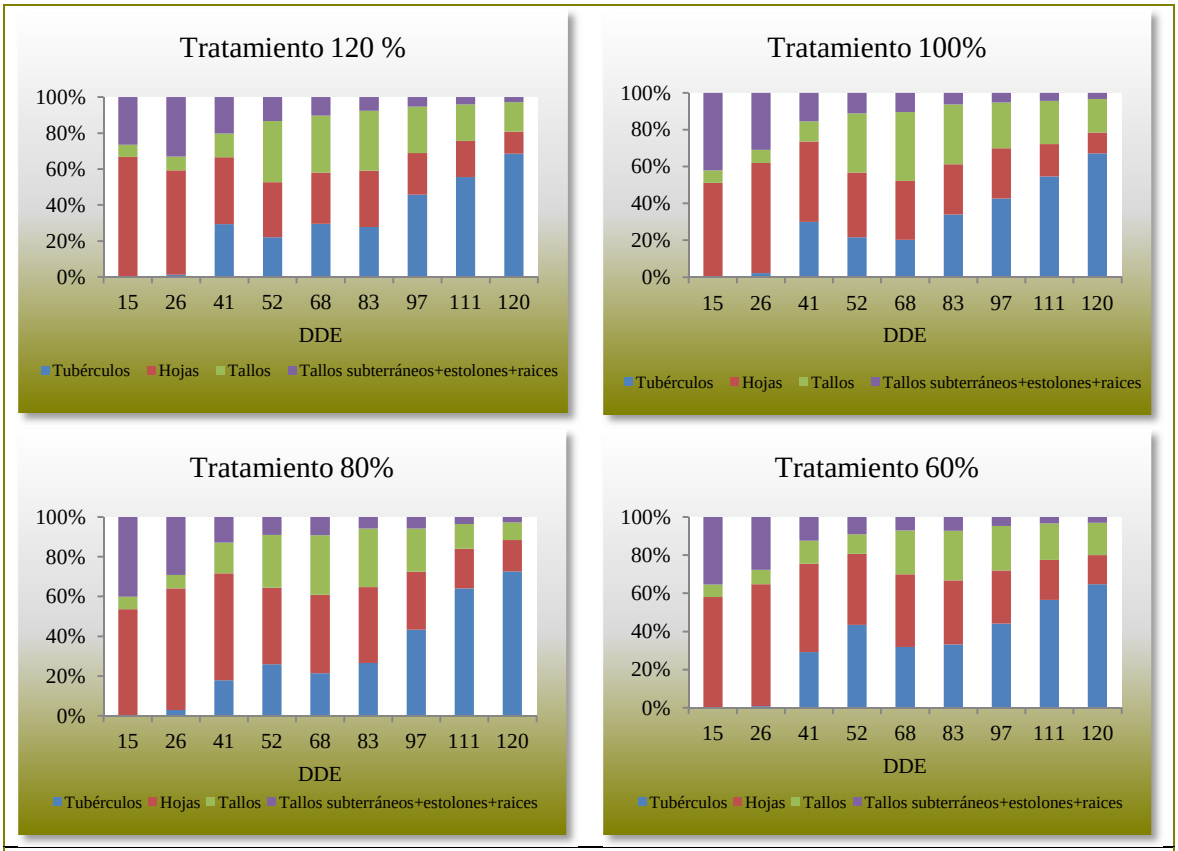


Figura 38: Reparto porcentual de la materia seca entre los órganos, de los cuatro tratamientos hídricos durante el año 2012.

Geremew *et al.* (2007) evaluando la partición de la MST en cuatro variedades de patata, observaron que a los 58 días desde la siembra, la materia seca aérea variaba entre 49,6 y 58,9 % y la materia seca de los tubérculos entre 0,8 y 1,7 % de la MST, y a los 101 desde la plantación la materia seca aérea se encontraba alrededor de los 15 % y la de los tubérculos entre 70,6 y 72,3 %.

En comparación con la campaña anterior, el año 2012 presentó menores valores de materia seca acumulada en el tubérculo. Dichos resultados se deben a la influencia de las altas temperaturas nocturnas registradas en esta campaña (Fig. 39). A partir de la tuberización, en 2011, las máximas nocturnas permanecieron 30 días por debajo de los 25 ºC, mientras que en 2012, las máximas nocturnas ya superaban los 25 ºC desde antes del inicio de la tuberización. La temperatura máxima nocturna alcanzadas en 2011 fue de 32,4 ºC frente a 36,7 ºC en 2012.

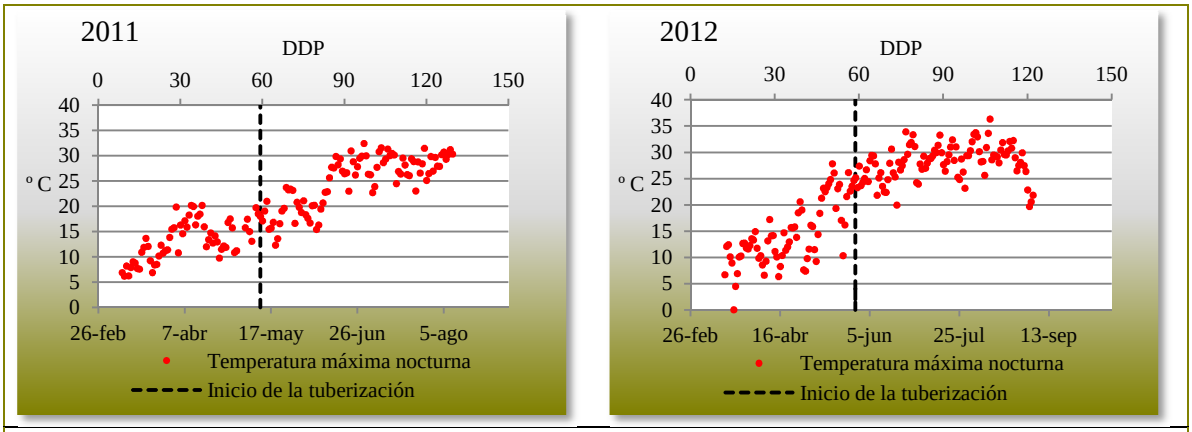


Figura 39: Temperaturas máximas nocturnas registradas en los años 2011 y 2012.

Lafta y Lorenzen (1995) afirman que las altas temperaturas nocturnas provocan una disminución de la materia seca del tubérculo, por provocar una reducción en las actividades de las enzimas sintetizadoras de carbohidratos (SPS y Suc-6-P). Dichas enzimas están directamente implicadas en las relaciones fuente-sumidero en las plantas de patata (Huber y Huber, 1992). Además, la actividad de estas enzimas se redujo en hojas maduras de plantas sometidas al estrés hídrico, dificultando la translocación de los carbohidratos para los tubérculos (Lafta y Lorenzen, 1995).

Steduto *et al.* (2012) afirman que para el crecimiento máximo del tubérculo, las temperaturas nocturnas óptimas no deben sobrepasar los 18 ºC, aunque el efecto final sobre el cultivo dependerá de las temperaturas alcanzadas, el material vegetal y las técnicas de cultivo.

El retraso del inicio de la tuberización en la segunda campaña (a los 27 DDE, en 2011 y a los 41 DDE, en 2012), podría ser explicadas por las altas temperaturas nocturnas. Slater (1968) analizando el efecto de las altas temperaturas nocturnas en el inicio de la tuberización, observó que las plantas de patata cultivadas con temperaturas nocturnas de 12 ºC empezaron la tuberización una semana más temprano de las cultivadas con 22 ºC.

5.5.4.3 Evolución del índice del área foliar

Para explicar la evolución del índice de área foliar (IAF) a lo largo del ciclo agronómico, se hizo una análisis de regresión con los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado. En las tablas 50 a 53, se recogen los resultados del análisis estadístico, obtenidos en los años 2011 y 2012, de los cuatro modelos

inicialmente propuestos, que describen la evolución del IAF en los distintos tratamientos hídricos aplicados.

La selección del modelo siguió el mismo criterio utilizado en la selección del modelo que describe la evolución de la MST. El modelo expopolinomial de 2º grado fue el único que se mostró estadísticamente significativo en las doce parcelas de estudio, en los dos años ensayados. De esta forma, se optó por seleccionar este modelo que mejor representa los datos simulados frente a lo observado, y además, presenta elevados coeficientes de determinación (entre 74,1 y 98,4 %, en 2011, y 80,2 y 98,5 %, en 2012).

Diversos autores también utilizaron el modelo expopolinomial para describir la evolución del IAF, tales como, Fabeiro (1995) con soja; Teruel *et al*. (1997) con caña de azúcar; Botella *et al*. (1997) con Girasol; Aguiar-Netto *et al*. (2000) y Grimm (2007) con patata.

En relación a la contrastación de la validez del modelo, la hipótesis de normalidad, mediante el estadístico de *Kolmogorov-Smirnov* se cumple en todas las parcelas experimentales para ambas campañas, y en 75 % de las parcelas, también se cumplen las hipótesis de independencia (estadístico de *Durbin-Watson*) y homocedasticidad (correlación de *Spearman*).

La representación gráfica del análisis de regresión en las doce parcelas ensayadas, que muestran los datos observados del IAF frente a los simulados en función de los DDE, se expresan en las figuras 40 y 41 para el año 2011 y, 42 y 43 para el año 2011.

Analizando las gráficas de la evolución, se observa que el modelo elegido fue capaz de simular los máximos valores alcanzados del IAF observado en todos los tratamientos hídricos. Incluso en casos puntuales de parcela elemental que presentó valores máximos más bajos debido el tratamiento deficitario aplicado.

Tabla 50: Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 120 %, para los dos años de estudio.

Trat.	Parcela	Modelo	Función	Año experimental 2011						Año experimental 2012					
				R^2	p	p par		KS	D	Se	R^2	p	p par		KS	D	Se
Tratamiento hídrico 120 %	81A	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,741	*	a=0,091 b=0,044 c=0,043	ns * *	sí	sí	sí	0,802	**	a=0,063 b=0,022 c=0,022	ns * *	sí	no	no
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,820	ns	a=0,561 b=0,417 c=0,273 d=0,200	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,802	*	a=0,479 b=0,531 c=0,718 d=0,916	ns ns ns ns	sí	no	no
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2	0,636	ns	a=0,123 b=0,033 c=0,036	ns * *	Sí	no	sí	0,630	ns	a=0,126 b=0,028 c=0,045	ns * *	no	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,639	ns	a=0,750 b=0,778 c=0,984 d=0,774	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,727	ns	a=0,957 b=0,780 c=0,386 d=0,242	ns ns ns ns	sí	no	no
	63B	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,939	**	a=0,007 b=0,002 c=0,002	** ** **	sí	sí	sí	0,862	**	a=0,026 b=0,010 c=0,009	* * **	sí	no	sí
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,990	**	a=0,344 b=0,121 c=0,024 d=0,009	ns ns * **	sí	no	sí	0,916	**	a=0,879 b=0,643 c=0,228 d=0,104	ns ns ns ns	sí	no	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE^2	0,798	*	a=0,036 b=0,008 c=0,007	* ** **	sí	sí	sí	0,617	ns	a=0,149 b=0,039 c=0,067	ns * ns	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,803	ns	a=0,532 b=0,586 c=0,915 d=0,768	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,855	*	a=0,354 b=0,198 c=0,063 d=0,035	ns ns ns *	sí	no	sí
	45C	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,859	**	a=0,044 b=0,014 c=0,014	* * *	sí	no	sí	0,956	**	a=0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	no	no
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,936	**	a=0,356 b=0,269 c=0,136 d=0,083	ns ns ns ns	sí	no	no	0,969	**	a=0,904 b=0,397 c=0,090 d=0,033	ns ns ns *	sí	no	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE^2	0,740	*	a=0,117 b=0,023 c=0,017	ns * *	sí	no	sí	0,577	ns	a=0,194 b=0,031 c=0,029	ns * *	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,741	ns	a=0,499 b=0,471 c=0,677 d=0,919	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,577	ns	a=0,504 b=0,468 c=0,754 d=0,982	ns ns ns ns	sí	sí	sí

Trat: tratamiento; R^2: coeficiente de determinación; p: nivel de significación; p par: nivel de significación de parámetros del modelo; KS: normalidad mediante método de *Kolmogorov-Smirnov*; D: independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*; Se: homocedasticidad mediante correlación de *Sperarman*; ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Tabla 51: Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 100 %, para los dos años de estudio.

Trat.	Parcela	Modelo	Función	Año experimental 2011						Año experimental 2012					
				R^2	p	p par		KS	D	Se	R^2	p	p par		KS	D	Se
Tratamiento hídrico 100 %	81B	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,824	*	a=0,081 b=0,022 c=0,021	ns * *	sí	no	no	0,943	**	a=0,005 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,825	ns	a=0,737 b=0,786 c=0,951 d=0,718	ns ns ns ns	sí	no	no	0,963	**	a=0,032 b=0,031 c=0,061 d=0,135	* * ns ns	sí	no	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2	0,786	*	a=0,046 b=0,010 c=0,008	* * **	sí	no	sí	0,747	*	a=0,052 b=0,006 c=0,008	ns ** **	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,802	ns	a=0,221 b=0,225 c=0,382 d=0,604	ns ns ns ns	no	no	sí	0,792	*	a=0,642 b=0,747 c=0,647 d=0,350	ns ns ns ns	sí	sí	sí
	63A	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,873	**	a=0,094 b=0,011 c=0,009	ns * **	sí	no	sí	0,889	**	a=0,020 b=0,004 c=0,004	* ** **	sí	sí	sí
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,884	*	a=0,836 b=0,754 c=0,912 d=0,609	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,979	**	a=0,002 b=0,002 c=0,003 d=0,005	** ** ** **	sí	sí	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE^2	0,895	**	a=0,072 b=0,004 c=0,002	ns ** **	sí	no	sí	0,661	*	a=0,097 b=0,017 c=0,023	ns * *	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,901	*	a=0,281 b=0,188 c=0,352 d=0,649	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,701	ns	a=0,717 b=0,820 c=0,702 d=0,453	ns ns ns ns	sí	sí	sí
	27C	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,944	**	a=0,005 b=0,002 c=0,002	** ** **	sí	no	sí	0,951	**	a=0,003 b=0,001 c=0,001	** ** **	sí	sí	sí
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,946	**	a=0,176 b=0,215 c=0,379 d=0,646	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,985	**	a=0,881 b=0,249 c=0,270 d=0,008	ns ns * **	sí	sí	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE^2	0,731	*	a=0,048 b=0,015 c=0,014	* * *	sí	sí	no	0,665	*	a=0,087 b=0,014 c=0,014	ns * *	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,735	ns	a=0,631 b=0,717 c=0,974 d=0,714	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,734	ns	a=0,833 b=0,966 c=0,550 d=0,312	ns ns ns ns	sí	sí	no

Trat: tratamiento; R^2: coeficiente de determinación; p: nivel de significación; p par: nivel de significación de parámetros del modelo; KS: normalidad mediante método de *Kolmogorov-Smirnov*; D: independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*; Se: homocedasticidad mediante correlación de *Sperarman*; ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Tabla 52: Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 80 %, para los dos años de estudio.

Trat.	Parcela	Modelo	Función	Año experimental 2011						Año experimental 2012					
				R^2	p	p par		KS	D	Se	R^2	p	p par		KS	D	Se
Tratamiento hídrico 80 %	63C	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,786	*	a=0,076 b=0,028 c=0,027	ns * *	sí	no	sí	0,985	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	no
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,788	ns	a=0,713 b=0,802 c=0,954 d=0,738	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,992	**	a=0,196 b=0,648 c=0,266 d=0,042	ns ns ns *	no	no	no
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2	0,646	ns	a=0,125 b=0,034 c=0,030	ns * *	sí	no	sí	0,666	*	a=0,140 b=0,016 c=0,014	ns * *	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,681	ns	a=0,274 b=0,268 c=0,391 d=0,545	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,673	ns	a=0,313 b=0,267 c=0,498 d=0,773	ns ns ns ns	sí	sí	sí
	45B	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,943	**	a=0,010 b=0,002 c=0,002	* ** **	sí	no	sí	0,940	**	a=0,004 b=0,001 c=0,001	** ** **	sí	no	sí
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,960	**	a=0,705 b=0,847 c=0,611 d=0,291	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,940	**	a=0,144 b=0,217 c=0,542 d=0,948	ns ns ns ns	sí	no	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE^2	0,862	**	a=0,034 b=0,005 c=0,003	* ** **	sí	sí	sí	0,886	**	a=0,016 b<0,001 c<0,001	* ** **	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,887	*	a=0,127 b=0,114 c=0,216 d=0,411	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,891	**	a=0,256 b=0,204 c=0,739 d=0,628	ns ns ns ns	sí	sí	sí
	27A	Exp. Pol. 2º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)	0,912	**	a=0,015 b=0,004 c=0,003	* ** **	sí	no	no	0,863	**	a=0,032 b=0,008 c=0,007	* ** **	sí	sí	sí
		Exp. Pol. 3º	IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)	0,912	*	a=0,287 b=0,328 c=0,577 d=0,902	ns ns ns ns	sí	no	no	0,919	**	a=0,065 b=0,058 c=0,090 d=0,157	ns ns ns ns	sí	no	sí
		Pol. 2º	IAF=a+b.DDE+c.DDE^2	0,897	**	a=0,006 b=0,001 c=0,001	** ** **	sí	no	sí	0,770	*	a=0,073 b=0,004 c=0,004	ns ** **	sí	sí	sí
		Pol. 3º	IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3	0,916	*	a=0,413 b=0,539 c=0,855 d=0,418	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,776	*	a=0,215 b=0,161 c=0,389 d=0,728	ns ns ns ns	sí	sí	sí

Trat: tratamiento; R^2: coeficiente de determinación; p: nivel de significación; p par: nivel de significación de parámetros del modelo; KS: normalidad mediante método de *Kolmogorov-Smirnov*; D: independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*; Se: homocedasticidad mediante correlación de *Sperarman*; ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Tabla 53: Descripción de los parámetros estadísticos de los modelos expopolinomiales y polinomiales de segundo y tercer grado que describen las relaciones entre el índice de área foliar y los días desde la emergencia, en las parcelas de ensayo del tratamientos de 60 %, para los dos años de estudio.

Trat.	Parcela	Modelo	Función	Año experimental 2011						Año experimental 2012					
				R^2	p	p par		KS	D	Se	R^2	p	p par		KS	D	Se
Tratamiento hídrico 60 %	81C	Exp. Pol. 2º	$IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)$	0,900	**	a=0,041 b=0,009 c=0,008	* ** **	sí	no	sí	0,896	**	a=0,012 b=0,003 c=0,003	* ** **	sí	no	no
		Exp. Pol. 3º	$IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)$	0,905	*	a=0,700 b=0,742 c=0,913 d=0,613	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,924	**	a=0,066 b=0,069 c=0,104 d=0,203	ns ns ns ns	sí	no	sí
		Pol. 2º	$IAF=a+b.DDE+c.DDE2$	0,721	*	a=0,227 b=0,039 c=0,027	ns * *	sí	sí	sí	0,764	*	a=0,056 b=0,005 c=0,006	ns ** **	sí	sí	sí
		Pol. 3º	$IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3$	0,860	*	a=0,067 b=0,051 c=0,074 d=0,117	ns ns ns ns	sí	no	sí	0,780	*	a=0,506 b=0,506 c=0,941 d=0,559	ns ns ns ns	sí	sí	sí
	45A	Exp. Pol. 2º	$IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)$	0,941	**	a=0,008 b=0,002 c=0,002	** ** **	sí	no	sí	0,894	**	a=0,011 b=0,006 c=0,006	* ** **	sí	sí	sí
		Exp. Pol. 3º	$IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)$	0,961	**	a=0,758 b=0,962 c=0,485 d=0,216	ns ns ns ns	sí	no	no	0,952	**	a=0,981 b=0,211 c=0,046 d=0,020	ns ns * *	sí	no	sí
		Pol. 2º	$IAF=a+b.DDE+c.DDE^2$	0,842	*	a=0,023 b=0,005 c=0,004	* ** **	sí	sí	sí	0,553	ns	a=0,166 b=0,040 c=0,053	ns * ns	sí	no	sí
		Pol. 3º	$IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3$	0,848	*	a=0,500 b=0,545 c=0,926 d=0,707	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,831	*	a=0,327 b=0,196 c=0,065 d=0,035	ns ns ns *	sí	no	sí
	27B	Exp. Pol. 2º	$IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2)$	0,984	**	a<0,001 b<0,001 c<0,001	** ** **	sí	sí	sí	0,818	**	a=0,032 b=0,015 c=0,018	* * *	sí	sí	sí
		Exp. Pol. 3º	$IAF=exp(a+b.DDE+c.DDE^2+d.DDE^3)$	0,984	**	a=0,070 b=0,106 c=0,349 d=0,949	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,877	*	a=0,084 b=0,095 c=0,149 d=0,222	ns ns ns ns	sí	no	no
		Pol. 2º	$IAF=a+b.DDE+c.DDE^2$	0,824	*	a=0,027 b=0,006 c=0,005	* ** **	sí	sí	sí	0,863	**	a=0,047 b=0,002 c=0,005	* ** **	sí	sí	sí
		Pol. 3º	$IAF=a+b.DDE+c.DDE2+d.DDE^3$	0,825	ns	a=0,303 b=0,331 c=0,580 d=0,894	ns ns ns ns	sí	sí	sí	0,863	*	a=0,306 b=0,233 c=0,708 d=0,885	ns ns ns ns	sí	sí	sí

Trat: tratamiento; R^2: coeficiente de determinación; p: nivel de significación; p par: nivel de significación de parámetros del modelo; KS: normalidad mediante método de *Kolmogorov-Smirnov*; D: independencia mediante estadístico de *Durbin-Watson*; Se: homocedasticidad mediante correlación de *Sperarman*; ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

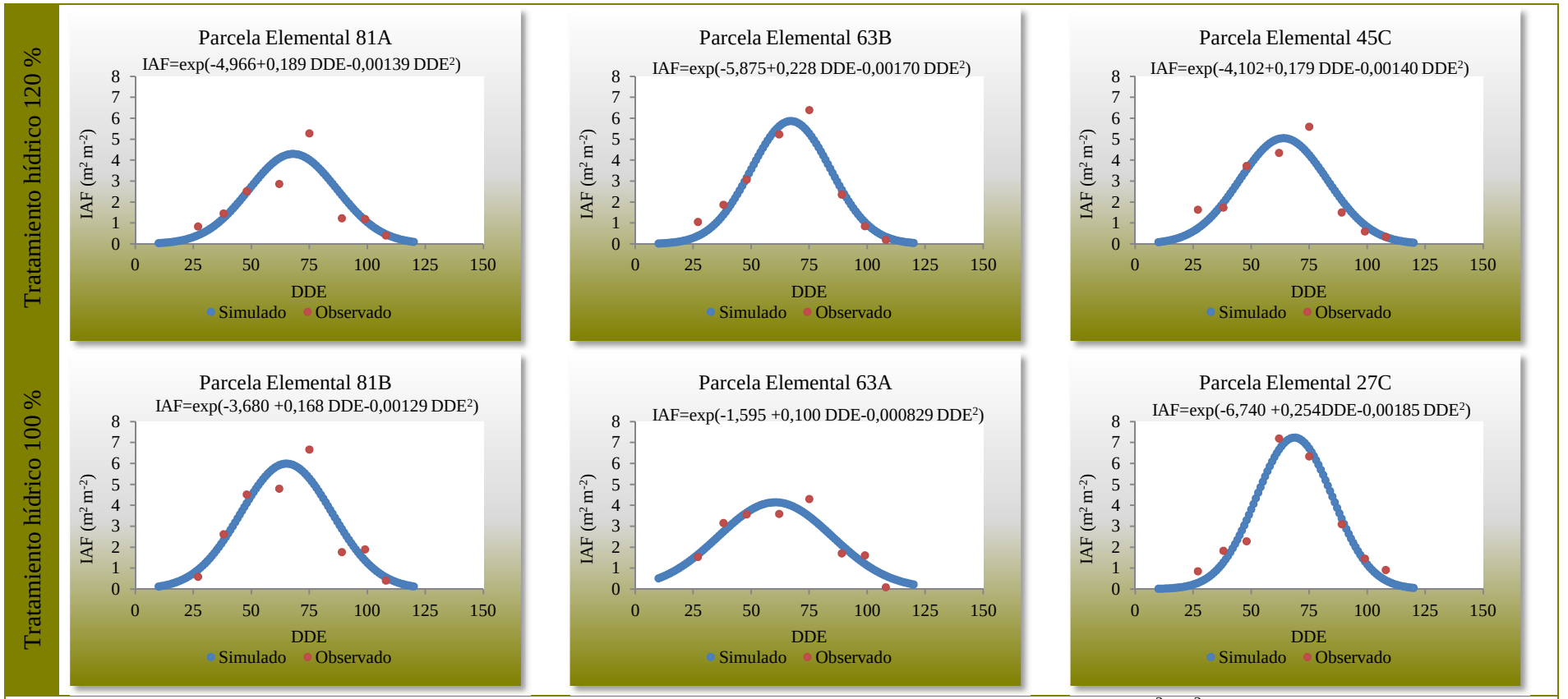


Figura 40: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2011.

