

## Treball final de grau

**Estudi:**

**Grau en Enginyeria Agroalimentària**

**Títol:**

**AVALUACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE AUTOMATITZAT EN  
BLAT DE MORO AL BAIX TER**

**Document:**

Memòria

**Alumne:** Arnau Riba Palou

**Tutor:** Francesc Ramírez de Cartagena Bisbe

**Cotutora:** Sílvia Cufí Aregay

**Departament:** Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia  
Agroalimentària

**Àrea:** Enginyeria Hidràulica

**Convocatòria (setembre/2023)**



# ÍNDEX

I.	RESUM .....	5
II.	PARAULES CLAU.....	7
III.	AGRAÏMENTS .....	8
1.	INTRODUCCIÓ .....	9
1.1.	CONTEXT DEL REGADIU A ESPANYA I CATALUNYA.....	9
1.1.1.	SUPERFÍCIE DE REGADIU A ESPANYA I CATALUNYA .....	9
1.1.2.	IMPORTÀNCIA DEL REGADIU .....	9
1.1.3.	EVOLUCIÓ DELS MÈTODES DE REG A ESPANYA I CATALUNYA .....	10
1.1.4.	MODERNITZACIÓ DE REGADIUS .....	11
1.1.5.	BARRERES I OPORTUNITATS DEL REG PER SUPERFÍCIE.....	12
1.2.	AUTOMATITZACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE .....	12
1.2.1.	ESTAT DE L’AUTOMATITZACIÓ A NIVELL MUNDIAL .....	12
1.2.2.	MODELS DE SIMULACIÓ EN REG PER SUPERFÍCIE .....	13
1.3.	IMPORTÀNCIA DEL CONREU DEL BLAT DE MORO A ESPANYA I CATALUNYA .....	14
1.3.1.	SUPERFÍCIE DE BLAT DE MORO CONREADA A ESPANYA I CATALUNYA .....	14
1.3.2.	AGRONOMIA DEL CULTIU .....	15
1.4.	MARC DEL TREBALL .....	16
2.	OBJECTIUS .....	17
3.	MATERIAL I MÈTODES .....	18
3.1.	LOCALITZACIÓ I MORFOLOGIA DE LA PARCEL·LA.....	18
3.2.	CARACTERITZACIÓ METEOROLÒGICA .....	19
3.3.	CARACTERÍSTIQUES FÍSiques, QUÍMIQUES I HIDROLÒGIQUES DEL SÒL.....	20
3.4.	CARACTERÍSTIQUES DE L’AIGUA DE REG.....	21
3.5.	DISSENY EXPERIMENTAL.....	22
3.6.	DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ DE REG.....	23
3.7.	GESTIÓ DEL CULTIU .....	25
3.8.	GESTIÓ DEL REG A LES PARCEL·LES AUTOMATITZADES .....	26
3.8.1.	CRITERIS DE REG I DETERMINACIÓ DE LES VARIABLES .....	26
3.8.2.	PROGRAMACIÓ DELS REGS. FARMCONNECT .....	27
3.9.	PRESA DE DADES DE CAMP I ACTIVITATS .....	27
3.9.1.	ABANS DE L’INICI DEL REG .....	28
3.9.2.	DURANT LA TEMPORADA DE REG .....	28
3.9.3.	DETERMINACIÓ DE LA DOSI DE REG REQUERIDA.....	33
3.10.	SIMULACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE .....	35
3.10.1.	CODI WINSRFR.....	35
3.10.2.	DETERMINACIÓ DE LA FUNCIÓ D’INFILTRACIÓ .....	37

3.10.3.	DETERMINACIÓ DELS ÍNDEXS D'EFICIÈNCIA DE REG OBTINGUTS EN ELS ASSAJOS A CAMP .....	37
3.10.4.	DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE REG ÒPTIMS. CABAL I TEMPS DE TALL .....	39
3.11.	AVALUACIÓ ECONÒMICA .....	41
4.	RESULTATS .....	43
4.1.	DESENVOLUPAMENT DEL CULTIU .....	43
4.1.1.	ESTADIS FENOLÒGICS .....	43
4.1.2.	DETERMINACIÓ DE LA BIOMASSA .....	43
4.2.	VARIABILITAT DE CABALS EN CADA REG DE LA PARCEL·LA AUT .....	45
4.3.	TEMPS D'AVANÇAMENT .....	46
4.4.	GEOMETRIA DELS SOLCS .....	47
4.5.	CONTINGUT D'AIGUA AL SÒL .....	48
4.6.	DOSI REQUERIDA .....	51
4.7.	SENSOR D'AVANÇ .....	51
4.8.	SIMULACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE .....	53
4.8.1.	DETERMINACIÓ DELS ÍNDEXS D'EFICIÈNCIA DE REG OBTINGUTS EN ELS ASSAJOS A CAMP .....	53
4.8.2.	VALIDACIÓ DE LA FUNCIO D'INFILTRACIÓ ESTÀNDAR .....	56
4.8.3.	DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE REG ÒPTIMS, CABAL I TEMPS DE TALL .....	58
4.9.	RESULTATS ECONÒMICS .....	59
5.	DISCUSSIÓ .....	63
5.1.	DESENVOLUPAMENT DEL CULTIU .....	63
5.1.1.	ESTADIS FENOLÒGICS .....	63
5.1.2.	DETERMINACIÓ DE LA BIOMASSA .....	63
5.2.	VARIABILITAT DE CABALS EN CADA REG DE LA PARCEL·LA AUT .....	64
5.3.	TEMPS D'AVANÇAMENT .....	64
5.4.	GEOMETRIA DEL SOLC .....	64
5.5.	CONTINGUT D'AIGUA AL SÒL .....	65
5.6.	DOSI REQUERIDA .....	65
5.7.	FRONT D'AVANÇ .....	66
5.8.	SIMULACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE .....	66
5.8.1.	DETERMINACIÓ DELS ÍNDEXS D'EFICIÈNCIA DE REG OBTINGUTS EN ELS ASSAJOS A CAMP .....	66
5.8.2.	DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE REG ÒPTIMS, CABAL I TEMPS DE TALL .....	68
5.9.	DISCUSIÓ ECONÒMICA .....	68
6.	APLICABILITAT .....	70
7.	CONCLUSIONS .....	72
8.	BIBLIOGRAFIA .....	74