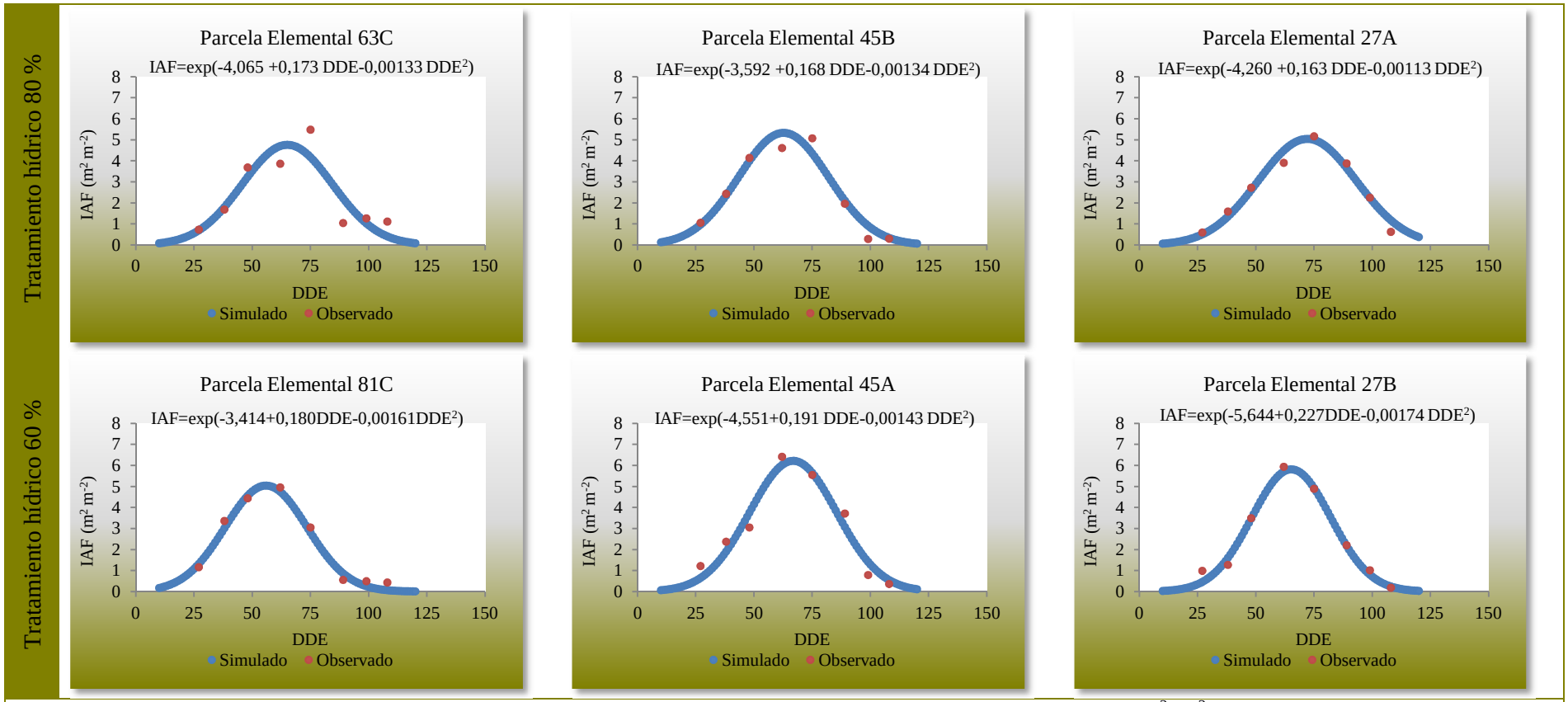


Figura 41: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2011.

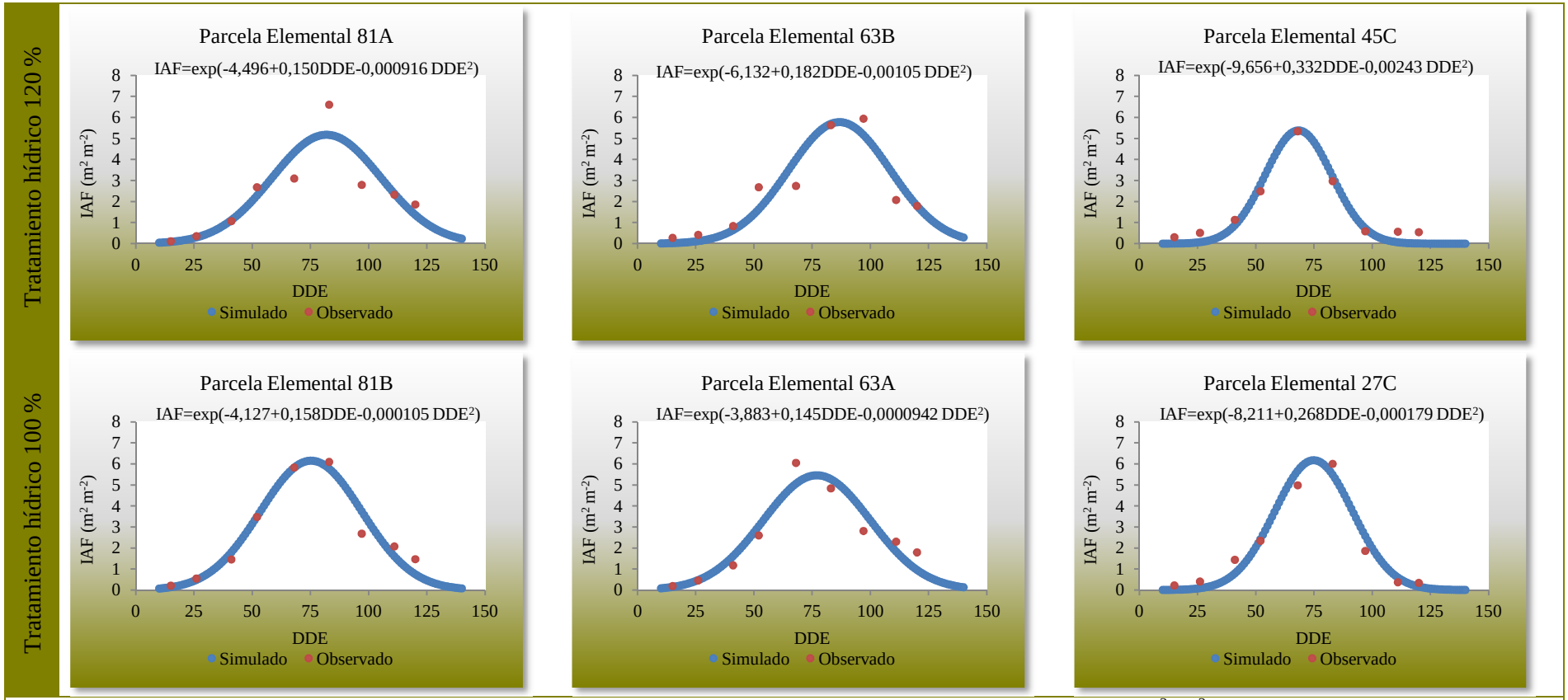


Figura 42: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 120 y 100 % en el año 2012.

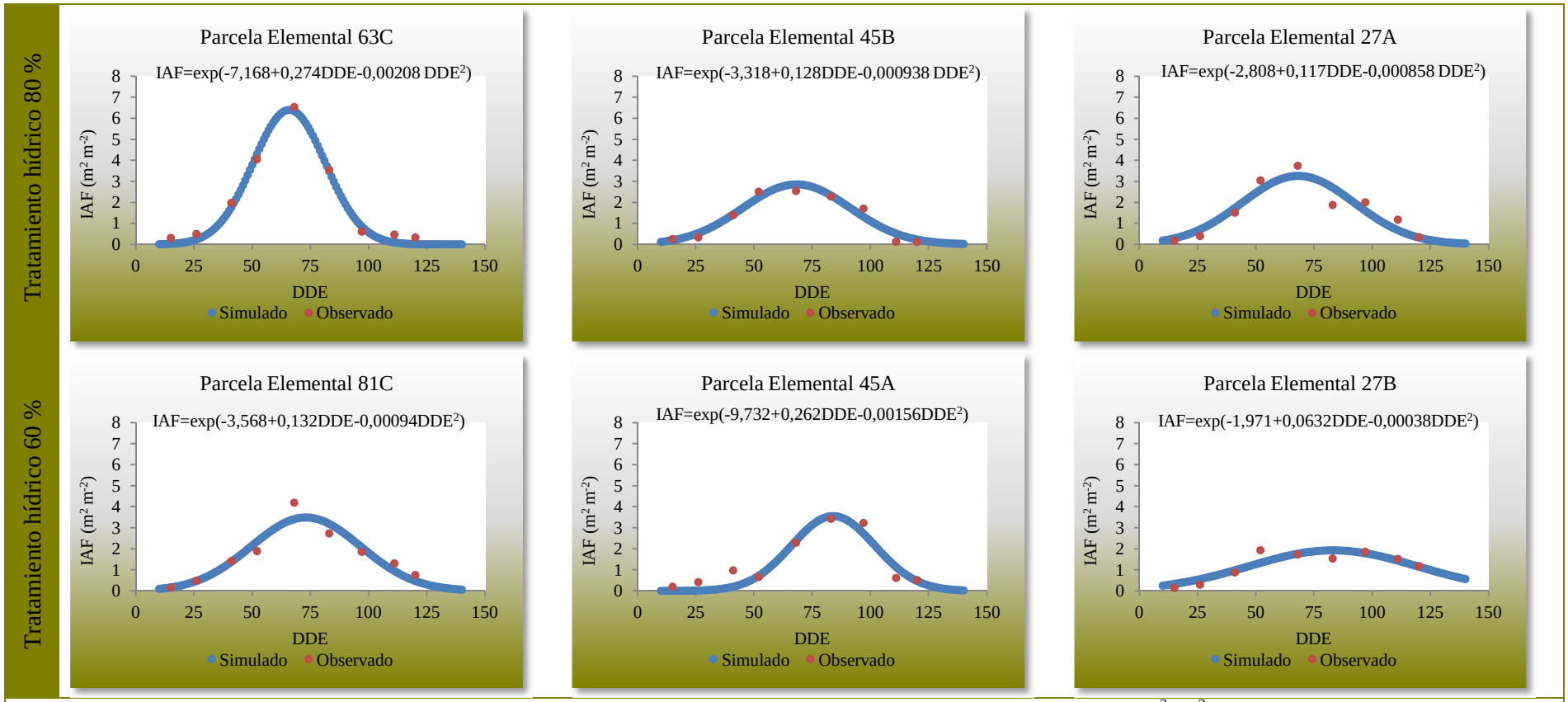


Figura 43: Evolución en el tiempo (DDE, días desde la emergencia) de los valores del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) observados frente a los simulados con el modelo expopolinomial de segundo grado, de los tratamientos de 80 y 60 % en el año 2012.

En las tablas 54 y 55 se recogen los resultados obtenidos, en los años 2011 y 2012, de los valores medios medidos del IAF para los distintos tratamientos hídricos. Estas tablas incluyen los análisis de varianza realizados en cada muestreo a lo largo del ciclo agronómico y su nivel de significación estadística.

De estos resultados se observa que, en 2011, la diferencia entre la aportación hídrica entre los tratamientos no tuvo efecto sobre el IAF (Tabla 54). A los 75 DDE (momento que se finaliza la floración e inicia la senescencia) se obtiene el máximo valor de IAF para los tratamientos de 120, 100 y 80 %, sin embargo, en el tratamiento más deficitario (60 %) se aprecia un adelantamiento del máximo valor de este índice (a los 62 DDE). Al igual que en el trabajo de Aguiar-Netto *et al.* (2000) el IAF aumenta, alcanzando un valor máximo cerca del final de la floración y decrece con la senescencia de las hojas.

La consecuencia de que el IAF no muestre diferencias con respecto a los tratamientos puede ser debido a que la lluvia efectiva ha sido especialmente elevada en las etapas iniciales. Hasta el inicio de la diferenciación de los tratamientos (41 DDE y doce días después del inicio de la floración y tuberización), la precipitación efectiva acumulaba 100,6 mm de los 127,8 mm totales del ciclo (Tabla 37).

En la segunda campaña, la diferenciación hídrica empezó a los 20 DDE (cinco días antes del inicio de la floración y tuberización), y hasta estas fechas la lluvia afectiva sumaba 75,0 mm de los 104,3 mm totales del ciclo, y por ello, a partir de los 41 DDE (momento en la floración y tuberización) las diferencias entre los tratamientos se hicieron significativas (Tabla 55). El adelantamiento del máximo valor de IAF en los tratamientos más deficitarios, también se notó en 2012 ($IAF_{máx}$ a los 83 DDE para los tratamientos de 120 y 100 %, y a los 68 DDE para 80 y 60 %).

Los valores máximos de IAF encontrados en 2011 estaban comprendidos entre 5,2 m^2 m^{-2} (tratamiento de 80 %) y 5,7 m^2 m^{-2} (tratamiento de 120, 100 y 60 %), y en 2012 entre 2,7 m^2 m^{-2} (tratamiento de 60 %) y 5,6 m^2 m^{-2} (tratamiento de 100 %). Otros investigadores, en distintas condiciones de ensayo, han obtenido valores de $IAF_{máx}$ próximos a los valores encontrados en este estudio.

Así, Aguiar-Netto *et al.* (2000) analizando el crecimiento de la variedad *Aracy* sometida a diferentes láminas de riego, obtuvo valores de IAF entre 2,0 y 4,0 m^2 m^{-2}, comprobando la reducción del crecimiento foliar en condiciones de estrés hídrico. Boyd *et al*. (2002) investigando la relación entre el IAF y el grado de cobertura alcanzaron valores de 4,8 a 5,7 m^2 m^{-2} en la variedad *Russet Burbank* y 4,0 a 5,0 m^2 m^{-2} en la variedad *Island Sunshine*. Liu *et al*. (2006), estudiando la respuesta fisiológica del cultivo a distinto manejo del agua de riego lograron valores de 4,2 m^2 m^{-2}.

Al final del ciclo del año 2012, el tratamiento de 120 % presentó el mayor valor de IAF (1,4 m^2 m^{-2}), diferenciando significativamente de los demás tratamientos. Resultados contrarios fueron encontrados por Liu *et al*. (2006) en que el tratamiento de mayor aporte hídrico presentó, en el final del ciclo, valores inferiores de IAF, aunque el tratamiento más deficitario haya mantenido índices más bajos a lo largo de la campaña.

Tabla 54: Análisis estadístico de la evolución del índice de área foliar (m^2 m^{-2}) del cultivo de la patata en el año 2011.

Tratamiento	2011 DDE							
	27	38	48	62	75	89	99	108
120%	1,2 a	1,7 a	3,1 a	4,1 a	5,7 a	1,7 a	0,8 a	0,3 a
100%	1,0 a	2,5 a	3,4 a	5,2 a	5,7 a	2,2 a	1,6 a	0,5 a
80%	0,8 a	1,9 a	3,5 a	4,1 a	5,2 a	2,3 a	1,3 a	0,7 a
60%	1,1 a	2,3 a	3,6 a	5,7 a	4,5 a	2,1 a	0,7 a	0,3 a
p valor	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo

Tabla 55: Análisis estadístico de la evolución del índice de área foliar (m^2 m^{-2}) para cultivo de la patata en el año 2012.

Tratamiento	2012 DDE								
	15	26	41	52	68	83	97	111	120
120%	0,2 a	0,4 a	1,0 a	2,6 a	3,7 a	5,1 a	3,1 a	1,6 a	1,4 a
100%	0,2 a	0,5 a	1,3 ab	2,8 a	5,6 a	5,6 a	2,4 a	1,6 a	1,2 ab
80%	0,2 a	0,4 a	1,6 b	3,2 a	4,3 ab	2,5 b	1,4 a	0,6 a	0,3 b
60%	0,2 a	0,4 a	1,1 a	1,4 b	2,7 b	2,5 b	2,3 a	1,1 a	0,8 b
p valor	ns	ns	*	*	*	**	ns	ns	*

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

En la figura 44 se han representado las curvas resultantes del análisis de regresión, realizadas a partir de los datos medios de IAF simulados mediante el modelo expopolinomial de segundo grado, para cada tratamiento hídrico, en los dos años ensayados.

De la observación de esta figura se desprende que el IAF, después de un período inicial, aumenta linealmente a lo largo del crecimiento vegetativo, floración y tuberización, hasta el inicio de la senescencia. A partir de la obtención del máximo valor, el IAF decrece por pérdida de las hojas hasta el final del ciclo, donde toma valores próximos a cero.

En el año 2012, el tratamiento de 100% alcanzó valores superiores a los demás tratamientos, y los tratamientos de 80 y 60 % valores inferiores a los del año anterior. La inferioridad del tratamiento de 80 % en relación al año anterior ya ha sido puesta de manifiesto en la acumulación de materia seca, debido a las diferentes condiciones ambientales en las que se desarrolló el cultivo durante el segundo año.

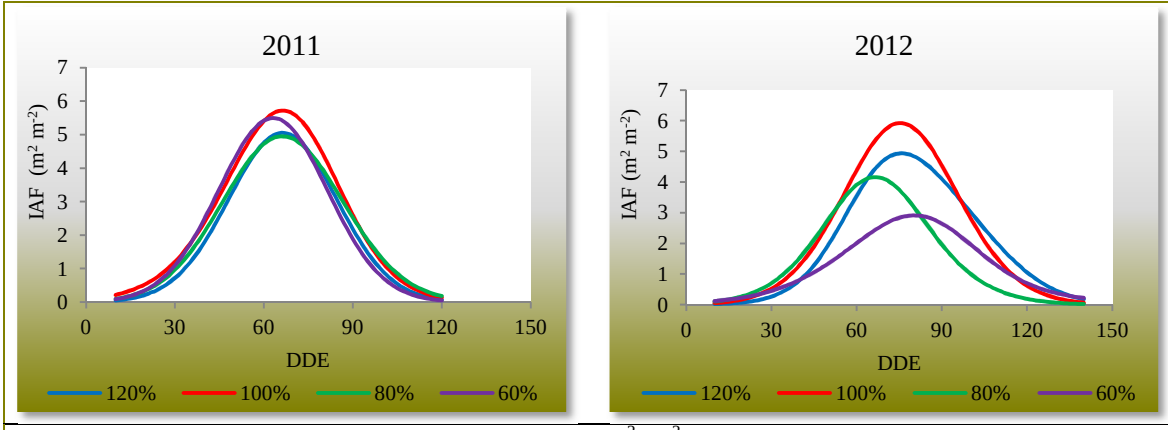


Figura 44: Evolución del índice de área foliar (IAF, m^2 m^{-2}) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

5.5.4.4 Duración del área foliar.

La duración del área foliar (DAF) es el índice de crecimiento relacionado con la expansión foliar. La terminología "duración" expresa una idea de tiempo vinculado a la actividad del área foliar. El DAF expresa en términos cuantitativos el tiempo durante el que la planta mantiene activa se superficie asimiladora (Aguiar-Netto *et al.*, 2000). Por eso, en esta Tesis Doctoral, se preserva la unidad completa de DAF (m^2 m^{-2} $día^{-1}$), enfatizando que, a pesar de ser un índice, la DAF representa el tamaño relativo del órgano fotosintético que permanece en la planta en relación al tiempo.

La DAF es importante porque considera todas las condiciones del sistema fotosintetizador: la velocidad de establecimiento, dimensiones y velocidad de regresión

(Botella *et al.*, 1997). En el trabajo, se ha calculado el índice de DAF acumulado a lo largo del ciclo mediante la integral del modelo expopolinomial de segundo grado elegido para modelar la evolución del IAF frente al tiempo (DDE).

La figura 45 corresponde a los resultados obtenidos, en los dos años de ensayo, para los cuatro tratamientos hídricos. Cabe destacar que los máximos valores de DAF, respecto a los tratamientos hídricos, acompañaron los mayores valores de IAF.

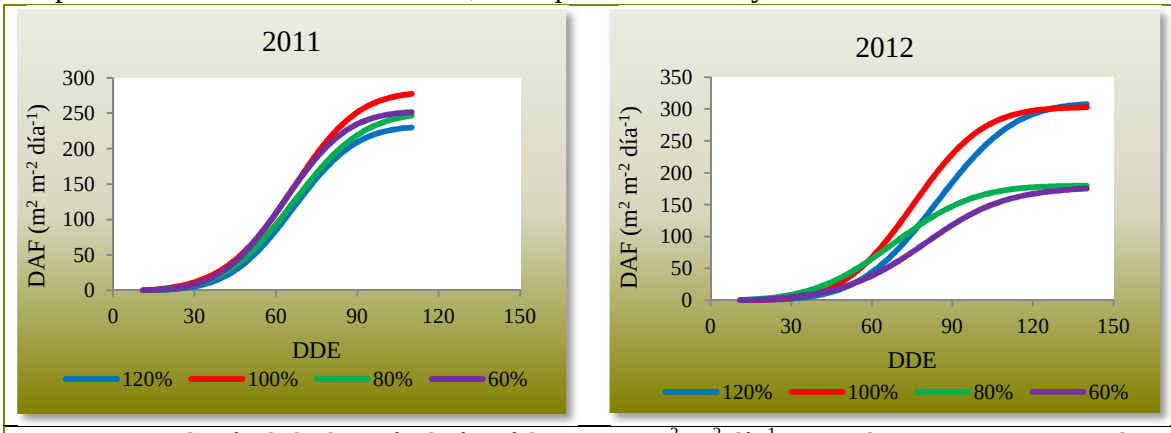


Figura 45: Evolución de la duración de área foliar (DAF, m^2 m^{-2} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

Para una mejor comprensión del efecto de este índice, además del valor total acumulado en el ciclo (DAF_t), se calculó la DAF acumulada para tres subperiodos clave en el ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo: DAF_{it} - hasta el inicio de la tuberización; DAF_s - del inicio de la tuberización hasta la senescencia y DAF_c – del inicio de la senescencia hasta la cosecha (Tabla 56). Se observa que los valores más bajos de este índice se acumulan en la primera etapa de crecimiento del cultivo, siendo la mayor proporción del DAF acumulada en el subperiodo DAF_s y también importante las cifras calculadas en la DAF_c.

Así como ocurrió en el IAF, no fueron encontradas diferencias significativas de la DAF en el año 2011. Sin embargo, en la segunda campaña, se aprecian diferencias en todos los subperiodos. En 2012, el valor calculado para el tratamiento de 100 % en la DAF_{it} es superior a los demás, aunque no tenga diferencias significativas con el tratamiento de 120 %. Esta tendencia en esta etapa, del tratamiento 100 % también se nota en la campaña anterior.

En la DAF_s, los valores de DAF acumulados, en la segunda campaña, son mayores para los tratamientos de mayor aporte hídrico. Sin embargo, comparando los dos años, los mismos tratamientos resultaron inferiores en el año 2011 (158,5 *vs* 214,0 m^2 m^{-2} $día^{-1}$ en el tratamiento de 120 %, y 187,8 *vs* 251,3 m^2 m^{-2} $día^{-1}$ en el 100 %). En la etapa DAF_c el índice alcanzó mayores valores en el tratamiento de 120 % en la segunda campaña, donde fueron además superiores que el ensayo de 2011 (68,3 m^2 m^{-2} $día^{-1}$ en 2011 y 83,1 m^2 m^{-2} $día^{-1}$ en 2012).

Con respecto al DAF total acumulado, los valores en 2012 son superiores al de 2011, excepto para los tratamientos de 80 y 60 %, reflejando la persistencia de la superficie interceptora de luz en los tratamientos de mayor aporte hídrico, además de contribuir en una mayor acumulación de la metería seca aérea en los órganos superficiales.

Como se verá más adelante, la DAF está muy correlacionada con el rendimiento; así pues, Soto *et al.* (2009) afirman que una mayor duración y mantenimiento de la fotosíntesis son fundamentales en el incremento del rendimiento final.

Tabla 56: Análisis estadístico de la duración del área foliar (DAF, m^2 m^{-2} $día^{-1}$) para el cultivo de patata, en los años 2011 y 2012.