# I. RESUM

El reg per superfície està disminuint de manera significativa tant a Catalunya com a Espanya, representant actualment el 47% i el 22% respectivament del regadiu (MAPA, 2022). Aquesta davallada ha estat provocada fonamentalment per la política de modernització de regadius i ajuts associats, enfocada quasi exclusivament a la transformació del reg per gravetat a reg a pressió, sota la premissa de la baixa eficiència en l'ús de l'aigua i els alts requeriments de mà d'obra del reg per superfície. No obstant, aquest sistema suposa uns reduïts costos d'inversió, de funcionament i de manteniment degut a la baixa o nul·la necessitat d'energia, avantatge molt rellevant en l'actual situació de mercat energètic a l'alça. A més, la recent disponibilitat al nostre país de tecnologia per l'automatització completa del reg per superfície en parcel·la amb alimentació solar pot contribuir a superar els inconvenients atribuïts a aquest sistema de reg.

L'objectiu principal del treball va ser avaluar tècnicament i econòmicament l'automatització del reg per superfície (parcel·la AUT) en cultiu de blat de moro, així com comparar els resultats obtinguts amb el reg manual tradicional (parcel·la AG).

Per assolir aquest objectiu es va realitzar un assaig en una parcel·la comercial de 2 ha aproximadament, situada a Sant Julià de Ramis (Gironès), on es va caracteritzar el sòl i la topografia. Durant la temporada de cultiu: a) es van controlar els paràmetres del reg a partir de les vàlvules d'obertura automatitzada, comptadors volumètrics, sensors de detecció del front d'avançament i l'estació meteorològica instal·lada a la parcel·la; b) per millorar l'eficiència de distribució de l'aigua en les regues es va utilitzar el sistema "ponton" proposat per RubiconWater (Melbourne, Austràlia); c) es va monitoritzar en continu el contingut d'aigua al sòl mitjançant sondes basades en capacítància situades a diferents profunditats; d) es va fer un seguiment dels estadis fenològics del cultiu, així com de l'evolució de la biomassa mitjançant la recollida de mostres, les quals van ser processades a laboratori; e) es va simular el reg amb el codi WinSRFR (Bautista i Schlegel, 2019) per poder obtenir les eficiències d'aplicació, requeriment i pèrdues per percolació profunda del reg; f) es van determinar els cabals de consigna i temps de tall que optimitzen l'eficiència de reg a la parcel·la estudiada.

Els resultats més rellevants van mostrar que:

- a) No hi va haver diferències rellevants en l'evolució del cultiu ni en la producció entre les parcel·les AUT i AG.
- b) Les uniformitats de distribució de cabal amb el sistema "ponton" van ser baixes, presentant coeficients de variació del 24 i 35%. Això va resultar en que, donat un mateix cabal de consigna, el temps d'avanç de l'aigua no va ser uniforme entre regues.
- c) La utilització de cabals alts (2,50-1,47 l/s) i entrega constant van suposar velocitats d'avançament superiors en comparació a cabals baixos (1,22-1,68 l/s) i entrega variable.
- d) Els sensors d'avanç i l'estació meteorològica no van tenir utilitat, ja que el software i firmware que portaven incorporats no estaven correctament desenvolupats, de manera que les lectures que proporcionaven no eren correctes
- e) Les eficiències d'aplicació (AE), requeriment (RE) i pèrdues per percolació profunda (DP) del reg de la parcel·la AUT van ser millors que en la parcel·la AG. Les AE de la parcel·la AG van presentar valors mitjans (66-79%), mentre que en la parcel·la AUT van ser alts (79-100%). Les RE de la parcel·la AUT van presentar valors bons (85-100%), malgrat que en la parcel·la AG van ser millors (95-100%). Les DP en la parcel·la AG van prendre valors dolents (20-35%), mentre que en la parcel·la AUT van ser bons-acceptables (0-20%).

- f) La parcel·la AUT va utilitzar un 34% menys d'aigua, cosa que va resultar en una productivitat de l'aigua de reg (kg de gra /m<sup>3</sup> d'aigua de reg) un 50% més elevada que la parcel·la AG. Segons la classificació proposada per Foley *et al.* (2020), la parcel·la AUT va obtenir una productivitat de l'aigua de reg mitjana, amb valor d'1,44 kg/m<sup>3</sup>, mentre que la parcel·la AG va ser classificada com baixa, ja que la producció va ser de 0,92 kg/m<sup>3</sup>.
- g) Els paràmetres de cabal de consigna i temps de tall que permeten optimitzar la qualitat del reg són d'1,0-1,3 l/s i de 5h10'-3h45'. Utilitzant aquests paràmetres, els índexs d'eficiències serien del 94-96% per l'AE, del 95-96% per la RE i del 4-7% per la DP, respectivament.
- h) L'estudi econòmic comparatiu entre les parcel·les AUT i AG va permetre valorar la viabilitat pràctica del sistema automatitzat, que es basava en el càlcul de les despeses, ingressos i beneficis generats. En la parcel·la AUT es van obtenir uns ingressos de -2.367,59 €/ha, el que significava que el sistema automatitzat no era econòmicament viable. Però en una parcel·la més gran (5 ha) amb produccions estàndard (11.500 kg/ha) i l'actual preu de venda (312€/t), l'automatització del reg tindria beneficis econòmics.
- i) Gràcies al nou sistema de reg per superfície automatitzat assajat en aquest treball, l'agricultor no havia d'efectuar les tasques manuals del reg, sinó que les podia executar remotament, comportant una reducció de la mà d'obra dedicada del 30%. Koech *et al.* (2014a) i Masseroni *et al.* (2020) també van confirmar que la utilització d'aquest sistema permetia reduir el nombre d'hores dedicades a la mà d'obra.

Es conclou que el reg automàtic millora la productivitat en l'ús de l'aigua i la mà d'obra respecte al practicat per l'agricultor, tot i que les simulacions efectuades demostren que encara hi ha marge de millora en la qualitat del reg. La viabilitat econòmica del sistema automatitzat requereix parcel·les superiors a 5 ha amb les produccions i preus de mercat mitjans actuals, o bé l'accés als regants d'ajuts a la millora del regadiu atorgats per l'Administració. Finalment, l'objectiu d'aconseguir un reg totalment automatitzat amb la tecnologia FarmConnect (Rubicon) no s'ha pogut assolir per diverses causes, que exigeixen una millora en els protocols de comunicació, software i funcionament de la majoria d'equips. El treball portat a terme ha contribuït a la posta a punt i a la millora de l'actual tecnologia disponible en el reg per superfície automatitzat.

## II. PARAULES CLAU

Reg per superfície

Automatització del reg per superfície

Reg en blat de moro

Productivitat en l'ús de l'aigua de reg

Eficiència de reg

Índexs de qualitat del reg

Modelatge del reg per superfície

### III. AGRAÏMENTS

En primer lloc, agrair el suport moral de la meva família i amics durant aquests quatre anys que he estat estudiant el Grau d'Enginyeria Agroalimentària (GEA) a la Universitat de Girona (UdG), ja que m'han recolzat en tots els moments difícils i hem gaudit de les recompenses en assolir els objectius.

A més, m'agradaria donar les gràcies a tot l'equip del Grup de Recerca en Enginyeria i Gestió del Reg, ja que m'han donat l'oportunitat de participar en el projecte de "Girona, Regió Sensible a l'Aigua" i així poder treballar amb les meves passions, l'agricultura, la tecnologia i la sostenibilitat de recursos. Especialment al Francesc Ramirez de Cartagena i la Sílvia Cufí, ja que m'han ajudat i mentorat durant tot el projecte. A més a més, al Miquel Duran i Gerard Arbat, ja que han sigut molt importants en l'etapa de presa de dades a camp i la interpretació de les dades del software.

Finalment, agrair també a les empreses Regaber (Parets del Vallès, Espanya) i RubiconWater (Melburn, Austràlia) per proporcionar-nos part del material utilitzat; a Frederic Brunsó per proporcionar-nos una parcel·la on poder realitzar aquest projecte; a la comunitat de regants Sant Julià de Ramis, Medinyà, Cervià de Ter, Sant Jordi Desvalls i Colomers per facilitar les tasques de captació d'aigua al canal.

Arnau Riba Palou

Girona, 2023



# 1. INTRODUCCIÓ

## 1.1. CONTEXT DEL REGADIU A ESPANYA I CATALUNYA

### 1.1.1. SUPERFÍCIE DE REGADIU A ESPANYA I CATALUNYA

L'agricultura és una activitat que a Espanya ocupa 16,8 Mha, aproximadament 1/3 part de la superfície geogràfica. D'entre els productes conreats, destaquen els cereals i els fruiters. De tota la superfície conreada, només 4 milions estan dotades amb regadiu, equivalent al 22,4% (MAPA, 2022).

L'evolució de la superfície cultivada a Espanya ha sigut decreixent i en els últims 10 anys hi ha hagut una disminució de l'1,74%. Tot i aquesta reducció de superfície, Espanya encara és un important país agrícola a escala europea. Concretament, el 2,61% del PIB prové de l'agricultura i el posiciona en el quart lloc dins Europa (EUROPARL, 2021). Espanya té la superfície de regadius més gran d'Europa amb 3,8 Mha, on el 54% és amb sistema de reg localitzat. Encara que el regadiu representi un 22,6% de la superfície agrària cultivada a Espanya, s'obtenen el 65% de la producció final agrària (Planas, 2022).