Tratamiento	2011				2012			
	DAF_{it}	DAF_s	DAF_c	DAF_t	DAF_{it}	DAF_s	DAF_c	DAF_t
120%	4,1 a	158,5 a	68,3 a	230,9 a	1,3 a	214,0 a	83,1 a	298,4 a
100%	9,6 a	187,8 a	81,6 a	279,1 a	2,2 ab	251,3 a	56,1 b	309,7 a
80%	6,3 a	163,9 a	78,8 a	249,0 a	4,8 b	153,2 b	20,2 c	178,3 b
60%	6,7 a	185,1 a	60,7 a	252,5 a	3,1 b	129,9 b	36,9 c	169,9 b
p valor	ns	ns	ns	ns	*	**	**	**

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01
DAF_{it}: hasta el inicio de la tuberización; DAF_s: del inicio de la tuberización hasta la senescencia, $DAF_{c:}$ del inicio de la senescencia hasta la cosecha y $DAF_{t:}$ total.

Los valores de la DAF obtenidos son similares, o incluso puntualmente superior, a los expuestos por otros autores, como por ejemplo, Castellanos *et al.* (2010) con valores entre 70 y 98 días según la variedad, Aguiar-Netto *et al.* (2000) obtinen valores entre 60 y 150 m^2 m^{-2} $día^{-1}$ según redimen hídrico en la variedad *Aracy*, o Boyd *et al.* (2002) presentan cifras entre 132,5 a 255,7 días según variedad.

5.5.4.5 Relación del área foliar.

El índice de relación del área foliar (RAF) refleja la relación entre el tejido fotosintético y el total de tejido respiratorio. La figura 46 muestra la evolución del RAF para los tratamientos hídricos en los dos años ensayados.

El máximo RAF se presenta entre 50 y 55 DDE en el año 2011, y a los 55 y 60 DDE en el año 2012 (periodo de floración y tuberización), excepto el tratamiento de 60 % que lo alcanza a los 62 DDE en 2011 y, en la segunda campaña alcanza su máximo a los 30 DDE. A partir del punto máximo, los valores descienden hasta el final del ciclo.

En la primera campaña, los valores máximos de RAF y de IAF son alcanzados en el mismo momento (62 DDE) en el tratamiento de 60 %, y en los demás tratamiento el IAF sigue creciendo hasta 20 días después del máximo RAF. Sin embargo, en el año 2012, todos los tratamientos presentaran sus máximos RAF antes de los máximos del IAF.

Resultados análogos fueron encontrados por Castallanos *et al*. (2010), cuando comprobaron que el máximo RAF coincide con el momento en el cual se alcanza la cobertura total del cultivo y el IAF es óptimo, es decir, el momento donde existe máxima expansión del área foliar previo al inicio del auto-sombreamiento de las hojas. En general, debido a la gran capacidad del cultivo de emitir nuevas hojas, la patata presenta un valor de IAF máximo superior al IAF óptimo (Castallanos *et al*. 2010).

El descenso de la RAF indica que, a lo largo del tiempo, menores cantidades de asimilados están implicados en la producción del área foliar, es decir, la notable eficiencia fotosintética de la estructura asimiladora, da lugar a un fuerte incremento de la materia seca total de la planta. El descenso sigue hasta que el RAF presentar valores muy próximos a cero, coincidiendo con la degradación del apartado foliar y el acumulo de la materia seca en los tubérculos.

El valor máximo de RAF, en el tratamiento de 120 % fue superior a los demás tratamiento en las dos campañas (100, 5 cm^2 g^{-1} en 2011 y 77, 8 cm^2 g^{-1} en 2012). Sin embargo, en 2011, los valores máximos de los tratamientos de 100, 80 y 60 % son muy similares (78,9, 76,2 y 75,6 cm^2 g^{-1}, respectivamente).

Hay que destacar que, aunque los máximos valores de RAF entre los tratamientos en el año 2012 fueron similares (77,8, 72,6, 74,2 y 74,4 cm^2 g^{-1} en los tratamientos de 120, 100, 80 y 60 %, respectivamente), la curva del modelo (Fig. 46) indica que los

tratamiento más deficitarios presentan un descenso más marcado, mostrando una mayor eficiencia fotosintética del cultivo de la patata conforme aumenta el aporte de agua.

Otros autores investigando la diferencia entre variedades de patata, encontraron valores máximos de RAF entre 100 y 135 cm^2 g^{-1} (Castallanos *et al*., 2010) y 160 y 270 cm^2 g^{-1} (Borrego *et al*., 2000).

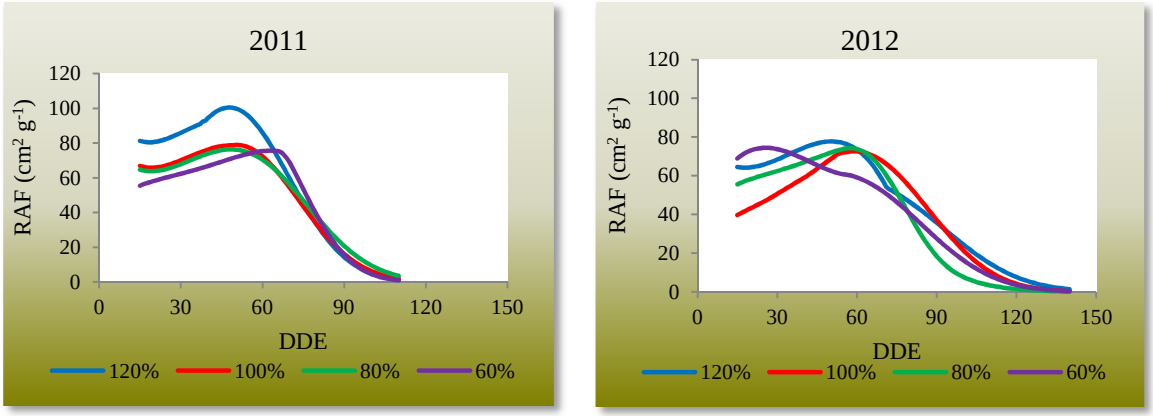


Figura 46: Evolución de la relación de área foliar (RAF, c m^2 g^{-1}) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

5.5.4.6 Tasa de asimilación neta.

La tasa de asimilación neta (TAN) es un índice que indica la eficiencia fotosintética de una comunidad de plantas. En la figura 47 se observa que los máximos valores de TAN se producen al principio del ciclo del cultivo, cuando las plantas son pequeñas y todas las hojas están expuestas a la radiación.

A lo largo del ciclo, con la emisión de nuevas hojas y el aumento del IAF, el cultivo se pone cada vez más autosombreado, lo que provoca la disminución de la capacidad fotosintética (Dellai, 2007).

En el año 2011 los máximos valores de la TAN no han demostrado estar muy influenciados por el tratamiento hídrico, excepto en el tratamiento de 80 % que presenta una diferencia de 7 g m^{-2} $día^{-1}$ de los demás tratamientos. Sin embargo, en la segunda campaña los valores más altos del índice se mostraron afectados por la disminución del agua.

El decrecimiento de la TAN a los largo del ciclo se produce hasta los 85 DDE, en 2011 y los 95 DDE en 2012, y a partir de esto momento se nota un nuevo incremento del índice (Fig. 47). Los mismos incrementos al final del ciclo en el cultivo de patata fueros encontrados por van Loon (1981), Aguiar-Netto *et al*. (2000), Borrego *et al.* (2000) Mora-Aguilar *et al*. (2006) y Castallanos *et al*. (2010).

Según Fabeiro (1995), la TAN puede considerarse como la diferencia entre la cantidad de materia seca asimilada y la respirada. En la senescencia, al perder la planta gran parte del área foliar fotosintéticamente activa, se registra una disminución de la componente respiratoria total de la planta y como resultado de este balance puede producirse un incremento de la TAN al final de la campaña.

Otro factor que puede favorecer este aumento de la TAN al final del ciclo es la propia disminución del IAF. La senescencia aumenta la exposición de las hojas anteriormente sombreadas pudiendo aumentar la actividad fotosintética e incrementándose la asimilación por unidad de área foliar activa.

Algunos autores han encontrado aumentos de la TAN al final del ciclo de maíz (Lopéz, 2004; Moura *et al*., 2008). Sin embargo, el incremento de la TAN no se manifiesta con igual claridad en todos los cultivos, incluso algunos investigadores

describen valores decrecientes y, puntualmente, valores negativos (Fabeiro, 1995; Botella *et al*., 1997; França *et al*., 2000; Younis *et al*., 2000; Shipley, 2002; Jaleel *et al*., 2008).

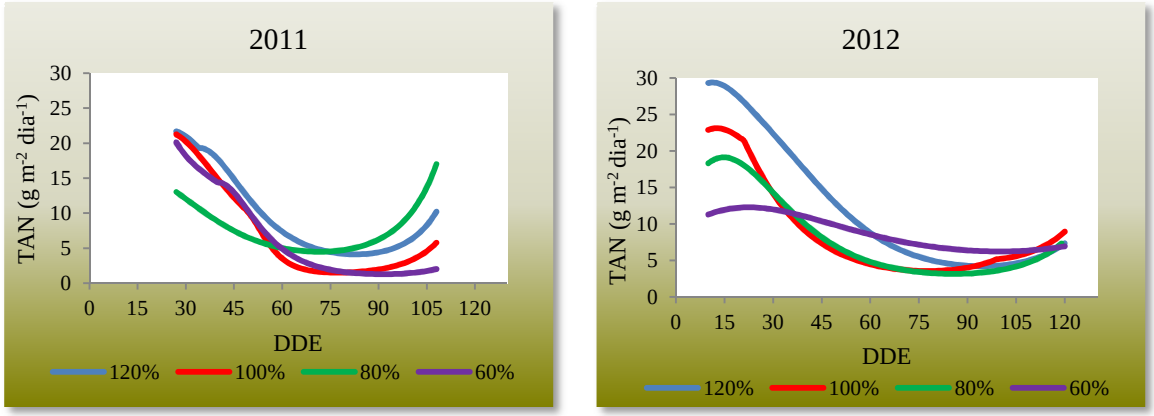


Figura 47: Evolución de la tasa de asimilación neta (TAN, g m^{-2} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

5.5.4.7 Velocidad de crecimiento relativo.

En la figura 48 se exponen los resultados obtenidos para las dos campañas de la velocidad de crecimiento relativo (VCR). Esta fue elevada al inicio del desarrollo vegetativo y, conforme transcurrió el ciclo tendió a disminuir hasta valores muy próximos a cero a partir de los 75 DDE, en 2011 y, los 60 DDE en 2012.

La VCR expresa el incremento de materia seca por unidad de tiempo y por unidad de materia seca ya existente (Fabeiro, 1995), el momento de su anulación, en general, coincide con el momento en que la curva de MST empieza a ser constante tras el punto de inflexión.

Este tipo de evolución también ha sido descrito por otros autores en sus trabajos con el cultivo de patata (Collins, 1977; Dripps y Smilowitz, 1989; Aguiar-Netto *et al*., 2000; Mora-Aguilar *et al*., 2006), y en otros cultivos herbáceos: en pimiento (Pereira, 2006), en pepino y tomate (Bruggink y Heuvelink, 1987), y en melón (Medeiros *et al*., 2007).

Los máximos valores de la VCR alcanzados en 2011 fueron de 0,51 g g^{-1} $día^{-1}$ en el tratamiento de 120 %, y alrededor de 0,34 g g^{-1} $día^{-1}$ en los tratamientos de 100, 80 y 60 % (Fig. 48) Sin embargo, en la segunda campaña, se muestran dos grupos diferenciados entre los tratamientos de mayor y menor aporte de agua (0,47 y 0,55 g g^{-1} $día^{-1}$ en los tratamientos de 120 y 100 % *vs* 0,15 y 0,11 g g^{-1} $día^{-1}$ en los tratamientos de 80 y 60 %, respectivamente).

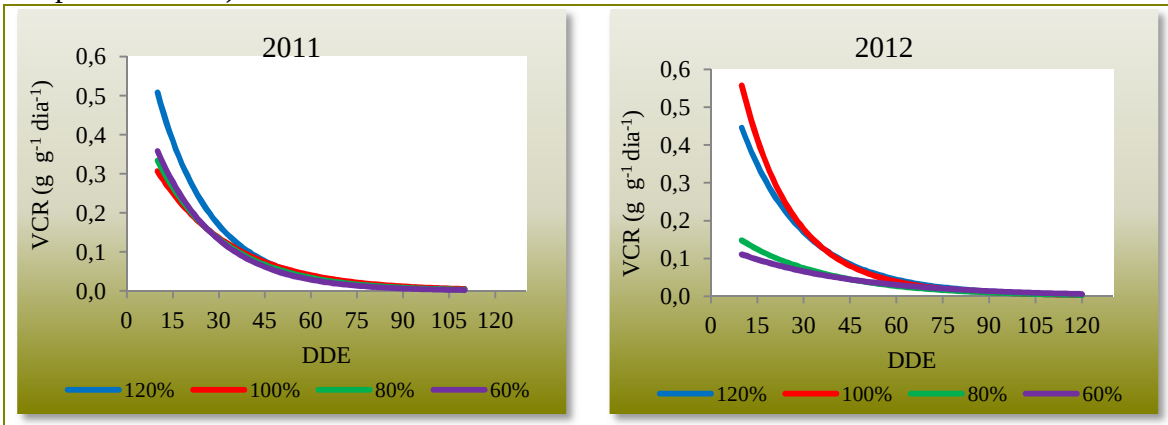


Figura 48: Evolución de la velocidad de crecimiento relativo (VCR, g g^{-1} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

Mora-Aguilar *et al.* (2006) estudiando cinco genotipos de patata encontraron valores máximos de VCR que variaron entre 0,20 y 0,39 g g^{-1} $día^{-1}$. La influencia del régimen hídrico en la VCR también fue descrita por Aguiar-Netto *et al.* (2000), que describen valores máximos entre 0,15 y 0,24 g g^{-1} $día^{-1}$ en función de la menor y mayor lámina de agua aplicada, respectivamente.

5.5.4.8 Velocidad de crecimiento del cultivo.

La velocidad de crecimiento del cultivo (VCC) valora el incremento en materia seca total en un cultivo en una determinada superficie. La figura 49 muestra la evolución del VCC en los tratamientos hídricos a los que se ha sometido el cultivo de patata. Las curvas muestran un perfil similar en las dos campañas, presentando un aumento progresivo hasta alcanzar el máximo valor, a partir del cual empieza a decrecer hasta el final del ciclo.

La máxima eficiencia en producción de la biomasa total se consigue en la etapa de plena floración y tuberización, alrededor de los 50 DDE en 2011 y, 60 DDE en 2012. Estos valores se cifran entre 22,8 g m^{-2} $día^{-1}$ (tratamiento de 80 %) y 32,5 g m^{-2} $día^{-1}$ (tratamiento de 120 %), en el primero año y, 17,7 g m^{-2} $día^{-1}$ (tratamiento de 80 %) y 33,4 g m^{-2} $día^{-1}$ (tratamiento de 100 %), en el segundo.

Mora-Aguilar *et al.* (2006) observaron valores máximos de 184 g m^{-2} $día^{-1}$ analizando el genotipo *Alpha* de patata, Castallanos *et al.* (2010) entre 24,3 a 43,6 g m^{-2} $día^{-1}$ según la variedad y Quispe *et al.* (1997) entre 17,3 y 9,9 g m^{-2} $día^{-1}$ según la variedad.

En la campaña de 2011, el tratamiento de 60 %, tras alcanzar su máximo valor de VCC, empieza a decrecer a menores tasas que los demás tratamientos, llegando al final del cultivo con 3,4 g m^{-2} $día^{-1}$(Fig. 49). Tal hecho está reflejado en la curva de MST de dicho tratamiento (Fig. 36), cuando el incremento de materia seca alcanza y se estabiliza a valores menores que los otros tratamientos.

Así como, la evolución creciente de MST en el tratamiento de 80 % en la primera campaña, la VCC de dicho tratamiento es la que terminal el ciclo con mayores valores (12,9 g m^{-2} $día^{-1}$), además, la etapa decreciente de la curva es la menos marcada entre los tratamientos (Fig. 49).

En el año 2012, se observa que el tratamiento de 80 % comienza la campaña logrando los mayores valores de VCC, sin embargo, su máximo alcanzado es el menor entre los tratamiento hídricos y su descenso se solapa con la curva del tratamiento más deficitario. Tal comportamiento justifica el hecho de que los tratamientos más deficitarios (60 y 80 %) presentaran diferencias significativas de MST con los tratamientos de mayor aporte hídrico en la segunda campaña (100 y 120 %).

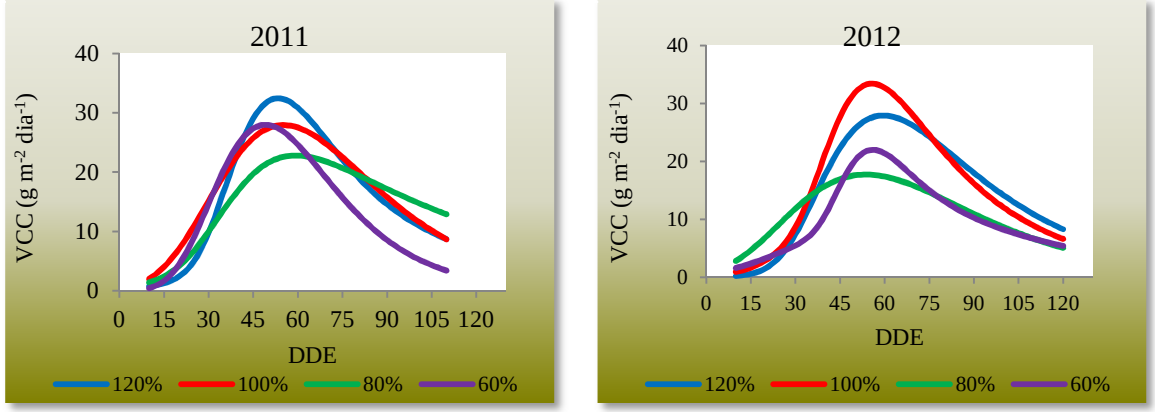


Figura 49: Evolución de la velocidad de crecimiento del cultivo (VCC, g m^{-2} $día^{-1}$) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

5.5.5 Análisis del grado de cobertura.

Una vez analizados los indicadores más habituales de crecimiento de los cultivos se aborda el estudio de la evolución del grado de cobertura (GC) de los cuatro tratamientos hídricos representados en la figura 50 para los dos años experimentales. El régimen hídrico no influenció el grado máximo de cobertura alcanzado en el año 2011, donde a los 48 DDE todos los tratamientos obtuvieron 98 % de la cobertura total del suelo.

Sin embargo, a los 99 DDE, en la primera campaña, (24 días después del inicio de la senescencia) empieza a notarse una diferenciación entre los tratamientos que se mantiene hasta el final del ciclo. Así pues, los tratamientos más deficitarios conservan un mayor porcentaje de cobertura a finales de la campaña (36 y 42 % en los tratamientos de 120 y 100 % *vs* 51 y 57 % en los tratamientos de 80 y 60 %, respectivamente).

En el año 2012, el máximo valor del GC fue alcanzado a los 71 DDE en los tratamientos de 120, 100 y 80 % y, a los 100 DDE en el de 60 %. No existieron diferencias entre los máximos valores entre los tratamientos de mayor aporte hídrico (94 % para los tratamientos de 120 y 100 %), a pesar de que, el tratamiento de 80 % presentó un máximo de 85 % de la cobertura total del suelo y el tratamiento más deficitario 70 %.

La tendencia de los tratamientos más deficitarios en conservar un mayor porcentaje de la cobertura del suelo a finales del cultivo, se repitió en la segunda campaña. Al igual que en el año anterior, el tratamiento de 60 % terminó conservando un total de 58 % de la cobertura.

Cadersa y Govinden (2000), analizando seis variedades de patata, encontraran un máximo de cobertura del cultivo entre los 70 y 98 %.

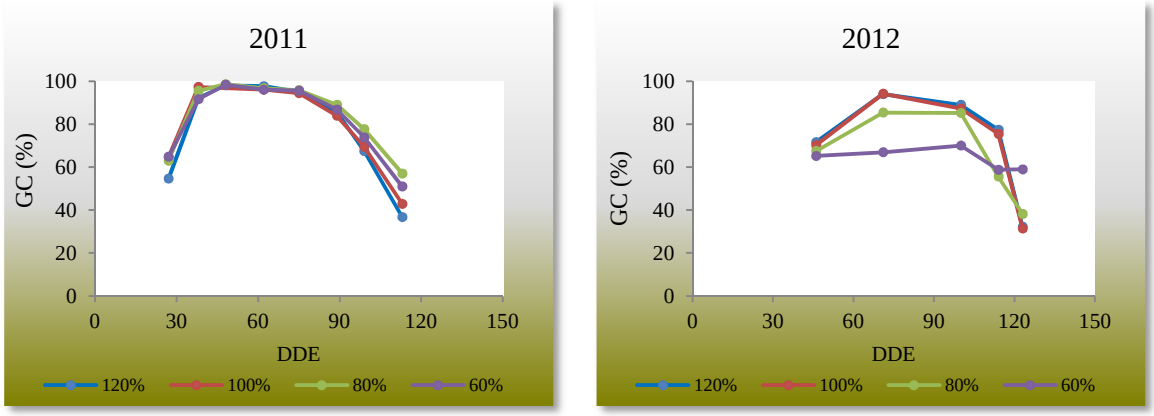


Figura 50: Evolución del grado de cobertura (%) promedio por tratamiento en el año 2011 y 2012.

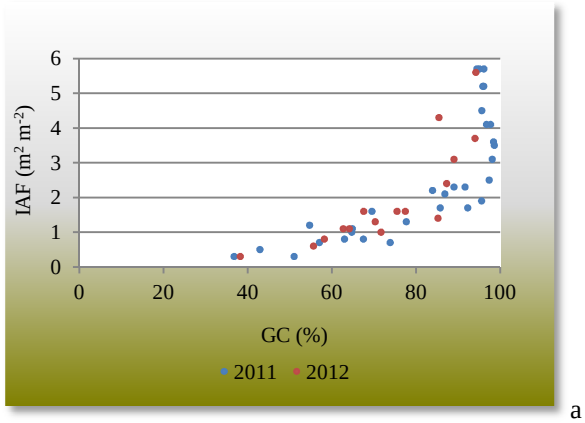
En la figura 51 se utilizan los datos de los dos años de estudio para correlacionar el IAF y el GC del suelo. El gráfico muestra que tras alcanzar el cultivo la máxima cobertura del suelo, el IAF sigue creciendo (Fig. 51a). Cuando el cultivo logra valores superiores a 3 m^2 m^{-2} de IAF, es el momento en que el suelo se encuentra con su máxima cobertura, de tal manera que a partir de estos valores la correlación entre el IAF y GC disminuye considerablemente.

Estos valores son muy similares a los obtenidos por otros autores; así pues, Wright (1982) y Jayanthi *et al.* (2007) afirman que en el cultivo de patata, el IAF de 3,5 m^2 m^{-2} corresponde a una cobertura completa del suelo. De la Casa *et al.* (2011) describen el máximo grado de cobertura (98 %) cuando el IAF registraba valores entre 3 y 4 m^2 m^{-2}.

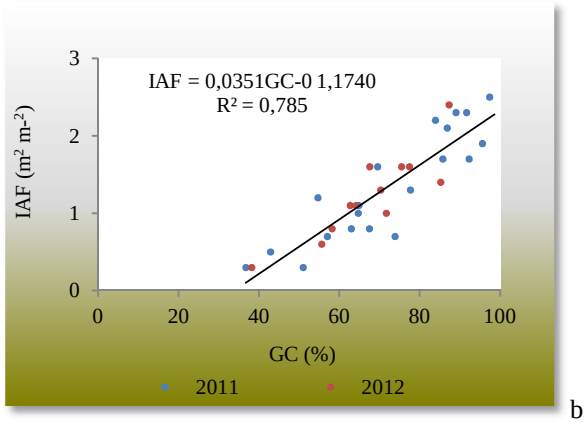
Resultados similares fueron encontrados por de la Casa *et al.* (2007) de manera que cuando el cultivo de patata alcanzó una cobertura próxima al 100 %, el IAF se

encontraba alrededor de los 3 m^2 m^{-2}, a pesar de que el cultivo logró IAF máximos superiores a 4,5 m^2 m^{-2}.

En muchos cultivos se puede hablar de un IAF óptimo, de manera que Castallanos *et al.* (2010) comentan que el IAF en el momento de la total cobertura del suelo puede ser considerado como un IAF óptimo en el cultivo de patata.



a



b

Figura 51: a) Relación entre el IAF y el GC, considerando todos los valores de IAF y b) los valores hasta el IAF óptimo en la patata.

De acuerdo con esto, se realizó el análisis de la relación entre el GC y el IAF óptimo (en este estudio se consideró los valores inferiores a 3 m^2 m^{-2}) (Fig. 51b). La representación gráfica muestra la existencia de una relación lineal, con un coeficiente de ajuste de 78,5 % y altamente significativo ($p<0,001$).

Otros autores relacionando el GC y el IAF, también han obtenido modelos lineales con un alto coeficiente de determinación. Entre ellos podemos citar a de la Casa *et al.* (2007) en el cultivo de la patata (R^2 = 98 %) y Córcoles *et al.* (2013) en el cultivo de la cebolla (R^2 = 83,6 %).