La superfície de regadiu a nivell estatal és molt variada. Al nord d'Espanya pren valors de 4,60%, 11,29%, 1,50% i 9,15% per Galícia, Cantàbria, Astúries i País Basc respectivament, mentre que a les Illes Canàries és del 59,76% (MAPA, 2022). Aquesta diferència tan marcada estaria associada a les variacions climàtiques de precipitació i temperatura entre les regions.

### 1.1.2. IMPORTÀNCIA DEL REGADIU

El reg comporta beneficis en els àmbits socials, econòmics i ambientals: a) genera nous llocs de treball, mantenint la població i evitant l'èxode rural; b) comporta un augment de la producció i de la rendibilitat del cultiu; c) permet la capacitat de produir productes de qualitat i proximitat, reduint l'impacte del transport; d) permet una gestió del territori i manteniment del paisatge (DARP, 2012).

Relacionat amb les funcions socials i econòmiques, cal remarcar que un sistema en regadiu multiplica per sis la producció agrícola, augmenta fins a quatre vegades la renda dels agricultors i genera tres vegades més llocs de treball per unitat de superfície que el conreu de secà (Planas, 2022).

Segons el DARP (2012), el pla de regadiu 2008-2020 proposa un manteniment de la població rural i una gestió del territori: a) ja que els regadius han estat tradicionalment el principal motor de desenvolupament del medi rural; b) la productivitat del regadiu és 7 vegades la del secà i es multiplica per 12 la necessitat de mà d'obra (valors més alts que els estimats per Planas [2022]); c) comporta una lluita contra els incendis forestals i l'erosió del sòl; d) el regadiu incrementa la capacitat d'absorció de nitrats i e) la capacitat de fixació de CO<sub>2</sub>.

En relació a la funció ambiental, cal indicar que el regadiu comporta una transformació del paisatge natural vers l'agricultura de secà, amb un augment de la diversitat de l'ecosistema, amb una convivència entre la flora i la fauna, en el temps i en l'espai, amb una reorganització del territori i un paisatge canviant. Amb el regadiu hi ha un augment de la biomassa fresca, el que implica una major fixació del CO<sub>2</sub> i una major alliberació d'O<sub>2</sub> (Mateos, 2020). Així, per exemple, 1 ha de blat de moro en regadiu fixa la mateixa quantitat que 1 ha de bosc tropical, unes 30 t de CO<sub>2</sub> (Mateos, 2020; DARP, 2012).

### 1.1.3. EVOLUCIÓ DELS MÈTODES DE REG A ESPANYA I CATALUNYA

En una classificació general, el reg pot ser per gravetat o pressuritzat. Però dins del pressuritzat es pot diferenciar entre el reg per aspersió i el reg localitzat d'alta freqüència), on els primers requereixen major pressió que els segons. Els principals trets característics dels diferents sistemes de reg són (Fundación Aquae, 2022):

- El reg per aspersió és un sistema que crea un bàndol d'aigua que rega totes les parts de la planta, incloent les fulles i la tija, cosa que a vegades pot comportar problemes per cremades foliars. Els principals desavantatges són el cost econòmic i l'energètic. Hi ha una variant d'aquest sistema que es anomena reg automotriu, el qual és reg per aspersió amb màquina, com per exemple els enroladors automàtics i pivots. En aquest cas, la dotació energètica és major, de manera que el raig d'aigua té un major abast.
- En el reg localitzat habitualment s'utilitza el sistema de degoteig, que consisteix a regar només la zona radicular de la planta, creant un bulb humit. Es rega amb un cabal baix, però de forma freqüent, ja que es pretén que el bulb radicular sempre estigui en condicions òptimes d'humitat. Els principals desavantatges són: a) l'elevat cost d'instal·lació, b) acumulació de sals a la zona mullada, c) taponament dels degoters i d) desperfectes dels sistemes de degoteig per la fauna (conills i rates).
- El reg per gravetat és el sistema més tradicional i consisteix a distribuir l'aigua per tota la parcel·la en forma de làmina lliure. El transport de l'aigua pot ser per regues, taules o per inundació. Els desavantatges d'aquest sistema són: a) es requereix una dosi d'aigua major que en els altres sistemes; b) l'automatització del sistema està poc desenvolupada, requerint per tant una quantitat important de ma d'obra; c) l'eficiència de reg està molt influenciada tant pel pendent de la parcel·la, com pel tipus de sòl. Els principals avantatges són que el cost energètic és nul, els costos de les instal·lacions són baixos i les instal·lacions són simples.

El volum d'aigua de reg utilitzat i el mètode de reg emprat mostren una alta dependència, de manera que en general, el reg per superfície és el que aplica majors volums d'aigua i el reg localitzat els menors. Això suposa que cada cultiu i cada mètode de reg tindran unes necessitats energètiques diferents. Camacho *et al.* (2017) varen determinar les necessitats energètiques per cadascun dels mètodes de reg, per una dotació neta de 5.000 m<sup>3</sup>/ha i un rendiment del bombejament del 75% (Taula 1).

**TAULA 1:** Necessitats energètiques segons mètode de reg. Hm: alçada manomètrica; EA: Eficiència d'aplicació; E: Energia consumida. FONT: Camacho *et al.* (2017).

SISTEMA DE REG	Hm (m)	EA	E (kWh/ha)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
GRAVETAT	3	0,5	108,9	0,044
ASPERSIÓ	45	0,7	1.166,7	0,333
PIVOT	35	0,8	793,9	0,198
LOCALITZAT	30	0,9	604,9	0,134

El reg per gravetat és el que presenta els valors d'eficiències globals més baixos, del 40-50% segons Doorenbos i Pruitt (1977), essent aquest fet la principal crítica al mètode, tot i que alguns treballs realitzats han mostrat eficiències superiors. Es el cas, per exemple, d'un reg per taules en un viver de plantes ornamentals de Girona on es van mesurar eficiències del 85% (Arbat *et al.*, 2011). Pel que fa a la despesa energètica és nul·la o molt baixa, ja que es rega per gravetat i el requeriment d'alçada manomètrica es nul o mínim. A la Taula 1 es pot comprovar que l'energia per ha requerida en el reg per superfície és només del 9,3% de la necessària en reg per aspersió, essent una de les avantatges

més importants del reg per superfície. A més, a favor del reg per superfície està el baix cost econòmic de la instal·lació en la majoria dels casos, ja que no hi ha sofisticació tecnològica estan aquest cost associat exclusivament a l'anivellament del camp i a la canonada de distribució d'aigua a la parcel·la. Inclús en cas d'automatització l'energia requerida pot ser subministrada per les plaques fotovoltaïques incorporades, com en el cas dels equips de RubiconWater (Melbourne, Austràlia).

Segons les enquestes realitzades sobre les superfícies i rendiment dels cultius (ESYRCE), 2,10 Mha són regades amb el sistema localitzat, 0,8 Mha regades per gravetat i la resta (0,9 Mha) regades amb aspersió, el que suposa respectivament el 54%, el 21% i el 23% de la superfície de regadiu total (MAPA, 2022).

L'evolució dels sistemes de reg a Espanya als últims 10 anys, mostra canvis de tendència molt importants. MAPA (2022) demostra que el reg localitzat ha fet un canvi de tendència molt destacable, amb un augment del 19%. Mentre que en el cas del reg per gravetat hi ha hagut un canvi de tendència negatiu i que ha implicat una reducció del 15,79%, tot i això segueix essent el sistema més utilitzat.

#### **1.1.4. MODERNITZACIÓ DE REGADIU**

Aquests canvis de tendència estan lligats a les fortes i restrictives lleis per l'optimització de l'ús de l'aigua. Com que les subvencions de l'administració per a la millora de regadius reclamen que les eficiències sigui molt majors, un dels camins més fàcils és la utilització de sistemes pressuritzats i localitzats. Un exemple seria el pla per a l'eficiència en l'ús de l'aigua per a reg agrícola que consisteix en l'estalvi de l'aigua a partir de millorar les eficiències amb noves tecnologies (ACA, 2006).

Les variacions més importants de la superfície de reg en funció del sistema de reg utilitzat provenen principalment dels sistemes de gravetat i localitzat. Això és degut a causa de la modernització dels sistemes de reg, on el de gravetat canvia a localitzat, el que permet eficiències millors, i per tant són bonificats gràcies a les lleis per l'optimització de l'ús de l'aigua (ACA, 2006).

Des del 1950 i fins el 2007 hi ha hagut un augment en l'eficiència de l'ús de l'aigua del 21%; malgrat aquest augment, les lleis reclamen millorar encara més aquests valors. Al mateix temps que està avançant ràpidament la millora en l'eficiència en l'ús de l'aigua, també s'ha de posar en relació amb la major intensitat d'energia aportada a l'aigua de reg, ja que des del 1950 ha augmentat un 1.800%. La major eficiència hídrica va lligada a una major ineficiència energètica (Corominas, 2009).

La diferència de preu en l'energia al llarg del 2022 ha augmentat un 57,93%. Un altre exemple en l'increment de despeses està en el preu de 0,1366 €/kWh de juny del 2008 i els 0,3350 €/kWh de juny del 2022. Tenint en compte els elevats preus de l'electricitat, cal remarcar que la implementació dels sistemes de reg pressuritzats implicaran elevats costos energètics (Datosmacro, 2022). El cost del terme fix de potència contractada al regadiu espanyol s'ha multiplicat per més de 9 en el període 2007-2017, essent la principal preocupació de les comunitats de regants.

Segons Corominas (2009), la modernització en regadiu ha de continuar buscant la millora en l'eficiència hídrica i per tant una millor garantia del subministrament en els anys de sequera, però evitar incrementar excessivament les demandes energètiques. S'ha de superar la creença en què s'han de transformar tots els regs de gravetat a pressió, ja que és possible i ecològicament desitjat, millorar l'eficiència en l'ús de l'aigua. La conservació d'aquest sistema de reg per gravetat presenta una gran importància ecològica i paisatgística en els regs de muntanya.