Estudios similares, como el de Jayanthi *et al.* (2007), encontraron un modelo exponencial (R^2 = 90 %) relacionando el IAF con índice de vegetación ajustado suelo (SAVI).

Turner *et al.* (1999) obtuvieron un modelo polinomial de tercero orden (R^2 entre 51 y 74 %) correlacionando el IAF con el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

5.5.6 Balance de radiación.

5.5.6.1 Radiación fotosintéticamente activa.

La evolución de la PAR_a y la PAR_i a lo largo del ciclo de cultivo para cada uno de los tratamientos planteados (Fig. 52) refleja que, durante el año 2011, los máximos valores se registraron a los 61 DDE (periodo de floración y tuberización) para los cuatro tratamientos, con valores comprendidos de PAR_a y PAR_i entre 22-23 MJ m^{-2} d^{-1} y entre 23-24 MJ m^{-2} d^{-1}, respectivamente.

En el año de 2012 (Fig. 52), los valores máximos de PAR_a y de PAR_i se producen a los 83 DDE (periodo de floración y tuberización) para los tratamientos de 120 y 100%, con valores entre 20-21 MJ m^{-2} d^{-1} de PAR_a y entre 21-22 MJ m^{-2} d^{-1} de PAR_i. En cuanto a los tratamientos de 80% y 60%, es a los 43 DDE (etapa de floración y tuberización) cuando se alcanza la máxima PAR_a (entre 18-19 MJ m^{-2} d^{-1}) y PAR_i (entre 19-20 MJ m^{-2} d^{-1}).

No se observaron diferencias estadísticas entre los máximos valores de la PAR_a y la PAR_i (Tabla 57), sin embargo, en el segundo año de ensayo a partir de de los 56 DDE se empieza a notar diferencias entre tratamientos para la PAR_a y la PAR_i. Dichas diferencias se deben, fundamentalmente, a las diferencias del máximo IAF promedio

alcanzado en los diferentes tratamientos (alrededor de 5,0 m^2 m^{-2} en los tratamientos de 120% y 100% a los 83 DDE, y, entre 2,7 y 4,3 m^2 m^{-2} en los tratamientos de 60% y 80% a los 68 DDE, respectivamente).

Además, se observa que los valores de PAR_a y PAR_i descienden desde el inicio de la senescencia (75 DDE en 2011 y 95 DDE en 2012) hasta el final del ciclo, llegando a un nivel similar entre ambos años (10-11 MJ m^{-2} d^{-1}).

Tabla 57: Análisis estadístico de los máximos valores de PAR_a y PAR_i (MJ m^{-2} d^{-1}) en el cultivo de la patata en los años 2011 y 2012.

Tratamiento	2011		2012	
	PAR_i	PAR_a	PAR_i	PAR_a
120 %	23,6 a	22,7 a	21,8 a	20,8 a
100 %	24,0 a	23,1 a	22,1 a	21,1 a
80 %	24,5 a	23,5 a	20,3 a	19,4 a
60 %	24,1 a	23,1 a	19,4 a	18,6 a
p valor	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo

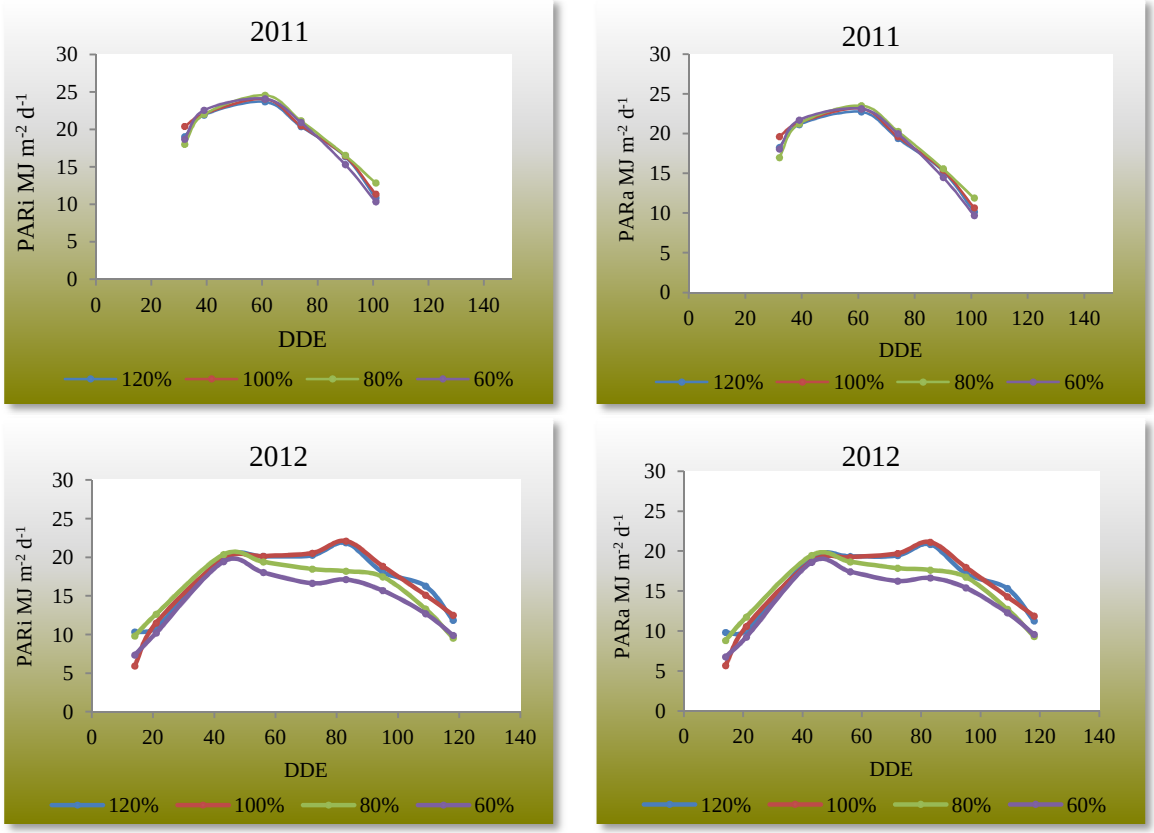


Figura 52: Evolución de la PAR_a y PAR_i de los distintos tratamientos en función de los días desde la emergencia, en el año 2011 y 2012.

5.5.6.2 Eficiencia de absorción lumínica.

La evolución de la ε_a y la ε_i a lo largo del ciclo de se representa en la figura 53. En el año 2011 las eficiencias (ε_a y ε_i) crecen hasta los 61 DDE, fecha en que el cultivo alcanza el máximo de la cobertura total del suelo, llegando a cifras de 89-94% y 93-98%, respectivamente, y, a partir de esto los valores empiezan a decrecer, con el periodo del inicio de la senescencia (74 DDE).

En el año 2012 las eficiencias (ε_a y ε_i) crecen de manera continua hasta los 83 DDE (inicio de la senescencia), para los tratamientos 120% y 100%, alcanzando cifras de

93-94 % y 97-99 %, respectivamente, mientras que, en los tratamientos del 60 % y 80 %, el máximo se alcanza alrededor de los 68 DDE, con valores de 77-83 % y 80-85 %, respectivamente (Fig. 53).

No se observaron diferencias significativas entre los máximos de las eficiencias, en función de los tratamientos hídricos, en la primera campaña (Tabla 58). En cambio, en la segunda campaña, los tratamientos de mayor aporte hídrico formaron un grupo diferenciado de los tratamientos más deficitarios.

Tabla 58: Análisis estadístico de los máximos valores de ε_a y la ε_i (%) en el cultivo de la patata en los años 2011 y 2012.

Tratamiento	2011		2012	
	ε_i	ε_a	ε_i	ε_a
120 %	93 a	89 a	99 a	94 a
100 %	97 a	93 a	97 a	93 a
80 %	98 a	94 a	85 b	83 b
60 %	94 a	91 a	80 b	77 b
p valor	ns	ns	**	**

ns: no significativo; **: p<0,01.

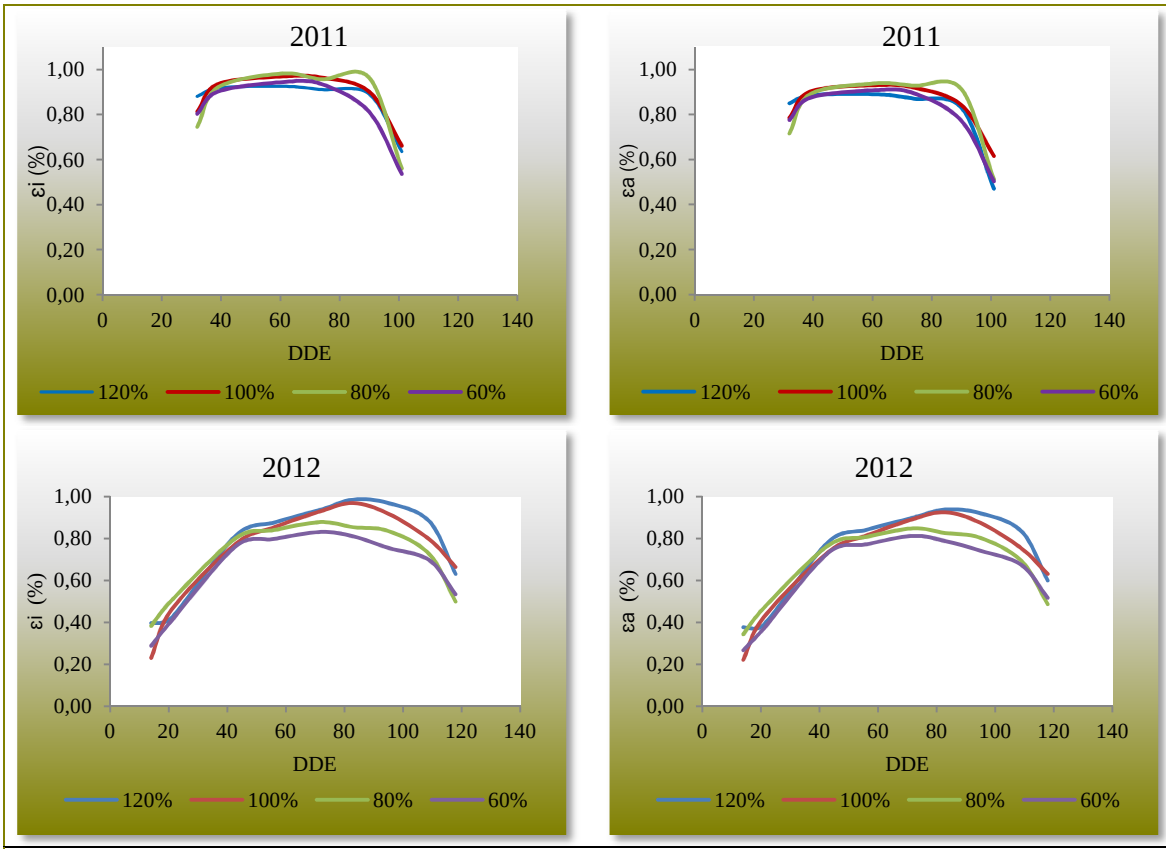
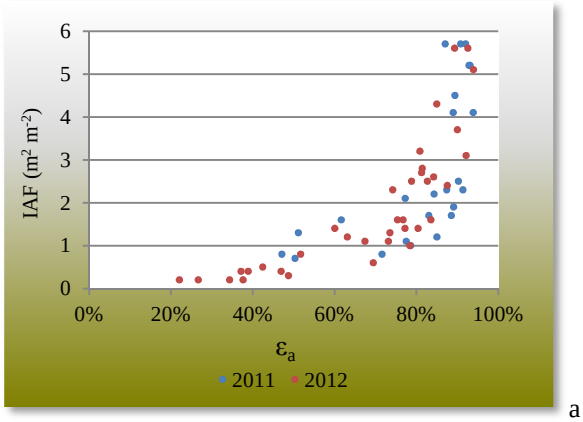
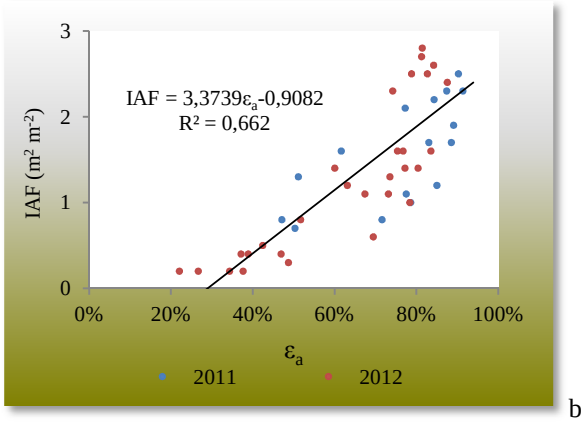


Figura 53: Evolución de la ε_a y ε_i de los distintos tratamientos en función de los días desde la emergencia, en el año 2011 y 2012.

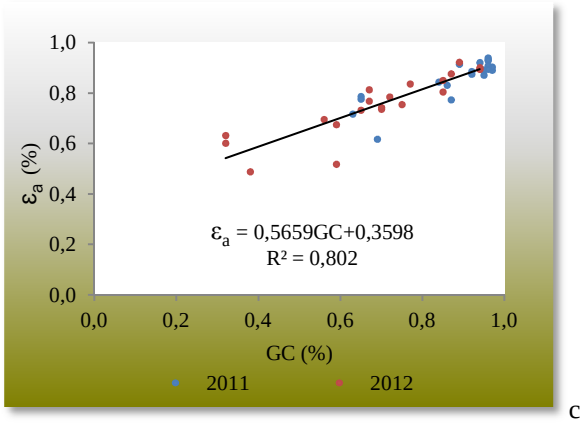
En la figura 54a se utiliza los datos de los dos años de estudio para correlacionar el IAF y la ε_a. El gráfico refleja resultados similares a los manifestados en la correlación del IAF y el GC (Fig. 51a), ya que el IAF sigue aumentado después de tener alcanzado la máxima eficiencia de absorción. Los IAF superiores a 3 m^2 m^{-2}, no son capaces de superar la máxima eficiencia alcanzada por el cultivo (94%), reforzando la idea de que en el presente trabajo, el IAF óptimo para el cultivo de patata es de 3 m^2 m^{-2}.



a



b



c

Figura 54: a) Relación entre el IAF y la ε_a, considerando todos los valores de IAF , b) los valores hasta el IAF óptimo y c) relación entre la ε_a y el GC.

Boegh *et al.* (2002) correlacionando el IAF de ocho cultivos con sus tasas fotosintéticas de la cubierta, observaron que a mayores IAF la capacidad fotosintética del cultivo disminuye, ya que a partir de un determinado valor de IAF (inferior al máximo) la absorción lumínica es constante.

Resultados similares fueron encontrados por Bégué (1993) analizando la variabilidad de las relaciones entre el IAF *vs* ε_i y IAF *vs* NDVI.

Se realizó el análisis de la relación entre el IAF óptimo y la ε_a (Fig. 54b). La representación gráfica muestra la existencia de una relación lineal, con un coeficiente de ajuste de 66,2 % y altamente significativo ($p<0,001$).

Stenberg (1996), analizando los efectos de la estructura de la cubierta de coníferas en la luz interceptada, encontró una función lineal que explica la relación entre la tasa de la intercepción de luz y el IAF hasta el comienzo del autosombreado de la cubierta, y una función cuadrática que explica dichas relaciones a partir del autosombreado de las hojas.

También se analizó las relaciones entre la eficiencia de absorción y el grado de cobertura con los datos de los dos años de estudio. La figura 54c muestra una relación lineal entre los parámetros, con coeficiente de ajuste de 80,2 % y muy significativo ($p<0,001$).

Bégué (1993) estudiando las correlaciones entre la ε_a y el NDVI, encontró una tendencia hacia la linealidad en el estadio de desarrollo vegetativo y en la senescencia del cultivo de mijo.

5.5.6.3 Coeficiente de extinción.

Los valores diarios de la εa están relacionados con el IAF a través del coeficiente de extinción lumínico (K) (Ec. 24).

La relación que guarda el K y el IAF de los tratamientos, en ambos años de estudio, es de la forma lineal (Fig. 55). Dicha relación indica que la interceptación de luz es más eficiente por unidad de área foliar cuando el IAF es menor. En la tabla 59 se exponen los coeficientes de ajuste del modelo en función del régimen hídrico, así como, el valor de sus parámetros y el nivel de significación.

Gordon *et al.* (1997), en cambio, ajustaron la relación entre K y el IAF a un modelo polinomial, sin embargo con coeficientes de ajuste inferiores (77 %) a los encontrados en el trabajo (81,6 – 94,3 %).

Analizando las pendientes de las rectas (Tabla 59), se observa que en la primera campaña el tratamiento de 80 % tiene un descenso más acelerado de la eficiencia de la intercepción de luz que los demás tratamientos (a = -0,2442).

En la segunda campaña aparece más claro que dicho descenso es menos acelerado en los tratamientos con mayor aporte hídrico (120 y 100 %) que en los tratamientos más deficitarios (80 y 60 %). Estas diferencias entre los tratamientos también se manifestaron en el análisis de las eficiencias (ε_a y ε_i) en el año 2012.

Del mismo modo, para mayores valores de IAF, K es menor. Para ambos años y tratamientos, se obtuvo valores mínimos de K similares (oscilando entre 0,48 y 0,75). Jongschaap y Boij (2004) encontraron valores promedios de K para distintas variedades de patata entre 0,66 y 0,73.

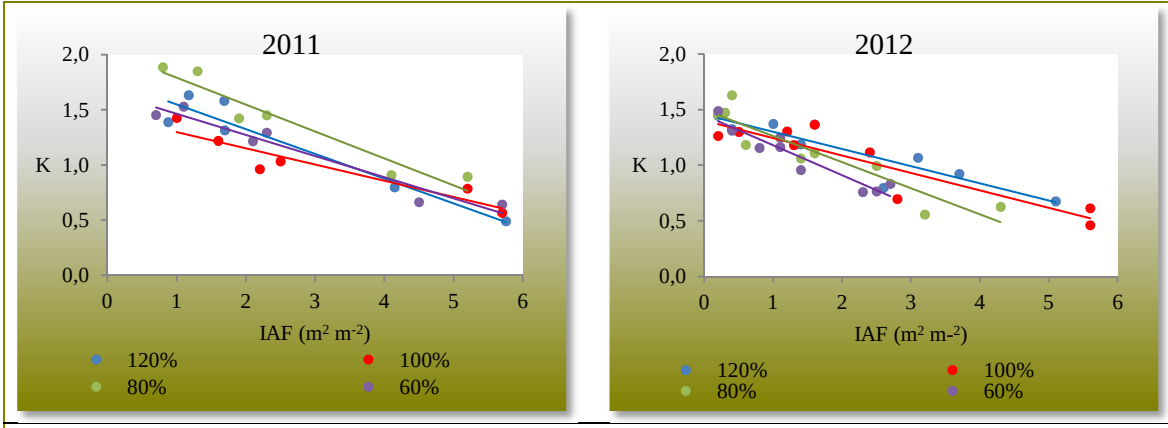


Figura 55: Relación entre el índice de área foliar (IAF) y el coeficiente de extinción lumínico (K) en los tratamientos durante los años 2011 y 2012.

Tabla 59: Modelo utilizado para analizar la relación entre el IAF y el K.

	Modelo	Tratamiento	R^2	p valor	*a*	*b*
2011	$K = a\ IAF + b$	120 %	0,910	**	-0,2241	1,7727
		100 %	0,878	**	-0,1469	1,4437
		80 %	0,921	**	-0,2442	2,0362
		60 %	0,943	**	-0,1919	1,6564
2012		120 %	0,816	**	-0,1544	1,4552
		100 %	0,834	**	-0,1569	1,4018
		80 %	0,854	**	-0,2346	1,4972
		60 %	0,897	**	-0,2689	1,4479

**: p<0,01

5.5.6.4 Eficiencia en el uso de la radiación.

La tabla 60 y la figura 56 representan la eficiencia en el uso de la radiación (RUE, g MJ^{-1}), relación entre la MST acumulada y la PAR acumulada (Gallo *et al.*, 1993; Lopéz, 2004), para los diferentes tratamientos hídricos en los dos años de estudio. Como se puede observar, los tratamientos más deficitarios son los que tienen menores valores de RUE.

El análisis estadístico indica que existen diferencias significativas entre tratamientos en ambos años. Así pues, la RUE en 2011 separa los tratamientos en tres grupos diferenciados, por un lado el 120%, otro el 100% y 80% y, por último, el 60%. En 2012, los grupos formados separan los tratamientos de 120 y 100 del 60 %.

En general, la RUE alcanzada en todos los tratamientos durante el año 2011 (Tabla 60) es superior a la obtenida en el año 2012, observando cada tratamiento de manera independiente. Esto se debe a que, por un lado, el ciclo del cultivo en 2012 fue superior a 2011, por lo que la PAR acumulada es superior, y, junto a esto se une el hecho de que la MST acumulada ha sido inferior en 2012 con respecto a 2011 como ya ha sido explicado anteriormente (subepígrafe 5.5.4.1).

Los datos de RUE obtenidos (Tabla 60) son próximos a los publicados por diferentes autores en distintos ensayos experimentales en patata, con valores de alrededor de 1,45-1,7 g MJ^{-1} (Sinclair y Muchow, 1999) y 2,9-3,2 g MJ^{-1} (de La Casa *et al*., 2011), excepto el valor de RUE en el tratamiento del 60% en 2012 que se encuentra muy por debajo del resto de tratamientos.

Tabla 60: Análisis estadístico de la eficiencia en el uso de la radiación (RUE, g MJ^{-1}) para el cultivo de patata, en los años 2011 y 2012.

Tratamiento	2011	2012
120 %	2,09 a	1,77 a
100 %	1,90 b	1,63 a
80 %	1,89 b	1,46 ab
60 %	1,53 c	1,17 b
p valor	**	*

*: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Los resultados de la evolución de la RUE obtenidos en los cuatro tratamientos, en ambos años se ajustan a una relación lineal, con altos coeficientes de determinación (R^2) (Fig. 56). Observando las rectas se concluye que la RUE fue mayor para los tratamientos de 120 y 100 % para ambas campañas, y menor en el tratamiento de 60 %, comprobando la influencia de la disponibilidad hídrica en este parámetro.

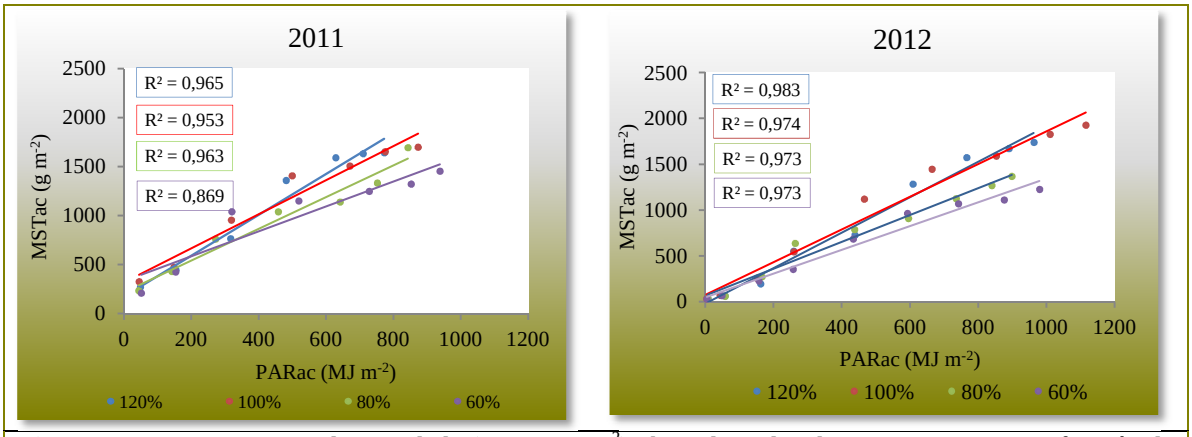


Figura 56: Materia seca total acumulada (MST_{ac}, g m^{-2}) obtenida en los distintos muestreos en función de la radiación fotosintéticamente activa absorbida acumulada (PAR_{ac}, MJ m^{-2}) para los tratamientos de 120%, 100%, 80% y 60% durante el año 2011 y 2012.

5.5.7 Análisis del rendimiento y calidad de cosecha.

Los valores de rendimiento (peso fresco de los tubérculos) e índice de cosecha (IC) medio que se han obtenido en las parcelas de cada tratamiento hídrico, en los dos años de estudio, se muestran en la tabla 61.

En la primera campaña, los rendimientos en cada tratamiento no muestran diferencias significativas (68968,5, 68836,1 y 69238,9 kg ha^{-1}en los tratamientos de 120, 100 y 80 %, respectivamente) salvo en el tratamiento del 60 % con un rendimiento menor (56177,8 kg ha^{-1}). La relación por la que el tratamiento del 80 % no muestre diferencias

con respecto a los tratamientos 120 y 100 % puede ser debido a una gran contribución del agua aportada por la lluvia efectiva en fase del desarrollo vegetativo.