### **1.1.5. BARRERES I OPORTUNITATS DEL REG PER SUPERFÍCIE**

Els principals inconvenients del reg per superfície són: a) l'aplicació d'un volum d'aigua elevat; però cal tenir present que l'aigua no utilitzada pel cultiu té una finalitat positiva mediambiental, ja que s'encarrega d'omplir els aqüífers; b) l'alt requeriment de mà d'obra necessària, ja que l'agricultor ha d'obrir i tancar manualment les vàlvules a l'hora de regar (Smith et al., 2005).

En contra, el reg per superfície permet obrir un gran ventall d'oportunitats gràcies a: a) el baix cost energètic que té; i b) la possibilitat de reduir els costos de mà d'obra modernitzant el sistema de reg. Referent a aquest segon punt, això consistiria a passar d'un reg per superfície manual a un de reg per superfície automatitzat, de manera que l'agricultor no hagi d'invertir hores a fer l'actuació d'obrir i tancar les vàlvules manualment, sinó que ho pugui realitzar de forma telemàtica a partir del sistema SCADA. A més, en cas d'automatitzar el sistema, l'energia requerida per fer les actuacions de les vàlvules seria subministrada gràcies a les mateixes plaques fotovoltaïques que porten integrades, de manera que no s'incrementarien els costos energètics.

## **1.2. AUTOMATITZACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE**

### **1.2.1. ESTAT DE L'AUTOMATITZACIÓ A NIVELL MUNDIAL**

L'automatització del reg per gravetat és una àrea tècnica molt innovadora i ambiciosa, però actualment es troba en un estadi poc desenvolupat i poc globalitzat. Els països capdavanters a nivell mundial són Austràlia i els Estats Units, on és una tècnica que està molt implementada i on es presenten els majors avenços i desenvolupaments. Pel que fa a Austràlia, aquesta situació és possible pels suports del govern estatal i federal que imposen unes condicions on l'estalvi d'aigua generat sigui retornat al medi ambient (Plusquellec, 2009).

Aquesta tècnica requereix material tecnològic especialitzat, per tant fa que el seu desenvolupament encara sigui més difícil. Les principals maquinàries i softwares líders per la gestió de reg per gravetat automatitzat a Austràlia són Aquator (GM Poly 2013) i FarmConnect (RubiconWater, 2011). Les dues empreses es diferencien de les altres, ja que proporcionen: a) sistema SCADA per a la supervisió del control i l'adquisició de dades; b) sistema ràdio per la transferència de dades entre els diferents components del sistema; c) ús de diferents aparells que permeten el control i monitoratge del cultiu; d) implementació de plaques solars en els aparells remots localitzats a camp per a tenir autosuficiència energètica; i e) càlcul en temps real del moment de tall del reg per maximitzar l'eficiència en l'ús de l'aigua (Smith et al., 2018).

RubiconWater es centra únicament en el reg per superfície, i per tant el nivell de detall i especificitat és major que el de l'empresa GM Poly, la qual també tracta amb sistema d'aspersió amb pivots.

La majoria de treballs sobre el reg per superfície automatitzat s'han dut a terme a Austràlia:

1. Koech *et al.* (2014a): L'estudi va posar a prova el sistema d'optimització del moment de tall del reg en temps real per obtenir valors d'eficiència òptims en l'ús de l'aigua. El projecte es va basar en la utilització d'una funció d'infiltració de l'aigua al sòl que, tractada amb el procediment d'escalat, permeti adaptar-se en temps real al reg en qüestió per optimitzar l'ús de l'aigua. Els autors van demostrar millores en les eficiències de l'ús de l'aigua i en la mà d'obra gràcies a la utilització del sistema d'optimització a temps real. Així doncs, van obtenir

que el temps de tall del reg proposat va ser menor que el de l'agricultor i van demostrar millors eficiències en l'ús de l'aigua, reduint també les hores de mà d'obra requerides.

2. Koech *et al.* (2014b): Les bases del projecte van ser les mateixes que les de Koech *et al.* (2014a). A diferència, van afirmar que si s'estimava acuradament el cabal d'entrada per realitzar el sistema d'optimització, encara que varies lleugerament el valor del cabal, no afectava greument als valors de les eficiències de l'ús de l'aigua del reg.
3. Uddin *et al.* (2014): L'estudi va demostra que hi havia una relació lineal entre el temps de tall del reg ( $T_{co}$ ) i el temps d'avanç al 50%. Els autors van obtenir una equació lineal per determinar el  $T_{co}$  en funció de la posició d'avanç. En aquest cas, la posició d'avanç ha de ser en el 50% de la parcel·la, o bé en el 90%.
4. Smith *et al.* (2018): Les bases del projecte són les mateixes que les de Koech *et al.* (2014a). A diferència, afirma que l'eficiència d'aplicació augmenta conjuntament amb el cabal d'entrada de reg fins un punt màxim, on encara que s'augmenti el cabal, l'eficiència d'aplicació (AE) romandrà constant i el valor de RE es veurà reduït. Així doncs, el cabal de reg òptim es defineix quan AE és màxima. També demostren que hi ha una relació lineal entre el temps de tall del reg i el temps d'avanç a mitja distància de la longitud total, com també van exposar Uddin *et al.* (2014). Així doncs, es pot obtenir el temps de tall coneixent quin és el temps que triga l'aigua en arribar al 50% de la parcel·la (a mig camí).