En el segundo año, el rendimiento separa los tratamientos en dos grupos diferenciados, por un lado los que aportan más agua (67588,0 y 70791,8 kg ha^{-1} para 120 y 100 %), y por otro, los más deficitarios (54189,2 y 46087,3 kg ha^{-1} para 80 y 60 %). Esta diferenciación ya había sido puesta de manifiesto, principalmente, en los análisis de la MST y DAF. Dichos tratamientos por haber tenido menos DAF total acumulada, y luego una menor duración y mantenimiento de la fotosíntesis, presentaron un menor incremento en el rendimiento final.

En cuanto al índice de cosecha (IC), en 2011, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos de 120 y 100 % frente a los tratamientos de 80 y 60 %. Hay que indicar que en el tratamiento del 80 %, con respecto al 100 y 120 %, se ha obtenido más materia seca aérea para una misma equivalencia de rendimiento, lo que hace que el índice de cosecha alcance valores similares al tratamiento del 60 %

En cambio, en el año 2012, no se encontraron diferencias del índice de cosecha con respecto a los tratamientos, lo que indica que, aunque haya diferencias entre los rendimientos, se han mantenido las mismas proporciones entre la materia seca aérea y a de los tubérculos.

El IC de la segunda campaña presentó menores valores que la campaña anterior. Tal hecho se debe a que, en 2012 el cultivo acumuló una mayor proporción de materia seca aérea, en respuesta a las condiciones climáticas atípicas registradas en este año (subepígrafe 5.5.4.2).

Tabla 61: Análisis estadístico del rendimiento e índice de cosecha obtenido en cada tratamiento hídrico en los años estudiados.

Tratamiento	Rendimiento (kg ha^{-1})		Índice de cosecha	
	2011	2012	2011	2012
120 %	68968,5 a	67588,0 a	0,867 a	0,760 a
100 %	68836,1 a	70791,8 a	0,853 a	0,710 a
80 %	69238,9 a	54189,2 b	0,787 b	0,767 a
60 %	56177,8 b	46087,3 b	0,797 b	0,727 a
p valor	*	*	**	ns

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; **: p<0,01

Con los datos de rendimiento promedio obtenido y el promedio de agua recibida por el cultivo (agua de riego más precipitación efectiva) en cada uno de los tratamientos hídricos, se ha desarrollado un modelo que recoge la evolución del rendimiento en función del agua recibida. Los datos correspondientes a cada año de ensayo se han ajustado a una función polinomial de segundo orden, la cual explica el 96,5 % de la variabilidad del rendimiento en 2011 y el 88,7 % en 2012 (Fig. 57).

El modelo indica una disminución de eficiencia de uso del agua conforme aumenta la dosis aplicada. Esta disminución es especialmente importante entre los tratamientos del 100 y 120 %, en las dos campañas de estudio, donde un incremento significativo en la dosis recibida por el cultivo no supone aumento de rendimiento.

En la segunda campaña, debido a las condiciones meteorológicas excepcionales que resultaron en alargamiento del ciclo, y por eso, una mayor cantidad de agua recibida, la diferenciación entre los rendimientos de los tratamientos más deficitarios (80 y 60 %) y los de mayor aporte hídrico (120 y 100 %), condujeron a en un uso menos eficiente del agua.

Se observa, además, que los tratamientos de dotaciones superiores (120 y 100 %) han provocado la estabilización de la producción, en el año 2011, e incluso su descenso en el año 2012 (Fig. 57).

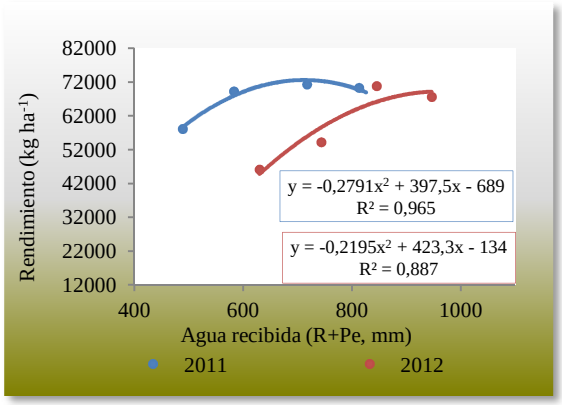


Figura 57: Relación entre el agua recibida por el cultivo (Riego-R + precipitación efectiva-PE) y el rendimiento obtenido en cada tratamiento hídrico en los años de estudio.

De los numerosos trabajos que relacionan el rendimiento comercial de la patata y el agua recibida por los mismos, se puede citar los resultados similares encontrados por Onder *et al.* (2005), en un ensayo realizado en la región mediterránea de Turquía. Investigando los efectos de dos métodos de riego y cuatro niveles de estrés hídrico en el rendimiento, concluyeron que no se puede aplicar un déficit hídrico de más de 33 % de los requerimientos hídricos del cultivo.

Ferreira y Gonçalves (2007) realizando un ensayo con cinco tratamientos hídricos en Portugal, encontraron una relación lineal entre el rendimiento del cultivo de la patata y el agua aplicada (riego más precipitación efectiva).

Yuan *et al.* (2003) aplicando cinco regímenes hídricos (de 25 hasta 125 % de las necesidades hídricas) en la finca experimental en la universidad Yamaguchi (Japón), también ajustaron los datos del total de agua aplicada *vs* rendimiento a una función polinomial de segundo grado con un coeficiente de determinación de 98 %.

5.5.7.1 Eficiencia en el uso del agua.

La eficiencia en el uso del agua (EUA) es la relación entre el rendimiento y el total de agua aplicado (R+Pe). La figura 58 muestra los valores medios de la EUA para cada tratamiento en los dos años de estudio.

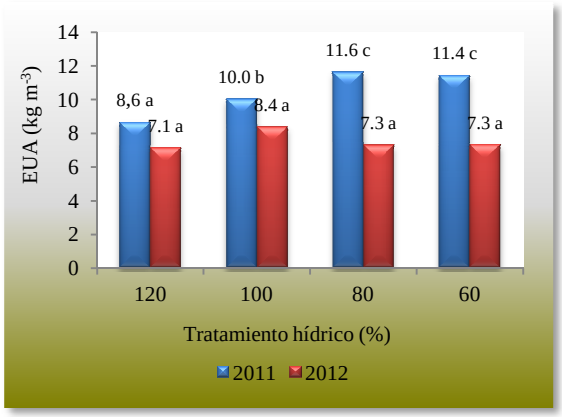


Figura 58: Eficiencia en el uso del agua mediante calculo por el total de agua aplicada (R+Pe).

Los valores de la EUA varían entre 8,6 y 11,6 kg m^{-3} (120 y 80 %, respectivamente), en 2011, y 7,1 y 8,4 kg m^{-3} (100 y 120 %, respectivamente), en 2012 (Fig. 58).

En la primera campaña se encontraron diferencias significativas ($p < 0{,}001$) entre los tratamientos más deficitarios (con las mayores EUA) y los tratamientos de 100 y 120 %. En cambio, en la segunda campaña, aunque el tratamiento de 100 % presentó la mayor EUA, no se observó influencias del tratamiento hídrico entre las EUA.

Para igualdad de rendimientos observado en los tratamientos del 80 % al 120 % en el año 2011 (Tabla 61, Fig. 57), en el tratamiento del 80% se obtiene un uso más eficiente del agua y, por tanto, una mayor productividad por unidad de m^3 de agua.

La diversidades climáticas registradas en la segunda campaña (altas temperaturas diurnas y nocturnas), resultaron en las diferencias entre el total de la ET_o registrada durante el ciclo (721, mm, en 2011 y 937,8 mm, en 2012), y por ello, las EUA en el año 2012 fueron unos 29 % inferiores a las de la campaña anterior.

Yuan *et al.* (2003) cuantificó una EUA entre 10 y 14 kg m^{-3} para tratamientos que recibían 25 y 125 % de las necesidades hídricas. Fabeiro *et al.* (2001) realizando un

ensayo de riego deficitario controlado en el cultivo de la patata en Albacete, alcanzaron valores inferiores al de este trabajo (6,3 y 8,5 kg m^{-3}).

Para conocer la eficiencia del uso del agua en la acumulación total de biomasa se relacionaron los valores de la MST acumulada del tratamiento de referencia (100 %) de ambas campañas (1687,8 g m^{-2} en 2011 y 1925,8 g m^{-2} en 2012) con el total de agua recibida. Aunque hay diferencias entre la EUA en función del rendimiento alcanzado (Fig. 58), se observaron valores muy similares entre las eficiencias en la acumulación de MST en los dos años (2,4 g MST m^{-3} en 2011 y 2,3 g MST m^{-3} en 2012). Este hecho confirma que el cultivo se comportó de modo análogo en los dos años en la acumulación de biomasa total respecto al agua recibida, pero se aprecia un claro efecto en la translocación de asimilados al tubérculo, como se ha puesto de manifiesto al analizar otros parámetros (rendimiento, IC, etc.).

5.5.7.2 Calidad de la cosecha.

Tras la recolección se valoró la calidad de la cosecha. En este apartado están descritos los parámetros de calibre, sólidos solubles, acidez, dureza y color de los tubérculos, donde los tratamientos hídricos influenciaron, principalmente, en los contenidos de sólidos solubles (ºBrix).

5.5.7.2.1 Número de tubérculo según su calibre.

En la tabla 62 se muestra el análisis de varianza de los números de tubérculo por metro cuadrado (Tub m^{-2}) encontrados por calibre entre los distintos tratamientos. En relación al calibre, no se encontraron diferencias entre los tratamientos, indicando que la dotación hídrica poco influye en este parámetro. Sin embargo, la mayor cantidad de tubérculos correspondieron al calibre de valor comercial, es decir, entre 40 y 80 mm (Robles, 2008).

En la primera campaña el número tubérculos en el calibre comercial variaron entre 34,9 y 41,6 Tub m^{-2} y, entre 27,8 y 37,7 Tub m^{-2} en la segunda. En 2011, la cantidad de tubérculos entre el calibre comercial corresponde a unos 78 % del total, sin embargo, en 2012 esta proporción disminuye para 56 %.

Dichas diferencias entre los años, se deben a los efectos de las diferencias climáticas en el reparto de la MST, ya mencionado anteriormente en el subepígrafe 5.5.4.2, dificultando la translocación de los carbohidratos, resultando en tubérculos más pequeños.

Robles (2008), encontró una variación entre 18 y 27 Tub m^{-2} de calibre entre 40-60 mm, en la variedad Agria en función de la densidad de planta adoptada.

Tabla 62: Numero de tubérculos (Tub m^{-2}) obtenidos por calibre en los dos años de estudio.

Tratamiento	2011			2012		
	< 40 mm	40-80 mm	> 80mm	< 40 mm	40-80 mm	> 80mm
120 %	6,4 a	41,6 a	4,1 a	20,0 a	30,5 a	0,56 a
100 %	5,5 a	40,6 a	3,4 a	21,2 a	33,6 a	0,27 ab
80 %	7,5 a	34,9 a	3,9 a	22,4 a	37,7 a	0,08 ab
60 %	6,5 a	35,8 a	2,9 a	29,3 a	27,8 a	0,05 b
p valor	ns	ns	ns	ns	ns	*
ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05						

5.5.7.2.2 Sólidos solubles y acidez total.

Se han encontrado diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para el contenido de sólidos solubles (ºBrix) en los dos años de estudio, siendo el tratamiento más deficitario (60 %) superior a los tratamientos de mayor aporte hídrico en este parámetro de calidad (Tabla 63).

En general, la primera campaña obtuvo mayores valores de sólidos solubles que la segunda campaña, variando el ºBrix en 2011 entre 5,61 y 4,75, y, en 2012 entre 5,01 y 3,89, correspondiendo a los tratamientos de 60 y 120 %, respectivamente (Tabla 63).

Robles (2008) investigando la influencia de la densidad de plantación en la variedad Agria, encontró valores de ºBrix entre 5,13 y 5,97. Pardo *et al.* (2000) analizando siete variedades de patata, obtuvo para variedad Agria 6,32 ºBrix.

Tabla 63: Análisis del contenido de sólidos solubles y acidez total, entre los tratamientos. Año 2011 y 2012.

Tratamiento	Contenido de sólidos solubles (ºBrix)		Acidez total (g de ácido cítrico 100 mL^{-1})	
	2011	2012	2011	2012
120 %	4,75 a	3,89 a	0,173 a	0,230 a
100 %	4,97 ab	4,13 ab	0,180 a	0,220 a
80 %	5,30 bc	4,55 ab	0,186 a	0,223 a
60 %	5,61 c	5,01 b	0,183 a	0,250 b
p valor	**	*	ns	*

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05; ** p<0,01.

En el caso de la acidez total (g de ácido cítrico 100 mL^{-1}) no se encontraron influencias del régimen hídrico en el año de 2011. Sin embargo, en la segunda campaña el tratamiento más deficitario resultó en tubérculos con mayor acidez total que los demás.

5.5.7.2.3 Dureza.

En las tablas 64 y 65 se muestran los valores de la dureza (kgf) (o fuerza de rotura) de la piel en la punta (zona opuesta al estolón) y de la piel en la zona ecuatorial del tubérculo, así como la dureza (kgf) de la corteza y de la medula de la pulpa de la patata. Con los datos de la fuerza de rotura (kgf) y la profundidad donde se produjo la rotura (mm), se calculó la flexibilidad de la piel (kgf mm^{-1}) en la punta y en la zona ecuatorial del tubérculo.

No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en los parámetros de dureza y flexibilidad en el año 2011. Analizando los datos conjuntamente, se observa que en 2011, la piel de la punta del tubérculo es más resistente y más flexible que la piel en el lateral del mismo. La textura de la medula (anillo vascular) del tubérculo es más blanda que la corteza (Tabla 64).

En cambio, en el año 2012, el tratamiento de 100 % resultó con tubérculos con la piel en la punta más resistente que los otros, y además, resultó que la piel de la punta y la piel del lateral de los tubérculos fueron igualmente resistentes. En la segunda campaña, se observó una influencia del régimen hídrico en la flexibilidad de la piel de la punta de los tubérculos, resultando que cuanto más aporte del agua, más flexible es la piel (Tabla 65).

Resultados similares fueron encontrados por Robles (2008), con valores alrededor de 2,0, 1,5 y 1,3 kgf para describir la dureza de la piel (punta y zona ecuatorial), corteza y medula, respectivamente.

Tabla 64: Análisis de la Dureza (D) (Kgf) y Flexibilidad (Kgf mm^{-1}) de la piel (de la punta y de la zona ecuatorial), de la corteza y de la medula del tubérculo, en el año 2011.

Tratamiento	2011					
	D. punta	D. ecuatorial	D. corteza	D. medula	F. punta	F. ecuatorial
120 %	1,95 a	1,86 a	1,26 a	1,29 a	1,45 a	1,34 a
100 %	2,04 a	1,95 a	1,20 a	1,18 a	1,47 a	1,30 a
80 %	2,01 a	1,83 a	1,31 a	1,21 a	1,32 a	1,33 a
60 %	2,03 a	1,83 a	1,30 a	1,22 a	1,36 a	1,27 a
p valor	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo

Tabla 65: Análisis de la Dureza (D) (Kgf) y Flexibilidad (Kgf mm^{-1}) de la piel (de la punta y de la zona ecuatorial), de la corteza y de la medula del tubérculo, en el año 2012.

Tratamiento	2012					
	D. punta	D. ecuatorial	D. corteza	D. medula	F. punta	F. ecuatorial
120 %	2,11 ab	2,11 a	2,18 a	1,78 a	0,75 a	0,96 a
100 %	2,36 b	2,12 a	2,13 a	1,68 a	0,46 ab	0,77 a
80 %	2,03 ab	2,31 a	2,34 a	1,77 a	0,44 ab	0,76 a
60 %	2,17 ab	2,12 a	2,13 a	1,69 a	0,38 b	0,93 a
p valor	*	ns	ns	ns	*	ns

ns: no significativo

5.5.7.2.4 Color del peridermo.

No fueron encontradas diferencias en el color del peridermo entre los diferentes tratamientos hídricos, en ambos años de estudio.

Los valores de *L*, que miden la escala de negro (menores valores) al blanco, oscilaron entre 62,72 y 64,78, en 2011, y entre 59,39 y 61,70 en 2012 (Tabla 66). Comparando el parámetro *a*, que mide la escala de verde (menores valores) al rojizo, resulta que los tubérculos de la segunda campaña son más verdosos.

Analizando el parámetro *b*, que mide la escala de azul (menores valores) al amarillento, los tubérculos del año 2011 resultaron más amarillos de que los de la segunda campaña (Tabla 66). De acuerdo con los valores de croma, se puede decir que el color de los tubérculos de la primera campaña son más intensos que los de la segunda.

Tabla 66: Análisis de los parámetros de color del peridermo de los tubérculos entre los tratamientos. Año 2011 y 2012.

Tratamiento	2011				2012			
	L	a	b	Croma	L	a	b	croma
120 %	62,72 a	4,45 a	29,31 a	30,18 a	60,95 a	2,58 a	21,10 a	21,32 a
100 %	64,78 a	3,75 a	30,45 a	30,70 a	60,46 a	3,04 a	20,43 a	20,69 a
80 %	64,76 a	3,74 a	30.85 a	31,10 a	61,70 a	2,74 a	21,12 a	21,36 a
60 %	63,48 a	4,22 a	30,81 a	31,12 a	59,39 a	3,37 a	20,70 a	21,01 a
p valor	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns: no significativo; *: 0,01< p<0,05.

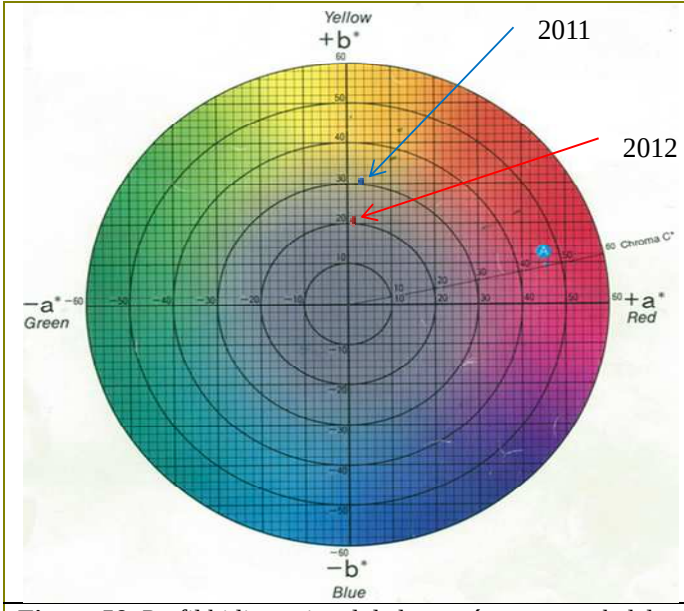


Figura 59: Perfil bidimensional de los parámetros *a* y *b* del peridermo de los tubérculos, en los años 2011 y 2012.

Una vez analizados los parámetros de color, para mejor visualizar los resultados obtenidos, se trazó un perfil bidimensional (Fig. 59).

En los estudios de Robles (2008), los valores encontrados, en la variedad Agria, para los parámetros de color, son de 65,6 para el parámetro *L*, 7,5 para *a*, 21,7 para *b* y 21,2 para croma.

Por otro lado, Pardo *et al.* (2000), analizando distintas variedades encontraron valores de 60,9, 6,8, 27,8 y 28,7 para los parámetros L, a, b y croma, respectivamente. Los autores afirman que existe una gran variación en el color de la piel entre variedades de patata, e incluso dentro de una misma variedad.

CONCLUSIONES

6 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados conseguidos con la elaboración de la presente Tesis Doctoral, se desprenden las siguientes conclusiones:

- El sistema de riego pivote permite el diseño experimental planteado, con repeticiones de los tratamientos hídricos en coronas circulares, alcanzando una alta uniformidad del agua aplicada en los diferentes tratamientos hídricos.

- Los distintos tratamientos hídricos analizados, comprendidos entre una asignación del 60 % al 120 % de los requerimientos hídricos para el máximo rendimiento, no tuvieron influencia en la duración de las etapas fenológicas del cultivo de la patata. No obstante, dada la variabilidad climática registrada en el segundo año de estudio, se observó un alargamiento del ciclo del cultivo en la campaña de 2012. El tiempo térmico total acumulado en 2011 fue de 2324 GDD, mientras que en 2012 se acumuló alrededor de un 20 % más.

- El modelo Gompertz ajusta adecuadamente los datos de la evolución de la materia seca total en función del tiempo en todas las parcelas elementales en los dos años de estudio. En todos los casos, los valores del coeficiente de determinación fueron superiores a 90 %, llegando como media a valores del 97 %. Los parámetros de ajuste del modelo han sido satisfactorios, cumpliendo los criterios de calidad y significatividad.

- El modelo expopolinomial de segundo grado presentó el mejor ajuste de los datos de la evolución del índice de área foliar en función del tiempo para las doce parcelas elementales y en ambos años de estudio. Los diferentes tratamientos hídricos no tuvieron efectos en el índice de área foliar en el año de 2011, sin embargo, en la segunda campaña, los tratamientos de mayor aporte hídrico (120 y 100 %) presentaron mayores valores del índice de área foliar máximo que los tratamientos más deficitarios (80 y 60 %).

- La velocidad de crecimiento del cultivo indica que la máxima eficiencia en la producción de biomasa se produce en el momento de plena floración y tuberización del cultivo de la patata. Los tratamientos más deficitarios presentaron una menor velocidad de crecimiento del cultivo, justificando las diferencias encontradas en la acumulación de la materia seca total en los dos años de estudio.

- No existieron diferencias significativas entre los máximos valores del grado de cobertura en función del régimen hídrico en el año de 2011 (a los 48 días desde la emergencia). En el año 2012 los tratamientos de mayor aporte hídrico presentaron un mayor grado de cobertura que los más deficitarios (a los 71 días desde la emergencia). Analizando conjuntamente los datos de los dos años de ensayo, existe un buen ajuste lineal entre el índice de área foliar y el grado de cobertura, hasta que el índice de área foliar alcanza los 3 m^2 m^{-2}. Para un índice de área foliar superior a 3 m^2 m^{-2} no se registran incrementos relevantes del grado de cobertura, lo que pone de manifiesto un índice de área foliar "óptimo" en el cultivo de la patata, a partir del cual mayor cobertura vegetal no se traduce en una mayor actividad fotosintética del cultivo.

- En relación a las eficiencias de intercepción y absorción lumínica, si bien en la primera campaña no se presentaron diferencias significativas, en la campaña 2012 sí se observó la influencia del tratamiento hídrico sobre estos parámetros con, dos grupos diferenciados (120 y 100 % *vs* 80 y 60 %). En ambas campañas los máximos valores de la eficiencia de absorción se alcanzan cuando el índice de área foliar es el óptimo.

- La eficiencia en el uso de la radiación está muy influenciada por la disponibilidad hídrica del cultivo. En los dos años de estudio, los tratamientos de mayor aportación hídrica (120 y 100 %) se mostraron más eficientes en el uso de la radiación, presentando mayores pendientes en la relación de la materia seca total y radiación fotosintéticamente activa acumulada.

- En la campaña de 2011, el rendimiento comercial del tratamiento de 60 % (de unos 56000 kg ha^{-1}), fue significativamente inferior a los alcanzados por los demás tratamientos, en los cuales fueron unos 20 % superiores al tratamiento de 60 %. En la segunda campaña los rendimientos de los tratamientos de mayor aporte hídrico (120 y 100 %, con alrededor de 68000 kg ha^{-1}) presentaron diferencias significativas con los tratamientos más deficitarios (80 y 60 %) que representaron 72 % del máximo rendimiento alcanzado. En base a estos resultados puede concluirse que la programación de riegos realizada con el criterio del 100% de la ETm se ajusta bien a las condiciones climáticas de la zona estudiada para obtener el máximo de producción, y no parece interesante ninguna aplicación de agua superior.

- La falta de diferencias significativas en el rendimiento del tratamientos de 80 % con los tratamientos de 100 y 120 % en el año 2011, hicieron de este tratamiento el más eficiente en el uso del agua en la primera campaña (11,6 kg m^{-3}). En el 2012, todos los tratamientos presentaron una eficiencia en el uso del agua muy similar (con un valor medio de 7,5 kg m^{-3}). Esto hace pensar que el tratamiento del 80% puede ser una buena solución desde el punto de vista económica en situaciones de disponibilidad de agua limitada o de alto coste.

- Los distintos tratamientos hídricos no influyeron significativamente en los parámetros de calidad de la cosecha, a excepción de los sólidos solubles totales, en que los tratamientos más deficitarios presentaron valores significativamente menores.

6.1 RECOMENDACIONES

El ensayo experimental realizado ha permitido llegar a obtener altos rendimientos de patata comercial, bajo un manejo de riego deficitario, en una región que se caracteriza por la escasez de recursos hídricos. Así, se pueden deducir algunas recomendaciones útiles para el sector productivo como transferencia de resultados de la investigación. Entre ellas se pueden destacar:

- La producción máxima se consigue aplicando entre 80 y 100 % de los requerimientos hídricos del cultivo siguiendo la metodología FAO. Cantidades de agua superiores a dichos aportes no supone un incremento en el rendimiento, obteniendo unos mayores costes de producción. Sin embargo, no se recomienda una aplicación inferior a los 80 % por inducir el cultivo a un preocupante estado de estrés, lo que reproduce una caída importante en el rendimiento total.

- El manejo del riego practicado, mediante un balance hídrico simplificado, ha demostrado que intervalos de riegos superiores a dos días (desde el momento de la plena floración hasta el inicio de la senescencia), puede inducir un estrés hídrico al cultivo. Se recomienda, por tanto, seguir la metodología FAO para la programación de riegos, aunque es necesario un ajuste del coeficiente del cultivo, especialmente importante, a partir de la senescencia, utilizando un Kc de 0,64 en la etapa final del cultivo en lugar del 0,75 teórico recomendado por la FAO.

6.2 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Como complemento al ensayo realizado y para el planteamiento de futuras investigaciones, se propone que las nuevas líneas de trabajo vayan encaminadas en los siguientes aspectos:

- Habiéndose comprobado que con el riego deficitario continuo se alcanzan altos rendimientos, se propone desarrollar un ensayo experimental con riego deficitario controlado por etapas, principalmente a partir del início de la floración y tuberización. Con ello se intentará determinar el momento adecuado de aplicación del déficit, así como cuantificar el rendimiento óptimo económico. Como apoyo al desarrollo de dicho ensayo se podría utilizar el modelo MOPECO desarrollado en el Centro Regional de Estudios del Agua.

- En base a la respuesta de este cultivar (Agria) frente a diferentes condiciones climáticas, se plantea un estudio del crecimiento y el desarrollo del cultivo de la patata en diferentes zonas geográficas mediante el uso de los modelos de simulación de cultivos, ya sea con modelos generales (AquaCrop y CropSyst) o específicos para el cultivo de la patata (SubStor-Potato y LINTUL-potato). Los resultados experimentales y modelos obtenidos también serán de gran utilidad para la validación y calibración de estos modelos de simulación y su posterior transferencia al sector productivo y de gestión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A

Aguiar-Netto, A.O.; Rodrigues, J.D.; Pinho, S.Z. (2000). Análise de crescimento na cultura da batata submetida a diferentes lâminas de irrigação. Pesquisa Agropecuária Brasileira. 35 (5): 901-907.

Aguilar, F.A.A. (2010). Modelos matemáticos no lineales como herramienta para evaluar el crecimiento de tilapia roja (O*reochromis* spp.) y tilapia nilótica (O*reochromis niloticus* var. chitralada)" alimentadas con dietas peletizadas o extruidas. Tesis Doctoral. Departamento de Ciencias para la Producción Animal. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia.

Ahmadvand, G.; Mondani, F.; Golzar, F. (2009). Effect of crop plant density on critical period of weed competition in potato. Scientia Horticulturae. 121: 249−254.

Ahuja, L. R.; Naney, J.W.; Williams, R.D. (1985) Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. Soil Science Society of America Journal. 49: 1100-1105.

Angell, R.F.; Svejcar, T.; Bates, J.; Saliendra, N.Z.; Johnson, D.A. (2001). Bowen ratio and closed chamber carbon dioxide flux measurements over sagebrush steppe vegetation. Agricultural and Forest Meteorology. 108: 153-161.

Al-Jamal, M.S.; Sammis, W.; Ball, M.S.; Smeal, D. (2000). Computing the crop water production function for onion. Agricultural Water Management, 46: 29-41.

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop transpiration: Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56, Rev 1. FAO. Rome, Italy.

Allen, C.B.; Will. R.E.;McGarvey, R.C.; Coyle, D.R.; Coleman, M.D. (2004). Radiation-use efficiency and gas exchange responses to water and nutrient availability in irrigated and fertilized stands of sweetgum and sycamore. Tree Physiology. 25: 191-200.

Allen, R.G.; Pereira, S.L.; Howell, T.A.; Jensen, M.E. (2011a). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. Agricultural Water Management. 98: 899-920.

Allen, R.G.; Pereira, S.L.; Howell, T.A.; Jensen, M.E. (2011b). Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. Agricultural Water Management. 98: 921–929.

Almeida, A.S.; Araújo, F.S.; Souza, G.S. (2010). Determinação da curva parcial de retenção de água de um latossolo vermelho por tensiomêtria. Scientia Plena. 6 (9): 1-5.

Alonso, F. (1996). El cultivo de la patata. 1ª Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Arauzo, M.; Díez, J.A.; Hernáiz, P. (2003). Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. 4: 39-44.

Arauzo, M.; Díez, J.A.; Martínez-Bastida, J.J.; Valladolid, M.; Hernáiz, P. (2007). Comparación de un método directo y un método indirecto para la estimación del drenaje y el balance hídrico en la zona no saturada. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. 3: 77-82.

Arazi, Y.; Wolf, S.; Marani, A. (1993). A prediction of developmental stages in potato plants based on the accumulation of heat units. Agricultural Systems. 43: 35-50.

Arruda, F. B., Júlio Jr., J.; Oliveira, J.B. (1987). Parâmetros de solo para cálculo de água disponível com base na textura do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 11: 11-15

Arya, L. M.; Paris, J.F. (1981). A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristics from particle size distribution and bulk density data. Soil Science Society of America Journal. 45: 1023-1030.

Azzi, G. (1959). Ecología Agraria. Salvat Editores. Madrid-Barcelona, España.

B

Bahramloo, R; Nasseri, A. (2009). Optimum irrigation events for potato cultivar Agria. International Journal of Agriculture & Biology. 11 (6): 712-716.

Balbontín, C.; Calera, A.; González, J.; Campos, S.; López, M.L.; Torres, E. (2011). Comparación de los sistemas covarianza y relación de bowen en la evapotranspiración de un viñedo bajo clima semi-árido. Agrociencia. 45: 87-103.

Ballaré, C.; Scopel, A.; Sánchez, R. (1995). Plant photomorphogenesis in canopies, crop growth and yield. HortScience. 30 (6): 1172-1181.

Barker, D.J.; Ferraro, F.P.; Nave, R.G.; Sulc, R.M.; Lopes, F.; Albrecht, K.A. (2010). Analysis of herbage mass and herbage acumulation rate using Gompertzs equations. Agronomy Journal. 102 (2): 849-857.

Barrera, G.N.; Bassi, E.; Reyes, R.J.; León, A.E.; Ribotta, B.D. (2012). Efectos de diferentes fracciones de harinas de trigo pan obtenidas con molino industrial sobre la calidad de galletitas dulces. Agriscientia. 29 (2): 69-79.

Bastiaanssen, W.G.M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology. 229: 87–100.

Batareno, C. (2001). Didática de la estadística. Grupo de Investigación en Educación Estadística. Universidad de Granada. Granada, España.

Bedogni, M.C.; Capezio, S.; Huarte, M. (2009). Comportamiento frente a estrés hídrico de variedades nativas y especies silvestres de papa. Revista Latinoamericana de La Papa. 15 (1): 72-74.

Begg, J.E.; Turner, N.C.; (1976). Crop water deficits. Advances in Agronomy . 28: 161-217.

Begué, A. (1993). Leaf area index, intercepted photosynthetically active radiation, and spectral vegetation indices: A sensitivity analysis for regular-clumped canopies. Remote Sensing of Environment. 46(1) : 45-59.

Beukema, H.P.; van der Zaag, D.E (1990). Introduction to Potato Production. PUDOC. Wageningen, The Netherlands.

Bezerra, F.M.L.; Angelocci, L.R.; Minami, K. (1999). Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico para a cultura da batata nas condições edafoclimáticas da região de Piracicaba, SP. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 3 (3): 322-326.

Bitelli, M.; Flury, M. (2009). Errors in water retention curves determined with pressure plates. Soil Science Society of America Journal .75 (5): 1453-1460.

Blackman, V.H. (1919). The compound interest law and plant growth. Annales Botanici Fennici. 33: 353-360.

Blank, H. (1975). Optimal irrigation decisions with limited water. Tesis Doctoral. Department Civil and Engineer. Colorado State University. Colorado, United States.

Boegh, E.; Soegaard, H.; Broge, N.; Hasager, C.B.; Jensen, N.O.; Schelde, K.; Thomsen, A. (2002). Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen

concentration, and photosynthetic efficiency in agricultura. Remote Sensing of Environment. 81: 179-193.

Bojacá, C.R.; García, S.J.; Schrevens, E. (2011). Analysis of potato canopy coverage as assessed through digital imagery by nonlinear mixed effects models. Potato Research. 54: 237-252.

Borges, A.I.C. (2008). Interface comparação de curvas de crescimento. Tesis Doctoral. Departamento de Matemática Pura. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Porto-Portugal.

Borrego, F.; Fernández, J.M.; Lopez, A.; Parga, V.M.; Murillo, M.; Carvajal, A. (1999). Correlación y componentes principales de variación en variedades de papa (*Solanum tuberosum L*.). Agronomía Mesoamericana. 10 (2): 01-06.

Borrego, F.; Fernández, J.M.; Lopez, A.; Parga, V.M.; Murillo, M.; Carvajal, A. (2000). Análisis de crecimiento em siete variedades de papa. Agronomía Mesoamericana. 11 (1): 145-149.

Bosque, J.; Vilá, J. (1991). Geografía de España. Tomo VII. Extremadura - Castilla-La Mancha - Madrid. Editorial Planeta. Barcelona, España.

Botella, O. (1993). Análisis del crecimiento y desarrollo del girasol (*Helianthus annuus* L.) oleaginoso, cultivado en segunda cosecha en los regadíos de Albacete, a través de un ensayo de cultivares. Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete-España.

Botella, O.; de Juan, J.A.; Martín de Santa Olalla, F. (1997). Growth, development and yield of five sunflower hybrids. European Journal of Agronomy. 6: 47-59.

Bouma, J. (1989) Using soil survey data for quantitative land evaluation. Soil Sciense. 9: 177-213.

Boyd, N.S.; Gordon, R.; Martin, R.C. (2002). Relationship between leaf area index and ground cover in potato under different management conditions. Potato Research. 45: 117-129.

Bradshaw, J. (2007). Potato breeding strategy.In: Potato Biology and Biotechnology Advances and Perspectives. Ed: Vreugdenhil, D., Bradshaw, J., Gebhardt, C., Govers, F., MacKerron, D.K.L., Taylor, M.A., Ross, H.A. Elsevier. The Netherlands, Amsterdam.

Brito, A.S.; Libardi, P.L.; Mota, J.C.A.; Moraes, S.O. (2009). Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 33: 17-24.

Brody, S. (1945). Bioenergetics and growth. Rheinhold Publishing. New York, United States

Briggs, G.E.; Kidd, F.; West, C. (1920). Quantitative analysis of plant growth I. Annals of Applied Biology . 7: 103-123.

Brotzge, J.A.; Crowford, K.C. (2003). Examination of the surface energy budget: a comparison of eddy correlation and bowen ratio measurement systems. Journal of hydrometeorology. 4: 160-178.

Brown, H.E.; Moot, D.J.; Teixeira, E.I. (2006). Radiation use efficiency and biomass partitioning of lucerne (*Medicago sativa*) in a temperate climate. European Journal of Agronomy. 25: 319-327.

Bruggink, G.T.; Heuvelink, E. (1987). Influence of ligth on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants in the greenhouse: Effects on relative growth rate, net assimilation rate and leaf area ratio. Scientia Hortuculturae. 31: 161-174.

C

Cadersa, Y.; Govinden, N. (2000). Relationship between canopy cover and light interception in potato in a tropical climate. In: Proceedings of the Fourth Annual Meeting of Agricultural Scientists. Eds: Lalouette, J.A.; Bachraz, D.Y.; Sukurdeep N. Réduit, Mauritius: Food and Agricultural Research Council.

Caicedo, D.R.; Tellez, M.S.R.; Molano, L.E.R.; López, C.E.N. (2010). Efecto de diferentes niveles y épocas de defoliación sobre El rendimiento de la papa (*Solanum tuberosum* L. cv. Parda Pastusa). Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín. 63(2): 5521-5531.

Calbo, A.G.; Silva, W.L.C.; Torres, A.C. (1989). Comparação de modelos e estratégias para análise de crescimento. Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal. 1 (1): 1-7.

Camargo, D.C.; Córcoles, J.I.; Orttega, J.F.; Montoya, F. (2012). Calibração da sonda de capacitância enviroscan®. Irriga. (Número especial): 27-39.

Campbell, G. S.; Mulla, D.J. (1990). Measurement of soil water content and potential. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 30: 127-142.

Cao, W.; Tibbits, T.W. (1998). Response of potatoes to nitrogen concentrations differ with nitrogen forms. Journal of Plant Nutrition. 21 (4): 615-623.

Cárdenas, M. (1956). Notas sobre la importancia fitogenética de las especies silvestres de papas. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Cochambamba, Bolívia.

Carducci, C.E.; Oliveira, G.C.; Curi, N.; Severiano, E.C.; Zeviani, W.M. (2012). Relations of clay fraction mineralogy, structure and water retention in oxidic latosols (oxisols) from the brazilian cerrado biome. InTech. 1: 149-170.

Carrasco, M.; Ortega-Farías, S. (2008). Evaluation of a model to simulate net radiation over a vineyard cv. cabernet sauvignon. Chilean Journal Of Agricultural Research. 68: 156-165.

Carretero, D.Z.R. (2011). Integración de un sistema UAV con control autónomo en un equipo aéreo para agricultura de precisión. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencia e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima-Perú.

Casanova, J.J.; Evett, S.R.; Schwartz, R.C. (2011). Design and Testing of Access-Tube TDR Soil Water Sensor. Annual International Meeting Sponsored by ASABE. Paper No. 11.

Casaroli, D.; Fagan, E.B.; Simin, J.; Medeiros, S.P.; Manfron, P.A.; Neto, D.D.; van Lier, Q.J.; Müller, L.; Martin, T.N. (2007). Radiação solar e aspectos fisiológicos na cultura de soja - uma revisão. Revista da FZVA. 14 (2): 102-120.

Casaroli, D.; van Lier, Q. (2008) Critérios para a determinação da capacidade de vaso. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32: 59-66.

Castallanos, M.S.; Abril, M.S.; López, C.E.Ñ. (2010). Análisis del crecimiento y relación fuente-demanda de cuatro variedades de papa (Solanum tuberosum L.) en el municipio de Zipaquirá (Cundinamarca, Colombia). Revista Facultad Nacional de Agronomía – Medellín. 63 (1): 5253-5266.

Castrignano, A.M.; Rubino, P.; Tarantino, E.; Cilardi, A.M.; (1987). Confronto trae due metodi: clássico e funcionale, per ló studio dell,accrescimento del pomodoro. Rivista di Agronomia. 21: 282-292.

Clawson, K.L.; Specht, J.E.; Blad, B.L. (1986). Growth analysis of soybean isolines differing in pubescence density. Agronomy Journal. 78: 164-172.

Collins, W. (1977). Comparison of growth and tuber desenvelopment in three potato cultivars with diverse canopy size. Canadian Journal of Plant Science. 57: 797-801.

Collino, D.J.; Dardanelli, J.L.; Sereno, R.; Racca, R.W. (2001). Physiological responses of argentine peanut varieties to water stress. Light intercetption, radiation use efficient and partitioning of assimilates. Fidl Crop Research. 70: 177-184.

Collino, D.J.; Dardanelli, J.L.; de Luca, M.J.; Racca, R.W. (2005). Temperature and water availability effects on radiation and water use efficiencies in alfalfa (*Medicago sativa* L.). Australian Journal of Experimental Agriculture. 45: 383-390.

Contreras, A. (2002). Ecofisiología del rendimiento de la planta de papa. 3º Seminario Internacional de la papa, Medellín, Colombia

Córcoles, J.I.; Ortega, J.F.; Hernández, D.; Moreno, M.A. (2013). Use of digital photography from unmanned aerial vehicles for estimation of leaf area index in onion (Allium cepa L.). European Journal of Agronomy. 45: 96-104.

Corominas, J. (2010). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. Ingeniería del Agua. 17 (3): 219-233.

Cosby, B. J., Hornberger, G.M.; Clapp, R.B.; Ginn, T.R. (1984). A statistical exploration of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. Water Resources Research. 20: 682-690

Costa, S.C. (2003). Modelos lienares generalizados mistos para dados longitudinais. Tesis Doctoral. Escola Superior de Agricultura Luiz de queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, Brasil.

D

Dar, W.D.; Rosario, D.A. (1981). Response of white potato (*Solanum tuberosum* L.) to moisture stress. Philippine Agriculturist, Laguna. 64: 125-134.

de Juan, J.A.; Martin de Santa Olalla, F.J.; Fabeiro, C. (1992). Respuesta del cultivo de la cebolla sometido a diferentes programaciones de riego. Hortofruticultura. 10: 49 – 56.

de la Casa, A.; Ovando, G.; Bressanini, L.; Rodriguéz, A.; Martinéz, J. (2007). Uso del índice de área foliar y del porcentaje de cobertura del suelo para estimar la radiación interceptada en papa. Agricultura Técnica. 67 (1): 78-85.

de la Casa, A.; Ovando, G.; Bressanini, L.; Martinéz, J.; Rodriguéz, A. (2011). Eficiencia em el uso de la radiación em papa estimada a apartir de la cobertura del follaje. Agriscientia. 28: 21-30.

de la Morena, I.; Guillén, A.; Garcia del Moral, F. (1994). Yield development in potatoes as influenced by cultivar and the timing and level of nitrogen fetilization. Amerian Potato Journal. 71(3): 165-173.

Dean, B.B. (1994). Managing the potao production system. The Haworth Press. New York, United States.

Dechmi, F.; Playan, E.; Cavero, J.; Martinez-Cob, A.; Faci, J.M. (2001). Evaluacion del riego por aspersion en cobertura total en una parcela de maiz. Actas del XIX Congreso Nacional de Riegos, 12 – 14 junio, Zaragoza, Espana.

Dechimi, F.; Playán, E.; Faci, J.M.; Tejero, M.; Bercero, A. (2003a). Analysis of an irrigation district in northeastern Spain II. Irrigation evaluation, simulation and scheduling. Agricultural Water Management. 61: 93-109.

Dechimi, F.; Playán, E.; Cavero, J.; Faci, J.M.; Martinéz-Cob, A. (2003b). Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (Zea mays). Irrigation Science. 22: 67-77.

Dechmi, F., Playan, E., Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J. M. (2004). Couple crop and solid set sprinkler simulation model. I: Model development. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. 130 (6): 499-510.

Dehghanisanij, H; Nakhjavani, M.; Tahiri, A.Z.; ANYOJI, H. (2009). Assessment of wheat and maize water productivities and production function for cropping system decisions in arid and semiarid regions. Irrigation and Drainage. 58: 105-115

Delgado, F.; Barreto, L. (1988). Una aproximación matemática para la elaboración de curvas de retención de humedad en suelos representativos de los llanos occidentales. Revista Unellez de Ciencia y Tecnología. 6: 45-50.

Dellai, J. (2007). Densidade de plantio e poda da parte aérea na partição da massa seca de plantas de batata em hidroponia. Dissertação de Mestrado. Departamento de Produção Vegetal, Universidade de Santa Maria. Rio Grande do Sul- Brasil.

Días, C.; de la Fuente, I. (2005). Razonamiento sobre probabilidad condicional e implicaciones para la enseñanza de la estadística. Epsilon. 59: 245-260.

Dogliotti, S.; Colnago, P.; Galván, G.; Aldabe, L. (2011). Bases Fisiológicas del crecimiento y desarrollo de los principales cultivos hortícolas. Ed: Facultad de Agronomía – Universidad de la República. Montevideo, Uruguay.

Domínguez, A.; Ortega, F.; Martínez, A.; Tarjuelo, J.M. (2007). El uso del agua y su gestion en Castilla – La Mancha. En: Economia del agua, 1– 26. Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha, Madrid, Espana.

Domínguez, A.; Martínez, R.S.; de Juan, J.A.; Martínez-Romero,A.; Tarjuelo, J.M. (2012). Simulation of maize crop behavior under deficit irrigation using MOPECO model in a semi-arid environment. Agricultural Water Management. 107: 42-53.

Donald, C.M.; (1962). In search of yield. Journal of the Australian Institute of Agricultural Science. 28: 171-178.

Doorenbos, J.; Kassam, A.H. (1986). Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO, Serie Riegos y Drenajes, revista nº 33. Roma. Italia.

Dripps, J.; Smilowitz, Z. (1989). Growth analysis of potato plants damaged by Colorado potato beetle (Coleoptera: *Chrysomelidae*) at different plant growth stages. Environmental Entomology. 18 (5): 854-867.

Duarte, S.N. (1999). Efeitos do horário e da lâmina de irrigação na cultura da batata (*Solanum tuberosum* L.). Trabjo fin de Master. Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, Brasil.

Durão, A.M.M. (2008). Persepção do risco ambiental entre os agricultores de regadio na área de influência da barragem do Alqueva. Tesis Doctoral. ISCTE, Instituto Universitário de Lisboa. Lisboa-Portugal.

E

Ekanayake, I.J. (1994). Estudios sobre el estres por sequia y necesidades de riego de la papa. Guía de investigación 30, Centro Internacional de la Papa. Lima, Perú.

Eldredge, E.P.; Shock, C.C.; Stieber, T.D. (1993). Calibration of granular matrix sensor for irrigation management. Agronomy Journal. 85 (6): 1228-1232.

Errebhi, M.; Rosen, C.J.; Laver, F.I.; Martin, M.W.; Bamberg, J.B. (1999). Evaluation of tuber-bearing species of nitrogen use efficient and biomass partitioning. American Journal of Potato Research. 76: 143-151.

Evans, C. (1972). The quantitative analysis and design of experiments. Agricultural Research Council. Reading University.

Evans, R. (2001). Center pivot irrigation. http://www.sidney.ars.usda.gov/personnel/pdf (15/02/2012).

Evett, S.R.; Steiner, J.L. (1995). Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. Soil Science Society of America Journal . 59: 961-968.

Evett, S.R.; Schwartz, R.C.; Casanova, J.J.; Heng, L.K. (2012). Soil water sensing for water balance, ET and WUE. Agricultural Water Management. 104: 1-9.

F

Fabeiro, C. (1995). Análisis del crecimiento y del rendimiento del cultivo de soja (*Glicinemax* (L.) Meer.) Sometido a diferentes tratamientos hídricos en la zona de los Llanos de Albacete. Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete-España.

Fabeiro, C; Martín de Santa Olalla, F; de Juan, J.A. (2001). Yeld and size of deficit irrigated potatoes. Agricultural Water Managet. 48: 255-266.

Faci, J. M.; Salvador, R.; Playán, E.; Sourell, H. (2001). Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE. 127 (4): 224-236.

Fageria, N.K., Baligar, V.C.; Jones, C.A. (1991). Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. Marcel Dekker. New York, United States.

FAOSTAT (2009). Datos agricolas de FAOSTAT. Bases de datos estadisticos de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentacion. http://faostat.fao.org/faostat/form?collection=Production.Crops.Primary&Domain=Production&servlet=1&hasbulk=&version=ext&language=ES (10/01/2012)

Fares, A.; Alva, A.K. (2000). Soil water components based on capacitance probes in a sandy soil. Soil Science Society of America Journal. 64: 311-318.

Feltran, J.C.; Lemos, L.B.; Vieites, R.L. (2004). Technological quality and utilization of potato tubers. Scientia Agrícola. 61 (6): 598-603.

Ferreira, T.C.; Gonçalves, D.A (2007). Crop-yield/water-use production funtions of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) growth under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate. Agricultural Water Managet. 90: 45-55.

Fernández, S.C. (2008). Morfisiologia da cultura da batata submetida a diferentes regimes hídricos. Tesis Doctoral. Centro de Ciências Rurais. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, Brasil.

Fisher, R.A. (1920). Some remarks on the methods formulated in a recent article on The quantitative analysis of plant growth. Annals of Applied Biology. 7: 367-372.

Fleisher, D.H.; Timlin, D.J. (2006). Modeling expansion of individual leaves in the potato canopy. Agricultural and Forest Meteorology. 139: 84-93.

Fleisher, D.H.; Timlin, D.J.; Reddy, V.R. (2008). Elevated carbon dioxide and water stress effects on potato canopy gas exchange, water use, and productivity. Agricultural and Forest Meteorology. 148: 1109-1122.

Fragoso, R.; Marques, C. (2006). A gestão económica da água na agricultura: perspectivas de utilização no Alentejo. Economia e Sociologia. (81): 131-152.