Pel que fa a Europa, l'únic projecte de reg per superfície automatitzat que s'ha realitzat és el de Masseroni *et al.* (2017), el qual utilitzant comportes automatitzades, controls amb resposta remota, i optimització dels cabals a temps real, va obtenir millores significatives en l'eficiència de l'ús de l'aigua en comparació amb el reg no automatitzat. Va concloure que el reg per superfície automatitzat permet: a) millorar l'eficiència en l'ús de l'aigua a partir del monitoratge i el control del cabal; b) incrementar la consciència del regant respecte a l'aigua utilitzada pel reg; c) reduir el temps dedicat a la gestió del reg; d) incrementar la disposició a adoptar noves tecnologies a escala de camp; e) incrementar la competitivitat els sistemes de reg per superfície respecte als pressuritzats.

En el treball que es presenta pretén obtenir valors específics de les eficiències requeriment, d'aplicació i pèrdues per percolació profunda per l'optimització del reg. D'aquesta manera s'ampliarien els treballs de Masseroni *et al.* (2017), on únicament es feia una valoració qualitativa.

### 1.2.2. MODELS DE SIMULACIÓ EN REG PER SUPERFÍCIE

Per implementar el sistema d'optimització de les eficiències en el reg, és indispensable la utilització de models hidrodinàmics. Aquests permeten simular com és el moviment de l'aigua, tot introduint unes característiques inicials i així obtenir la funció d'infiltració característica del sòl, per la post-optimització de les eficiències.

Els principals codis més utilitzats en el reg per superfície són:

- I. WinSRFR: Està basat en un model hidrodinàmic complet que permet obtenir la funció d'infiltració i els paràmetres del rendiment del reg (Bautista *et al.*, 2009; Bautista i Schlegal, 2019). Es tracta del model que s'ha utilitzat, en la seva última versió (5.1.), en el projecte que es presenta.
- II. SISCO: Està basat en un model hidrodinàmic complet que permet obtenir la funció d'infiltració i determinar el valor de la rugositat de Manning "n", on els models de balanç de volum tradicionals no ho permeten. Hi ha la funció "Autofurrow" que permet obtenir els valors de temps de tall del reg ( $T_{co}$ ) i cabal (Q), on s'optimitzen els valors de l'eficiència

d'aplicació (AE) i de requeriment (RE) a partir del procés d'escalat de la funció d'infiltració (Gillies i Smith, 2015).

- III. SIRMOD III: Està basat en un model hidrodinàmic complet que permet avaluar el disseny de camps (longitud i pendent) i pràctiques de gestió del reg. Incorpora la solució hidrodinàmica de les equacions de Saint Venant utilitzant una integració euleriana d'espai i temps (Alejo i Espino, 2020).
- IV. IPARM: és un model hidrodinàmic no complet que utilitza un balanç de volums simple per estimar els paràmetres necessaris en l'equació d'infiltració del sòl (Gillies i Smith, 2005).

En el projecte que es presenta es decideix utilitzar el model WinSRFR, amb l'última versió (5.1.), ja que és un model hidrodinàmic complet que permet obtenir els valors del rendiment del reg. És un software que està a disposició lliure i sense cap restricció. Mehri *et al.* (2023) conclouen que aquest software permet obtenir resultats amb nivells baixos d'errors relatius.

## 1.3. IMPORTÀNCIA DEL CONREU DEL BLAT DE MORO A ESPANYA I CATALUNYA

### 1.3.1. SUPERFÍCIE DE BLAT DE MORO CONREADA A ESPANYA I CATALUNYA

La producció de blat de moro a Espanya és molt important i ocupa la novena posició a Europa, amb un valor total de 4,4 Mt. Les produccions es destinen per alimentació humana, per alimentació animal, per fer esmenes agrícoles i per usos industrials (biocombustibles) (MAPA, 2010). A nivell estatal, la finalitat més emparada és per l'alimentació animal de porcs, ja que Espanya n'és un gran país productor i presenta altes necessitats de pinso per la seva alimentació. Entre totes les comunitats autònomes, Catalunya està situada a la quarta posició de principals productors de blat de moro, amb 482,4 kt anuals (Orús, 2023).

A la Taula 2 es mostra la distribució de l'agricultura del blat de moro a Catalunya, on Lleida és la principal província productora de gra, amb una producció d'11,46 t/ha en regadiu, mentre que Girona és la segona província, amb un rendiment d'11,34 t/ha en regadiu.

**TAULA 2:** Superfícies i rendiments del blat de moro a escala de províncies Catalanes. FONT: DACC (2021).

Províncies	Superfície (hectàrees)			Rendiment (kg/ha)		Producció de gra (tona)
	Secà	Regadiu	Total	Secà	Regadiu	
Barcelona	161	40	201	4.701	10.458	1.175
Girona	862	5.274	6.136	6.294	11.335	65.206
Lleida	98	31.361	31.459	4.807	11.465	360.025
Tarragona	2	21	23	2.500	10.000	215
<b>CATALUNYA</b>	<b>1.123</b>	<b>36.696</b>	<b>37.819</b>	<b>5.929</b>	<b>11.444</b>	<b>426.621</b>

A escala comarcal, en el Gironès hi ha una producció de 80 ha en secà i 234 ha en regadiu, on les produccions aproximades són de 7.500 kg/ha i 13.000 kg/ha respectivament. Aquests valors del Gironès són lleugerament superiors als obtinguts per tota la província de Girona, amb 6.294 kg/ha i 11.335 kg/ha respectivament (DACC, 2021).