France, J.; Thornley, J.H.M. (1984). Mathematical models in agriculture. Butterworth & Co. Publisher. London. United Kingdom.

França, M.G.O.; Thi, A.T.P.; Pimentel, C.; Rossiello, R.O.P.; Zuily-Fodil, Y.; Laffray, D. (2000). Differences in growth and water relations among *Phaseolus vulgaris* cultivars in response to induced drought stress. Environmental and Experimental Botany. 43: 227-237.

G

Gaitán, A.; González, M. (1999). Análisis de crecimiento y desarrollo para cuatro variedades de papa (Solanum tuberosum) bajo condiciones de la Sabana de Bogotá. Trabajo de Grado Ingeniería Agronómica. Facultad de Agronomía. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá-Colombia.

Gallo, K.P.; Dauhtry, C.S.T.; Wiegand, C.L. (1993). Errors in measuring absorbed radiation and g crop radiation use efficiency. Agronomy Journal. 85: 1222-1228.

Gardner, R.G. (1990). Mountain Delight tomato; NC 8288 tomato breeding line. HortScience. 25: 989-990.

Gardner, F.P.; Pearce, R.B; Mitchell, R.L. (1990). Carbon fixation by crop canopies. In: Physiology of crop plants. University Press. Iowa, United States.

Geremew, E.B., Steyn, J.M.; Annandale, J.G. (2007). Evaluation of growth performance and dry matter partitioning of four processing potato (Solanum tuberosum) cultivars. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science. 35: 385-393.

Geroy, I.J.; Gribb, M.M.; Marshall, H.P.; Chandler, D.G.; Benner, S.G.; McNamara, J.P. (2011). Aspect influences on soil water retention and storage. Hydrological Processes. 25: 3836–3842.

Giarola, N.F.B.; Silva, A.P.; Imhoff, S. (2002). Relações entre propriedades físicas e características de solos da Região Sul do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 26: 885-893.

Gil, M.; Garrido, A.; Gómez-Ramos, A. (2009). Análisis de la productividad de la tierra y del agua en el regadío español. In: La economía del agua de riego en España. Ed: Cajamar Caja Rural. Almeria, España. 95-114.

Giletto, C.M.; Echeverria, H.E.; Sadras, V. (2003). Fertilización nitrogenada de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el sudeste bonaerense. Ciencia del Suelo. 21 (2): 44-51.

Gokmen, M.; Vekerdy, Z.; Verhoef, A.; Verhoef, W.; Batelaan, O.; van der Tol, C. (2012). Integration of soil moisture in SEBS for improving evapotranspiration estimation under water stress conditions. Remote Sensing of Environment. 121: 261-274.

Gordon, R.; Brown, D.M.; Dixon, M.A. (1997). Estimating potato leaf area index for specific cultivars. Potato Research. 40: 251-266.

Gosse, G.; Varlet-Grancher, C.; Bonhomme, R.; Chartier, M.; Allirand, J.M.; Lemaire, G. (1986). Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. Agronomie. 6 (1): 47-56.

Gregory, F.G. (1926). The effect to climatic conditions on the growth barley. Annals of Botany. 40: 1-26.

Gregson, K.; Hector, D.J.; McGowan, M. (1987). A one-parameter model for the soil water characteristics. Journal of Soil Science. 38: 483-486.

Grewal, J.S.; Singh, S.N. (1980). Effect of potassium nutrition on the frost damage to potato plants and yield in alluvial soils of Punjab (India). Plant and Soil 57(1): 105-110.

Griffin, T.S., Johnson, B.S., Ritchie, J.T. (1993). A simulation model for potato growth and development: SUBSTOR-Potato. IBSNAT Research report series 02-05/93 (500).

Grimm, E.L. (2007). efeito de diferentes níveis de irrigação na produtividade e ocorrência de requeima na cultura da batata. Tesis Doctoral. Departamento de Engenharia Agrícola. Universidade Federal de Santa Maria. Rio Grande do Sul, Brasil.

Guerra, C.W.; Cabrera, A.; Fernández, L. (2003). Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. (1). 2003.

Gupta, S. C.; Larson, W.E. (1979). Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resources Research. 15: 1633-1635

H

Hack, H.; Gall, H.; Klemke, T.; Klose, R.; Meier, U.; Stauss, R.; Witzenberger, A. (1993). Phänologische Entwicklungsstadien der Kartoffel (Solanum tuberosum L.). Codierung und Beschreibung nach der erweiterten BBCH-Skala mit Abbildungen. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. 45 (1): 11-19.

Hall, W.A.; Butcher, W.S. (1968). Optimal timing of irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division. 94: 267-275.

Hammecker, C.; Antonino, A.C.D.; Maeght, J.L.; Boivin, P. (2003). Experimental and numerical study of water flow in soil under irrigation in northern Senegal: evidence of air entrapment. European Journal of Soil Science. 54: 491-503.

Hang, A.N.; Miller, D.E. (1986). Yield and physiological responses of potatoes to deficit, high frequency sprinkler irrigation. Agronomy Journal. 78: 436-440.

Hanks, R.J. (1974). Model of predicting plant yield as influenced water use. Agronomy Journal. 66: 660-665.

Harris, P.M. (1978). The potato crop: the scientific basis for improvement. Ed: P.M. Harris. Chapman and Hall, London.

Haverkamp, R.; Parlange, J.Y. (1986). Predicting the water retention curve from particle size distribution. Soil Sciense. 142: 325-339.

Haverkort, A.J.; Bicamumpaka, M. (1986). Correlation between intercepted radiation and yield of potato crop infested by Phytophthora infestans in central Africa. Neth. J. P1. Path. 92: 239-247.

Hawkers, J. G. (1990). Potato: evolution, biodiversity and genetic resourges. Smithsonian Institution Press. London. United Kingdom.

Heggenstaller, A.H.; Liebman, M.; Anex, R.P. (2009). Growth analysis of biomass production in sole-crop and double-crop corn systems. Crop Science. 49: 2215-2224

Heilman, J.L.; McInnes, K.J.; Savage, M.J.; Gesch, R.W.; Lascano, R.J. (1994). Saoil and canopy energy balances in a West Texas vineyard. . Agricultural and Forest Meteorology. 71: 99-114.

Hidaldo, J.; Pastor, M.; Hidalgo, J.C.. (2003). Evaluación de una sonda FDR para la estimación de la evolución del contenido de agua en el suelo y para el control de riegos en olivar. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo 4: 171-176.

Hijmans, R.J; Spooner, D.M. (2001). Geographic distribution of wild potato species. American Journal of Botany. 11(88): 2101-2112.

Hiler, E.A.; Clarck, R.N. (1971). Stress day index to characterize effects of water stress on crop yield. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 14: 757-761.

Hillel, D. (1998). Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations. Academic Press. San Diego, United Sate.

Hsiao, T.C. (1973). Plant responses to water stress. Annual Review of Plant Physiology. 24: 519-570.

Hooker, R.H. (1907). Correlation of the eather and crops. Journal of the Royal Statistical Society. 70: 1-51

Huamnán, Z. (1986). Botánica sistemática y morfología de la papa. 2ª Ed. Centro Internacional de la papa (boletín de información). Lima, Perú.

Hubbell, J.M.; Sisson, J.B. (1998). Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. Soil Science 163 (4): 271-277.

Huber, S.C.; Huber, J.L. (1992). Role of sucrose-phosphate synthase in sucrose metabolism in leaves. Plant Physiology. 99: 1275-1278.

Hughes, A.P.; Freeman, J. (1967). Growth analysis using requent small harvest. Journal of Applied Ecology. 4: 445-560.

Hunt, R. (1978). Plant growth analysis. Ed: Edward Arnold. London, United Kingdom.

Hunt, R. (1990). Basic growth analysis. Plant growth analysis begginers. Ed: Unwin Hyman. London, United Kingdom.

I

Inmaan-Bamber, N.G.; McGlinchev, M.G. (2003). Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. Field Crops Research. 83: 125-138.

IGME (1988). Mapa geologico de Espana a escala 1:200.000. Sintesis de la cartografia existente. Albacete – Onteniente. Hoja 63. 2ª Ed. Instituto Geologico y Minero de Espana, Madrid, Espana.

J

Jaleel, C.A.; Gopi, R.; Sankar, B.; Gomathinayagam, M.; Panneerselvam, R. (2008). Differential responses in water use efficiency in two varieties of Catharanthus roseus under drought stress. Comptes rendus Biologies. 331: 42-47.

Jayanthi, H.; Neale, C.M.U.; Wright, J.L. (2007). Development and validation of canopy reflectance-based crop coefficient for potato. Agricultural Water Management. 88: 235-246.

Jefferies, R.A.; Mackerron, K.L. (1993). Response of potato genotypes to drought. II Leaf area index, growth and yield. Annals of Applied Biology. 122: 105-112.

Jesen, M.E. (1968). Water consumption by agricultural plants. In: Water deficits and plant growth, Ed: Kozlowski vol. II. Academin Press. New York, United Satates.

Jiménez, M.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M.; Ortega, J.F. (2010). Effect of irrigation uniformity on evapotranspiration and onion yield. Journal of Agricultural Science. 148: 139-157.

Jin, K.; Cornelis, W.M.; Schiettecatte, W.; Lu, J.; Yao, Y.; Wu, H.; Gabriels, D.; de Neve, S.; Cai, D.; Jin, J.; Hartmann, R. (2007). Effects of different management practices on the soil–water balance and crop yield for improved dryland farming in the Chinese Loess Plateau. Soil & Tillage Research . 96: 131–144.

Jongschaap, R.E.E.; Booij, R. (2004). Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 5: 205-218.

K

Kashyap, P.S.; Panda, R.K. (2003). Effest of irrigation scheduling on potato crop parameters under water stress conditions. Agricultural Water Management. 59: 49-66.

Katsvairo, T.W.; Wright, D.L.; Marois, J.J.; Rich, J.R.; Wiatrak, P.P. (2009). Comparative plant growth and development in two cotton rotations under irrigated and not-irrigated conditions. Crop Science. 49: 2233-2245.

Kawakami, J.; Iwama, K. (2009). Comparação do crescimento e produtividade a campo entre microtubérculos de batata de diferentes tamanhos. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia. 2 (1): 173-178.

Khalil, M.; Sakai, M.; Mizoguchi, M.; Miyazaki, T. (2003). Current and prospective applications of Zero Flux Plane (ZFP) method. Journal of the Japanese Society of Soil Physics. 95: 75–90.

Kimura, R.; Fan, J.; Zhang, X.; Takayama, N.; Kamichika, M.; Matsouka, N. (2006). Evapotranspiration over the grassland field in the liudaogou basin of the loess plateau, China. Acta Oecologica. 29: 45–53.

Kimura, R.; Bai, L.; Fran, J.; Takayama, N.; Kinokidani, O. (2007). Evapo-transpiration estimation over the river basin of the Loess Plateau of China based on remote sensing. Journal of Arid Environments. 68:53-65.

King, B.A.; Wall, R.W.; Karsky, T.F. (2009). Center pivot irrigation system for independent site specific management of water and chemical application. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 25 (2): 187-198.

Kleinkopf, G.E. (1982). In: Crop water relations. Ed: Teare, I.D.; Peet, M.M. New Yor, United States. 1982. p.287-305.

Koning, A.N.M. (1994). Development and dry matter distribution in glasshouse tomato: a quantitative approach. Tesis Doctoral. Agricultural University. Wageningen-The Netherlands.

Koohafkan, P; STEWART, B.A. (2008). Water and cereals in drylands. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan, London-Sterling, United Kingdom.

Kooman, P.L., Haverkort, A.J. (1995). Modelling development and growth of the potato crop. In: Potato ecology and modelling of crops under conditions limiting growth. Ed: Haverkort, A.J., MacKerron D.K.L. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. Amsterdam.

Kooman, P.L.; Fahem, M.; Tegera, P.; Haverkort, A.J. (1996). Effects of climate on different potato genotypes 1. Radiation interception, total and tuber dry matter production. European Journal of Agronomy. 5: 198-205.

Kooman, P.L.; Fahem, M.; Tegera, P.; Haverkort, A.J. (1996a). Effects of climate on different potato genotypes 2. Dry matter allocation and duration of the growth cycle. European Journal of Agronomy. 5: 207-217.

Kramer, P.J. (1974). Relaciones hídricas del suelo y plantas: una síntesis moderna. Ed. Edutex. México.

Kravchenko, A.; Zhang, R.D. (1998). Estimating the soil water retention from particle size distributions: a fractal approach. Soil Science. 163: 171-179.

Krudev, T.G. (1994). Água, vida das plantas. Cone Editora, São Paulo, Brasil.

Kumar, S., Malik, R.S.; Dahiya, I.S. (1985). Influence of different organic wastes upon water retention, transmission and contact characteristics of sandy soils. Soil Research. 23: 131-136.

L

Lahlou, O.; Ledent, J-F. (2005). Root mass and depth, stolons and roots formed on stolons in four cultivars of potato under water stress. European Journal of Agronomy. 22: 159-173.

Lafta, A.M.; Lorenzen, J.H. (1995). Effect of high temperature on plant growth and carbohydrate metabolism in potato. Plant Physiology. 109: 637-643.

Lagos, L.O.; Martin, D.L.; Verma, S.B.; Suyker, A.; Irmak, S. (2009). Surface energy balance model of transpiration from variable canopy cover and evaporation from residue-covered or bare-soil systems. Irrigation Science. 28: 51-64.

Liu, W.Z.; Hunsaker, D.J.; Li, Y,S.; Xie, X.Q.; Wall, G.W. (2002). Interrelations of yield, evapotranspiration, and water use efficiency from marginal analysis of water production functions. Agricultural Water Management. 56: 143-151.

Liu, F.; Shahnazari, A.; Andersen, M.N.; Jacobsen, S-R.; Jensen, C.R. (2006). Physiological responses of potato (*Solanum tuberosum* L.) to partial root-zone drying: ABA signalling, leaf gas exchange, and water use efficiency. Journal of Experimental Botany. 57 (14): 3727-3735.

Loon, C.D. (1981). The effect of water stress on potato growth, development and yield. American Potato Journal. 58: 51-69.

López, S.; France, J.; Gerrits, W.J.; Dhanoa, M.S.; Humphries, D.J.; Dijkstra, J.A. (2000). A generalizad Michaelis-Menten equation for the analysis oj growth. Journal of Animal Science. 8: 1816-1828.

López, A., Crende, P.; Castelao, A. (2005). Uso del TDR en ensayos de movimiento de agua sobre columnas de suelo inalterado. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. 7: 109-114.

López, A. (2012). Diseño, construcción y control de un hexacóptero en plataforma de prueba. Trabajo Fin de Carrera. ETSII. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena-Epaña.

López, H. (2004). Modelizacion de la respuesta agronomica del cultivo del maiz (Zea mays, L.) a la dosis de nitrogeno, Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, Espana

Losavio, M.; Mastrorilli, M.; Scarascia, M.E.V. (1985). Il girasole nella zona mediterránea: Architetura e accrescimento della coltura. Ann. Ist. Sper. Agron. 16: 83-97.

Lynch, D.R.; Foroud, N.; Kozub, G.C.; Farries, B.C. (1995). The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties. American Potato Journal. 72: 375–386.

M

Malek, E.; Bingham, G.E. (1993). Comparison of the Bowen Ratio energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration. Journal of Hidrology. 146: 209-220.

Malek, E. (1994). Calibration of the Penman wind function using the Bowen ratio energy balance methods. Journal of Hidrology. 163: 289-298.

Mansfield, T.A.; Davies, W.J. (1985). Mechanisms for leaf control of gas exchange. BioScience. 35.(3): 158-164.

MARM, (2009). Anuario de estadística 2010. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estad-publicaciones/anuario-de-estadistica. (10/01/2012)

Maroto, J.V. (1995). Horticultura Herbacea Especial. 4ª Ed. Mundi-Prensa. Madrid, España.

Marthaler, H.P.,Vogelsanger, W.; Richard, F.; Wierenga, P.J. (1983). A pressure transducer for field tensiometers. Soil Science Society of America Journal. 47: 624-627.

McCann, I.R.; Kincaid, D.C.; Wang, D. (1992). Operational characteristics of the watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 8 (5): 603-609.

McKerron, D.K.L., Waister, P. D. (1985). A simple model of potato growth and yield. 1. Model development and sensitivity analysis. Agricultural and Forest Meteorology. 34: 241-52.

McLean, R.; Sri Ranjan R.; Klassen, G. (2000). Spray evaporation losses from sprinklerirrigation system. Canadian Aggricultural Engineering. 42 (1): 1.1-1.15.

McMaster, G.M.; Wilhelm, W. (1997). Growing degree-days: one equation, two Interpretations. Agricultural and Forest Meteorology. 87: 291-300.

Mead, R.M.; Ayars, J.E.; Liu, J. (1995). Evaluating the influence of soil texture, bulk density and soil water salinity on a capacitance probe calibration. ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 95.

Medeiros, J.F.; Silva, M.C.C.; Sarmento, D.H.A.; Barros, A.D. (2007). Crescimento do meloeiro cultivado sob diferentes níveis de salinidade, com e sem cobertura do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. 11 (3): 248-255.

Meier, U.; Bleiholder, H.; Buhr, L.; Feller, C.; Hack, H.; Heß, M.; Lancashire, P.D.; Schnock, U.; Stauß, R.; van den Boom, T.; Weber, E.; werger, P. (2009). The BBCH system to coding the phenological growth stages of plants – history and publications. Journal Für Kulturpflanzen. 61 (2): 41-52.

Meiss, L.M.; Cienfuegos, M.X.R; Galdo, E.; Botelou, J.L.G.; Ruiz, A.B; Perez, D.; Ríos, M.A.; Déz-Rojo, J.A.; López-Perez, L.; Robertson, E.S.; Linage, J.L. (2008). La patata en España. Historia y agroecologia del tubérculo. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. España.

Meloun, M.; Militky, J. (1996). Sbírka úloh, Statistické zpracování experimentálnich dat. Universita Pardubice. Pardubice, Czech Republic.

Mercado-Flores, J.; Orozco, M.; Soto, G.; Mosqueda, C.; González, S. (2010). Evaluación de la vida de anaquel de diferentes variedades de xoconostle en fresco (opuntia spp) del suroeste del estado de Guanajuato. XII Congreso Nacional De Ciencia Y Tecnologia De Alimentos. Guanajuato, Gto.

Mermoud, A.; Tamini, T.D.; Yacouba, H. (2005). Impacts of different irrigation schedules on the water balance components of an onion crop in a semi-arid zone. Agricultural Water Management. 77: 282–295.

Merrian J.L.; Keller J. (1978). Farm Irrigation System evaluation: a guide for management. Utah State University, Logan. Utah, United States.

Midmore, D.J. (1988). Fisiología de la planta de papa bajo condiciones de clima cálido. Centro Internacional de la papa (guía de investicación CIP 24). Lima, Perú.

Mills, A. (2002). Effects of polyacrylamide (PAM) and gypsum on irrigated and dryland potatoes (*Solanum tuberosum* L.). Tesis Doctoral. Lincoln University. Lincoln - New Zealand.

Minet, J.; Lambot, S.; Delaide, G.; Huisman, J.A.; Vereecken, H.; Vanclooster, M. (2010). A Generalized frequency domain reflectometry modeling technique for soil electrical properies determinatinon. Vadose Zone Journal. 9: 1063-1072.

Minhas, B.S.; Parikh, K.S.; Srinivasan, T.N. (1974). Towards the structure of a production for wheat yields with dated inputs of irrigation water. Water Resources Research. 10: 383-393.

Mitscherlich, E.A. (1919). Das gesetz dês pflanzenwachstums. Landwirtsch Jahrb. 53: 167-182.

Miyamoto, T.; Fukami, K.; Chikushi, J. (2012). Simultaneous measurement of soil water and soil hardness using a modified time domain reflectometry probe and a conventional cone penetrometer. Soil Use and Management. 28: 240–248.

Mondani, F.; Golzard, F.; Ahmadvand, G.; Ghorbani, R.; Moradi, R. (2012). Influence of Weed Competition on Potato Growth, Production and Radiation Use Efficiency. Notulae Scientia Biologicae. 3 (3): 42-52.

Montero J., Tarjuelo J.M., Tébar J.I, Lozano F; Honrubia F.T. (1997). Análisis de la distribución de agua en riegos con equipos pivote. XV Congreso Nacional de Riegos y Drenajes. Lérida, 25-27 de Junio de 1997. Asociación Española de Riegos y Drenajes, Madrid, España.

Montero, J.; Tarjuelo, J. M.; Carrión, P. (2003). Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropluviometer. Irrigation Science. 22: 47-56.

Monteiro, A.; Henriques, I.; Moreira, I. (2011). Critical period for weed control in potatoes in the huambo province (Angola). Planta Daninha. 29 (2): 351-362.

Montoya, F. (2012). Análisis y modelación del proceso de emergencia de un cultivo de patata de regadío en condiciones semiáridas. Trabajo fin de Master. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete, España.

Mora-Aguilar, R.; Cereceres, J.O.; Peña, A.R.; Castillo, M.C.M; León, M.A.T.; Saldaña, H.L. (2006). Índices de eficiencia de genotipos de papa establecidos en condiciones de secano. Revista Champino Serie Horticultura. 12 (1): 85-94.

Moreira, J.A.A. (1993). Efeitos da tensão da água no solo e do parcelamento da adubação nitrogenada, sobre o crescimento e a produtividade do feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris* L.). Tesis Doctoral. FCA. Universidade Estadual Paulista. Botucatu, Brasil.

Morgan, K.T.; Parsons, L.R.; Wheaton, T.A.; Pitts, D.J.; Obreza, T.A. (1999). Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. Soil Science Society of America Journal. 63: 987-989.

Moura, E.G.; Albuquerque, J.M.; Aguiar, A.C.F. (2008). Growth and productivity of corn as affected by mulching and tillage in alley cropping systems. Scientia Agricola. 65 (2): 204-208.

N

Nasseri, A.; Bahramloo, R. (2009). Potato cultivar marfuna yield and water use efficiency responses to early-season water stress. International Journal Of Agriculture & Biology. 11 (2): 201-204.

NIVAP (2011). Catálogo Holandés de Variedades de Patata de 2011. Netherlands Potato Consultative Foundation. http://www.potato.nl/es/sobre_patatas/cat%E1logo_de_siembra (15/04/2012).

Nolz, R.; Kammerer, G.; Cepuder. P. (2013). Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring Network. Agricultural Water Management. 116: 12– 20.

Nourian, F.; Ramaswamy, H.S.; Kushalappa, A.C. (2003). Kinetic changes in cooking quality of potatoes stored at different temperatures. Journal of Food Engineering. 60 (3). 257-266.

Novales, A. (2008). La bondad de ajuste del modelo de regresión lineal simple. Departamento de Economía Cuantitativa. Universidad Complutense.

Numberg, P.L.; Pinto, C.A.B.P.; Lambert, E.S.; Menezes, C.B. (1999). Simuñação de danos causados por inseto na planta de batata por meio de desfolhamento artificial. Ciencia e Agrotecnologia. 23 (2): 468-472.

Nuth, M.; Laloui, L. (2008). Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils. Computers and Geotechnics 35: 835–844.

Nyhan, J.W.; Drennon, B.J. (1990). "Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution." Soil Science Society of America Journal. 54: 293-296.

O

Ochoa, C. M. (1984). Solanum Hygrotermicum, new potato species cultivated in the lowlands of Peru. Economic Botany. 38(1): 128-133.

Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes-Ibarra, E.; Slack, D.C.; Carrillo, M. (2004). Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. Irrigation and Drainage. 53: 251-261.

Olioso, A.; Ortega-Farías, S.; Valdés, H.; Antonioletti. R. (2005). Estimación de la evapotranspiración en tomate usando el modelo de interacción suelo-vegetación-atmósfera (ISBA). Agricultura Técnica. 65:284-294.

Oliveira, J.C.M. (1997). Improved soil particle-size analysis by gama-ray attenuation. Soil Science Society of American Journal 61: 23-26.

Onder, S.; Caliskan, M.E.; Onder, D; Caliskan, S. (2005). Different irrigation methods and water stress effect on potato yield and yield components. Agricultural Water Managet. 73: 73-86.

Ortíz, J.N. (2007). La distribución de agua aplicada con diferentes tipos de emisores en sistemas pivote y efecto sobre el cultivo de la remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L. var. *Altíssima* Döol, cv. Mondial). Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete-España.

Ortíz, J.N.; Tarjuelo, J.M.; de Juan, J.A. (2009). Characterisation of evaporation and drift losses with centre pivots. Agricultural Water Management. 96: 1541-1546.

Ortíz, J.N.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M. (2010). Analysis of water application uniformity from a centrer pivot irrigator and its effect on sugar beet (Beta vulgaris L.) yield. Biosystems Engineering. 105: 367-379.

Ould Mohamed, S., Bertuzzi, P.; Bruend, A.; Raison, L.; Bruckler, L. (1997). Field evaluation and error analysis of soil water content measurement using the capacitance probe method. Soil Science Society of America Journal . 61: 399-408.

P

Paltineanu, I.C.; Starr, J.L. (1997). Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: Laboratory Calibration. Soil Science Society of America Journ 61: 1576-1585.

Pardo, J.E.; Alvarruiz, A.; Pérez, J.I.; Gómez, R.; Varón, R. (2000). Physical-Chemical and sensory quality evaluation of potato varieties (Solanum tuberosum L.). Jornal of Food Quality. 23: 149-160.

Patanè, C. (2011). Leaf area index, leaf transpiration and stomatal conductance as affected bay soil water deficit and VPD in processing tomato in semi arid Mediterranean climate. Journal of Agronomy and Crop Science. 197: 165-176.

Payero, J.O.; Neale, C.M.U.; Wright, J.A.; Allen, R.G. (2003). Guidelines for validating bowen ratio data. Transaction s of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 46 (4): 1051-1060.

Peña, R.V.; Chávez, T.L.; Nolasco, A.Q.; Pichardo, G.P. (2001). Comparación de algunos métodos micrometeorológicos para estimar la evapotranspiración, en el área de Montecillo, México. TERRA Latinoamericana. 19 (3). 281-291.

Pereira, A.S. (2001). Desenvolvimento de um protótipo aplicador de produtos químicos para um sistema de irrigação pivô central. Tesis Doctoral. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, Brasil.

Pereira, J.B.A (2006). Avaliação do crescimento, necessidade hídrica e eficiência no uso da água pela cultura do pimentão (*capsicum annuum*. L), sob manejo orgânico nos sistemas de plantio com preparo do solo e direto – Seropédica, RJ. Tesis Doctoral. Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.

Pereira, L.S., Trout, T.J. (1999). Irrigation methods. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering. vol. I: Land and Water Engineering.ASAE (American Society of Agricultural Engineers).

Pineda, C.; Viloria, J. (1997). Funciones de pedotransferencia para estimar la retención de humedad en suelos de la cuenca del lago de valencia. Venesuelos. 5 (1 y 2): 39-45.

Q

Quanqi, L.; Yuhai, C.; Mengyu, L.; Xunbo, Z.; Songlie, Y.; Boadi, D. (2008). Effects of irrigation and planting patterns on radiation use efficiency and yield of winter wheat in North China. Agricultural water management. 95: 469 – 476.

Quezada, C.; Sandoval, M.; Nario, A. (2010). Calibracion de una sonda de neutrones en un suelo haploxerands. Agro Sur. 38 (3): 212-221.

Quispe, C.; Devaux, A.; Gonzalez, S.; Tourneux, C.; Hijmans, R. (1997). Evaluación comparativa del desarrollo y crecimiento de papa Oca y Isaño en Cochabamba, Bolivia. Revista Latinoamericana de Papa. 9 (10): 140-155.

R

Rajwade, V.B.; Banafar, R.N.S.; Pathak, A.C. (2000). Growth analysis of potato in relation to biodinamic package and organic manures with chemical fertilizer. Journal of the Indian Potato Association. 27 (1/2): 55-58.

Rao, N.H., Sarma, P.B.S.; Chander, S. (1988). A simple dated water production function for use in irrigated agriculture. Agricultural Water Management. 13: 25–32

Ratkowski, D.A. (1983). Nonlineal regression modeling: a unified practical approach. Marcel Dekker. New York, United States.

Rawls, W. J., Brakensiek, D.L.; Saxton, K.E. (1982) Estimation of soil water properties. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 25: 1316-1320.

Rawls, W. J., Gish, T. J.; Brakensiek, D.L. (1991) Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. Advances in Soil Sciences. 16: 213-234

RED SIAR (2012). Sistema de Información Agroclimática para el Regadio. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. http://eportal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx (05/12/2012).

Reichardt, K. (1997). Correção da calibração de sonda de nêutrons por meio de parâmetros de estabilidade temporal da distribuição de probabilidade do conteúdo de água no solo. Scientia Agricola. (54): 17-21.

Rhoades, R.E. (2001). La papa tesoto de los Andes, de la agricultura a la cultura: El viaje fantastico. Rede Papa (3): 1-6.

Richards, F.J. (1959). A flexible growth funtion for empirical use. Journal of Expirimental Botany. 10: 290-300.

Richards, F.J. (1969). The quantitative analysis of growth. In: Plant Phisiology a Treatise, vol. V. Academic Press. New York, United States.

Rinaldi, M.; Ruggieri, S.; Garofalo, P.; Vonella, A.V.; Satalino, G.; Soldo, P. (2010). Leaf area index retrieval using high resolution remote sensing data. Ital. J. Agron. / Riv. Agron. 5: 155-166.

Robaina, F.G.; Puebla, J.H.; Seijas, T.L.; Lazo, G.C. (2011). Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra: Función agua rendimiento. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. 20 (1): 40-46.

Robles, P. (2008). Influence de la densidad de plantación sobre la producción y calidad de dos cultivares de patata. Trabajo Fin de Carrera. EUITA. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.

Rodríguez, L.; Germán, C.; Carlos, E. (2004). Densidad de población y su efecto sobre el rendimiento de papa (Solanum tuberosum, L. cv. Parda pastusa). Agronomía Colombiana. 22 (1): 23-31.

Rodríguez-Pérez, L. (2010). Cultivo de papa en la vereda: El Tablón de Táquira, Simijaca, Cundinamarca. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. 4 (1); 97-108.

Romero Villafranca, R.; Zúnica Ramajo, L. (1993). Estadística. Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia. España.

Rousselle, P.; Robert, Y.; Crosnier, J. C.; (1999). La patata. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.

Rowe, R.; Secor. G. (1993). Managing potato health from emergence to harvest. p. 35-40. In: Rowe, R.C. (ed.). Potato health management. Randall Rowe. New York, United States.

Ruiz, T.E.; Torres, V.; Febles, G.; Díaz, H.; González, J. (2012). Empleo de la modelación para estudiar el crecimiento del material vegetal 23 de *Tithonia diversifolia*. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 46 (1): 23-29.

S

Saxton, K. E., Rawls, W.J.; Romberger, J.S.; Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Science Society of America Journal. 50: 1031-1036.

Scaloppi, E.J.; Ferraz, E.C. (1978). Dependência do crescimento das plantas ao regime de umidade do solo. Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, Brasil. 35: 169-184.

Scanlon, B.R.; Healy, R.W.; Cook, P.G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. Hydrogeology Journal. 10: 18-39.

Schnute, J.A. (1981). A versatile growth model with statistically stable prameters. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 38: 1128-1140.

Schwartz, R.S.; Evvet, S.R.; Pelletier, M.G.; Bell, J.M. (2009). Complex permittivity model for time domain refl ectometry soil water content sensing: I. Theory. Soil Science Society of America Journal. 73 (3): 886-897.

Scott, H.D; Batchelor, J.T. (1979). Dry weight and leaf area production rates of irrigated determinate soybeans. Agronomy Journal. 71: 776-782.

Segura, M.; Santos, M.; Ñústez, C.E. (2006). Desarrollo fenológico de cuatro variedades de papa (*Solanum tuberosum* L.) en el município de Zipaquirá (Cundinamarca). Fitotecnia Colombiana. 6 (3): 33-43.

Sestak, Z.; Catsky, J.; Jarvis, P.J. (1971). Plant photosynthetic production. Manual of Methods. Ed: W. Junk N.V. The Hague.

Shani, U.; Tsur, Y.; Semel, A.; Zilberman, D. (2009). Irrigation production functions with water-capital substitution. Agricultural Economics. 40: 55-66.

Shipley, B. (2002). Trade-offs between net assimilation rate and specific leaf area in determining relative growth rate: relationship with daily irradiance. Functional Ecology. 16: 682-689.

Shock, C.C.; Feibert, E.B.G.; Saunders, L.D. (1998). Potato yield and quality response to deficit irrigation. HortScience. 33 (4): 655–659.

SIAR (2008). Caracteristicas de las estaciones agroclimaticas. Servicio Integral de Asesoramiento al Regante, Centro Regional de Estudios del Agua. Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha y Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, Espana.
http://crea.uclm.es/siar/estaciones/sensores.php (15/03/2011).

Silveira, F.G. (2010). Classificação multivariada de modelos de crescimento para grupos genéticos de ovino de corte. Tesis Doctoral. Estatística Aplicada e Biometria. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais-Brasil.

Simón, A; Suso, M.L.; Pardo, A.; Tobar, V. (2004). Influencia de las técnicas de cultivo de la patata Agria sobre la producción y la calidad para frito. Cuaderno de Campo. 28: 33-36.

Sinclair, T.R.; Muchow, R.C. (1999). Radiation use efficiency. Advances in Agronomy. 65: 215-265.

Singh, P.; Rama, Y.V.S. (1989). Influence of water deficit on transpiration and radiation use efficient oh chickpea (*Cicer arietinum* L.). Agricultural and Forest Meteorology. 48: 317-330.

Singh, G.; Brown, D.M.; Barr, A.G. (1993). Modelling soil water satatus for irrigation scheduling in potatoes I. Description and sensitivity analysis. Agricultural Water Management. 23: 329-341.

Sivukamar, M.V.K.; Shaw, R.H. (1978). Methods of growth analysis in fiels-grown soyabeans. Annals of Botany. 42. 213-222.

Slater, J.W. (1968). The effect of night temperature on tuber initiation of the potato. European Potato Journal. 11: 14-22.

Sobrino Vesperinas, E; Sobrino Illescas, E. (1992). Tratado de Horticultura Herbácea. Hortalizas de legumbre, tallo, bulbo y tuberosas. 2ª Ed. Aedos. Barcelona, España.

Solano, J.S.; Medina, L.M.; Nissem, J.M. (2003). Efecto de niveles y frecuencias de riego por aspersión en papa (*Solanum tuberosum* L.). Agro Sur. 31 (2): 47-59.

Solís-Pacheco, J.R.; Péres F.; Orozco, I.; Flores, J.L.; Ramírez, E.; Hernández, A.; Aguilar, B. (2006). Descripción de un proceso tecnificado para la elaboración de piloncillo a partir de caña de azucar. e-Gnosis. 4 (1): 1-8.

Sourell, H.; Faci, J. M.; Playán, E. (2003). Performance of rotating spray plate sprinklers in indoor experiments. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 129 (5): 1-5.

Soto, F.; Plana, R.; Hernández, N. (2009). Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas del trigo harinero (T*riticum aestivum* ssp. *aestivum*) y triticale (*X Triticum secale Wittmack*) y su relación con el rendimiento. Cultivos Tropicales. 30 (3): 32-36.

Sparrow, L.A.; Chapman, S.R. (2003). Effects of nitrogen fertiliser on potato (*Solanum tuberosum* L., cv. Russet Burbank) in Tasmania. 1. Yield and quality. Australian Journal of Experimental Agriculture. 43 (6): 631-641.

Starr, L.; Paltineanu, I.C. (1998). Real-time soil water dynamics over large areas using multisensor capacitance probes and monitoring system. Soil & Tillage Research 47: 43-49.

Steduto, P.; Hsiao, T.C.; Fereres, E.; Raes, D. (2012). Crop yield response to water: Potato. Irrigation and Drainage Paper 66. FAO. Rome, Italy.

Stenberg, P. (1996). Simulations of the effects of shoot structure and orientation on vertical gradients in intercepted light by conifer canopies. Tree Physiology. 16: 99-108.

Stewart, J.I.; Hagan, R.M.; Pruitt, W.O. (1976). Production function and predicted irrigation programmers for principal crops as required for water resource planning and increased water efficiency. Final report. Washington, United States.

Stewart, J.I.; Hagan, M. (1973). Functions to predict optimal irrigation programs. American Society of Civil Engineers. Proceedings, Journal of the Irrigation and Drainage Division. 99: 421-439.

Struik, P.C. (2007). Responses of the potato plant to temperature. In: Potato Biology and Biotechnology Advances and Perspectives. Ed: Vreugdenhil, D., Bradshaw, J., Gebhardt, C., Govers, F., MacKerron, D.K.L., Taylor, M.A., Ross, H.A. Elsevier. The Netherlands, Amsterdam.

Sun, J.; Yang, L.; Wang, Y.; Ort, D.R. (2009). FACE-ing the global change: Opportunities for improvement in photosynthetic radiation use efficiency and crop yield. Plant Science. 177: 511−522.

Sun, Y.; Ren, S.; Ren, T.; Minasny, B. (2010). A combined frequency domain and tensiometer sensor for determining soil water characteristic curves. Soil Science Society of America Journal. 74 (2). 492-494.

Sudar, R.D.; Saxton, K.E.; Spooner, R.G. (1981).A predictive model of water stress in corn and soybean. Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers). 24: 97-102.

Swank, J.C.; Egli, D.B.; Pfeiffer, T.W. (1987). Seed Growth characteristic of soybean genotypes differing in duration of seed fill. Crop Science. 27: 85-89.

T

Tarjuelo, J. M.; de Juan, J. A. (1999). Crop Water Management. In: CIGR Handbook of Agricultural Engineering. vol. I: Land and Water Engineering.ASAE (American Society of Agricultural Engineers).

Tarjuelo, J. M. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. 3ª Edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España.

Taye, M.; Lommen, W.J.M.; Struik, P.C. (2012). Seasonal light interception, radiation use efficiency, growth and tuber production of the tuber crop *Plectranthus edulis*. European Journal of Agronomy. 1-12.

TACO (2011). Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação, 4ª Ed.. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, Brasil.

Tedeschi, L.O. (2006). Review Assessment of the adequacy of mathematical models. Agricultural Systems. 89:225–247

Tei, F.; Aikman; D.P.; Scaife, A. (1996). Growth lettuce, onion and red beet. 2. Growth modelling. Annal of Botany. 78: 645-652.

Teixeira, C.F.A. (2001). Desempenho do tensiômetro com manômetro de mercúrio, reflectômetro no domínio tempo e sonda de nêutrons no monitoramento do teor de água no solo. Tesis Doctoral. ESALQ- Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz", Universidad de São Paulo. Piracicaba, Brasil.

Tejerina, R.B.M. (2009). La patata: producción comercialización e industria. Tierras de Castilla y León (156): 38-44.

Teruel, D.A.; Barbieri, V.; Ferraro, L.A. (1997). Sugarcane leaf area index modeling under different soil water conditions. Scientia Agricola. 54 (número especial): 39-44.

Tomer, M.D.; Anderson, J.L. (1995). Field evaluation of a soil water-capacitance probe in a fine sand. Soil Science. 159: 90-97.

Tood, R.W.; Evett, S.R.; Howell, T.A. (2000). The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. Agricultural and Forest Meteorology. 103: 335-348.

Torman, V.B.L.; Coster, R.; Riboldi, J. (2012). Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. Revista HCPA. 32 (2): 227-234.

Tuct, L.; (1972). Indice climatique de potencialité agricole. Science du Sol. 2: 81-101.

Turner, D.P.; Cohen, W.B.; Kennedy, R.E.; Fassnacht, K.S.; Briggs, J.M. (1999). Relationships between leaf area index and landsat tm spectral vegetation indices across three temperate zone sites. Remote Sensing of Environment. 70: 52-68.

U

USDA (2006). Keys to Soil Taxonomy. 10th Ed. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. Washington D.C, United States.

V

Vauclin, M. (1984). Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 2. Spatial standpoint. Soil Science. 137: 141-148.

van Loon, C.D. (1981). The effect of water stress on potato growth, development, and yield. American Potato Journal. 58: 51–69.

Vanderlinden, K., Giráldez, J.V.; van Meirvenne, M. (2003). Evaluación de la capacidad de retención de agua de los suelos de Andalucia mediante el analisis del balance medio anual del agua. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo 6: 131-136.

Varble, J.L.; Chavéz, J.L. (2011). Performance evaluation and calibration of soil water content and potential sensors for agricultural soils in eastern Colorado. Agricultural Water Management. 101: 93– 106.

Varlet-Grancher, C.; Gosse, G.; Chartier, M.; Sinoquet, H.; Bonhomme, R.; Allirand, J.M. (1989). Mise aupoint: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. Agronomie. 9: 419-439.

Venegas, C. (2002). Manual Técnico de la Papa. Sociedad Química y Minera de Chile. Santiago, Chile.

Venus, J.C.; Causton, D.R. (1979). Plant growth analysis: The use of the Richards function as an alternative to polynomial exponential. Annals of Botany. 43: 623-632.

Vereecken, H.J., Maes, J.; Feyen, J.; Darius, P. (1989). Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. Soil Sciense. 148**:** 389-403.

Vilela, L.A.A. (2002). Metodologia para dimensionamento de um sistema de pulverização acoplável a pivô central. Tesis Doctoral. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Universidade de São Paulo. Piracicaba, Brasil.

Villalobos, F; Mateos, L.; Orgaz, F; Federes, E. (2002). Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola. Ed. Mundi-Prensa. Madrid, Epaña.

von Bertalanffy, L. (1957). Quantitative laws for metabolism and growth. Quarterly Review of Biology. 32: 217-231.

W

Walvoord, M.A.; Plummer, M.A.; Phillips, F.M. (2002). Deep arid system hydrodynamics 1. Equilibrium states and response times in thick desert vadose Zones. Water Resources Research. 38 (12): 44/1-44/15.

Watson, D.J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crop. I. Variation in bet assimilation rate and leaf area between years. Annals of Botany. 11: 41-76.

Watson, D.J. (1952). The physiological basis of variation in yield. Advances in Agronomy. 4: 101-130.

Weirsema, S.G. (1987). Efecto de la densidad de tallos en la producción de papa. Boletín de Información Técnica N° 1. Centro Internacional de la papa. Lima, Peru.

Williams, J., Prebble, R.E.; Williams, W.T.; Hignett, C.T. (1983) The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristics. Australian Journal of Soil Research. 21: 15-22.

Winsor, C.P. (1932). The Gompertz curve as a growth curve. Proceedings of the National Academy of Sciences. 18:1-7.

Worthington, C.M.; Hutchinson, C.M. (2005). Accumulated growing degree days as a model to determine key developmental stage and evaluate yield and quality of potato in northeast Florida. Proceedings of the Florida State Horticultural Society. 118: 91-101.

Wright, J.L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. Journal of the Ittigation and Drainage. 108 (IR2). 57-73.

X

Xing, Z.; Chow, L.; Meng, F-R.; Rees, H,W.; Stevens, L.; Montheith, J. (2008). Validating Evapotranspiraiton Equations Using Bowen Ratio in New Brunswick, Maritime, Canada. Sensors. 8: 412-428.

Y

Yara. (2003). Potato Plantmaster. Yara International ASA, annual review 2003.

Younis, M.E.; El-Shahaby, O.A.; Abo-Hamed, S.A.; Ibrahim, A.H. (2000). Effects of water stress on growth, pigments and CO_2 assimilation in three sorghum cultivars. Journal Agronomy and Crop Science. 185: 73-82.

Yuan, B-Z, Nishiyama, S.; Kang, Y. (2003). Effect different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato. Agricultural Water Managet. 63: 153-167.

Z

Zhang, B.; Kang, S.; Li, F.; Zhang, L. (2008). Comparison of three evapotranspiration models to Bowen ratio-energy balance method for a vineyard in an arid desert region of northwest China. Agricultural and Forest Meteorology. 148: 1629-1640.

Zhao, W.; Liu, B.; Zhang, Z. (2010). Water requirements of maize in the middle Heihe River basin, China. Agricultural Water Managet. 97: 215-223.

Zimmermann, E.D.; Basile, P.A. (2008). Uso de funciones de pedotransferencia para la estimación de parámetros hidráulicos en suelos limosos (Llanura Argentina). Boletín Geológico y Minero. 119 (1): 71-80.

Zolin, C.A.; Coelho, R.D.; Paulino, J.; Folegatti, M.V. (2012). Economic viability of retrofiting emitters in center pivot. Engenharia Agrícola. 32 (3): 602-608.

AGRADECIMENTOS

Apartado en la lengua materna de la doctoranda (portugués).

8 AGRADECIMENTOS

Gostaria expressar meus mais sinceros agradecimentos a todas as instituições que contribuíram, direta ou indiretamente, para a elaboração e desenvolvimento da presente Tese.

Em primeiro lugar, mencionar a Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM), principalmente a Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete (ETSIA) e o Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria por dispor de todos os meios e equipamentos necessários para as análises imprescindíveis para o desenvolvimento do estudo.

Em especial, agradecer ao Centro Regional de Estudios Del Agua (CREA), por além de fornecer todos os equipamentos, estrutura, conhecimento e técnicas para fazer possível o desenvolvimento do experimento com qualidade e excelência, ainda se tornou uma segunda casa, onde pude encontrar conforto e adequadas condições de trabalho sempre que necessitei.

Ao Centro de Formación Agroambiental de Aguas Nuevas proprietário da área onde se desenvolveu o experimento, em especial a Luis Selva, Diretor do centro de formação, por estar sempre disponível, assim como sua equipe, a ajudar a solucionar qualquer um dos inúmeros problemas surgidos durante o trabalho.

Ao agricultor colaborador Hermínio, que forneceu todos os insumos necessários à produção, agradecer pela paciência e por confiar o resultado da sua produção ao nosso grupo de pesquisa.

Ao Ministerio de Ciencia e Innovación de España por financiar o projeto; Riego por aspersión: aplicación del agua, agronomía y flujos de retorno (AGL2010-21681-C03-02) e ao projeto Erasmus Mundus (*External Cooperation Window project for lot 15*) por financiar minha bolsa de estudos durante todo o período do curso de doutorado.

É muito importante enfatizar o trabalho dos meus três orientadores da Tese. Grandes professores e pesquisadores, dos quais agradeço pela transferência de conhecimento.

José Fernando Ortega Álvarez, por principalmente acreditar na minha capacidade de realizar o trabalho proposto. Em muitos momentos ao longo desses três anos, me senti perdida e assustada frente a tanta responsabilidade e volume de trabalho, e para minha surpresa, a visão simplificada do trabalho e as palavras tranquilizadoras partiam do Dr. Fernando, e me faziam acreditar que tudo terminaria bem.

José María Tarjuelo Martín-Benito, antes de se preocupar com desenvolvimento do trabalho bem feito, priorizou meu bem estar. Foi um grande pai, motorista, guia turístico, chefe, professor e tudo mais que não sou capaz de acreditar; sempre que possível disponibilizou do seu precioso tempo para atender qualquer necessidade minha. Sem nenhuma dúvida, se o resultado dessa experiência vivida em outro país foi um sucesso, todos os créditos são do Dr. José Maria.

Juan Ignácio Córcoles Tendero, quem se dedicou tantas horas a me ensinar a manusear todos os equipamentos de campo; quem sempre sanou todas as minhas duvidas sobre manejo, os porquês dos procedimentos, resultados que esperávamos e, principalmente, quem dedicou tantas horas nas correções dessas páginas. Sem dúvidas, foi graças ao seu esforço e empenho que eu posso dar a presente Tese por finalizada.

Muito obrigado a toda equipe do CREA que, independente do cargo (pesquisadores, técnicos, agrônomos e professores), em muitos momentos se comprometeram a ajudar nos custosos trabalhos de campo e laboratórios.

Mencionar especialmente, Francisco Montoya Sevilla, que com o passar do tempo deixou de ser apenas um companheiro de trabalho e se tornou um grande e sincero amigo.

Com Paco, dividi minhas alegrias, tristezas, sorrisos e lágrimas, sempre sob o sol e entre nossas preciosas batatas. E quando acreditou que somente sua presença não era o suficiente, me emprestou todos os seus amigos de infância para me alegrar no momento em que precisava de ânimo e ilusão. Agradeço-te de todo coração, e com certeza receberemos, um dia, todos os benefícios que esses anos de trabalho nos proporcionarão.

Devo também agradecer meus amigos de toda a vida, meus queridos brasileiros que mesmo com um oceano de distancia se fizeram presentes a cada dia. Muito obrigada Bruno, Ravi, Diogo e Léo pelo amor incondicional e pela torcida de sempre.

Agradecer todo o apoio da minha família que suportaram a saudade por reconhecer que estar em outro país era importante para a realização e complemento da minha formação. Toda oração, palavra de apoio e saudosismo foram essenciais para seguir com meu trabalho.

Por último e não menos importante, agradecer imensamente a minha companheira de caminhada Kelly Leite que suportou comigo todas as dificuldades de adaptação, mas principalmente por me proporcionar o maior presente que pude receber nos últimos anos. Ela trouxe para minha vida um príncipe chamado Álvaro, que me despertou um amor que ainda não conhecia. Estou tendo a oportunidade de acompanhar de perto a educação e aprendizado de uma criança, que a cada descoberta, a cada sorriso, a cada beijo e carinho enche meu coração de alegria e orgulho. Ao meu pequeno Álvaro declaro todo meu amor.

A todos, muitíssimo obrigada.