Com a dades generals dels sistemes de reg a Catalunya, el reg per gravetat continua sent el mètode més emprat amb un decreixement del 3,98% respecte al 2012. Tot i això, durant el mateix període de temps el reg localitzat ha fet un augment del 7,54% (MAPA, 2022).

### 1.3.2. AGRONOMIA DEL CULTIU

El blat de moro pertany a la família de les poàcies i té un cicle anual. Presenta una alçada de 2,0-2,5 m. La tija és erecta, amb una separació entrenusos de 20-30 cm. L'arrel és fasciculada, cosa que permet fer una gran exploració del terreny en profunditat i amplada, fins als 40-60 cm. Les fulles surten dels nusos i són grans, amb forma lanceolada i molt allargades. Presenten una nervació paral·lela (OGTR, 2008).

És una planta monoica, on la inflorescència masculina (Figura 1) està disposada a la part superior i la femenina està disposada a 1 m del terra aproximadament (Figura 2), on un cop fecundada formarà la panotxa. Presenta una pol·linització creuada anemòfila, però també pot ser del tipus autopol·linitzadora (OGTR, 2008).



FIGURA 1: Flor masculina. FONT: Pròpia.



FIGURA 2: Flor femenina. FONT: Pròpia.

Malgrat la diversitat d'usos del cultiu, les principals finalitats del blat de moro són per fer farratge per alimentació animal (l'ensitjat es fa en l'estadi 85 [Weber i Bleiholder, 1990; Lancashire *et al.*, 1991], quan el cultiu encara és verd), o bé utilitzant el gra per alimentació humana o animal.

En la província de Girona, la sembra es fa des de mitjans de març fins a finals d'abril o inicis de maig, en funció de les condicions de la meteorologia i disponibilitats de l'agricultor. És una planta que morfològicament creix molt i, per tant, presenta altes necessitats de nutrients (N-P-K). Principalment requereix de nitrogen en abundància, ja que les extraccions són de 24 UFN (kg de Nitrogen/tones de gra sms) (OFTDR, 2019). Per tant, cal fer aportacions de nutrients abans i durant el cultiu. El reg no s'inicia fins a 4-5 setmanes després de la sembra, de manera que la planta creixi en unes condicions d'estrès hídric i així desenvolupi un sistema radicular potent. L'últim reg es fa a finals d'agost i llavors es deixa que el gra s'acabi de formar correctament a camp. La recol·lecció del gra es fa en la segona quinzena d'octubre, quan el gra ja està completament format i la humitat relativa és la comercial (14%).

## **1.4. MARC DEL TREBALL**

El treball s'emmarca dins dels següents projectes:

1. Girona, Regió Sensible a l'Aigua, amb codi GO03-001763, publicat el 25-4-2018 al DOGC núm. 7606. Concretament s'executa l'operació "Automatització, control i gestió dels canals de reg de les comunitats de regants del Baix Ter".
2. Ajut a les activitats de demostració aprovats mitjançant l'Ordre ARP/20/2017. El projecte està titulat, "Estalvi d'aigua i mà d'obra mitjançant l'automatització del reg per superfície", amb referència 56 30074 2019 5A.



## 2. OBJECTIUS

L'objectiu general del projecte és avaluar tècnica i econòmicament l'automatització del reg per superfície en parcel·la, així com comparar els resultats obtinguts amb el reg manual tradicional.

Els objectius específics són:

1. Comparar el reg automatitzat i el practicat per l'agricultor. S'analitzarà per a cadascun dels 2 casos:
  - a. L'evolució del cultiu per determinar la incidència del maneig del reg sobre els paràmetres vegetatius i productius.
  - b. Els índexs de qualitat del reg: AE (eficiència d'aplicació), RE (eficiència de requeriment, DP (percolació profunda).
  - c. La productivitat en l'ús de l'aigua assolit amb el WinSRFR.
  - d. El balanç econòmic.
2. Comparar dues metodologies pel càlcul de la dosi de reg requerida: a) a partir del contingut d'aigua inicial i la profunditat d'arrels i b) a partir del càlcul de l'evapotranspiració del cultiu entre regs. La finalitat de la comparativa és la determinació de la data dels moments de reg.
3. Determinar la funció d'infiltració representativa del sòl.
4. Optimitzar el maneig del reg en base a la determinació dels cabals i temps de tall més adequats. S'utilitzarà el codi WinSRFR 5.1 en 2 etapes: a) verificació de l'ajustatge del temps d'avanç experimental-model i b) determinació dels índexs d'eficiència per diferents escenaris relacionats amb el cabal i temps de tall.

### 3. MATERIAL I MÈTODES

#### 3.1. LOCALITZACIÓ I MORFOLOGIA DE LA PARCEL·LA

La parcel·la experimental estava localitzada al municipi de Sant Julià de Ramis, a la comarca del Gironès (Girona, Catalunya). La parcel·la era de fàcil accés i estava molt propera a la carretera N-II. La localització UTM exacta era: Fus 31 N ; X =488127.8m i Y=4653522.3m, a una alçada de 47 m respecte el nivell del mar (Figures 3 i 4).

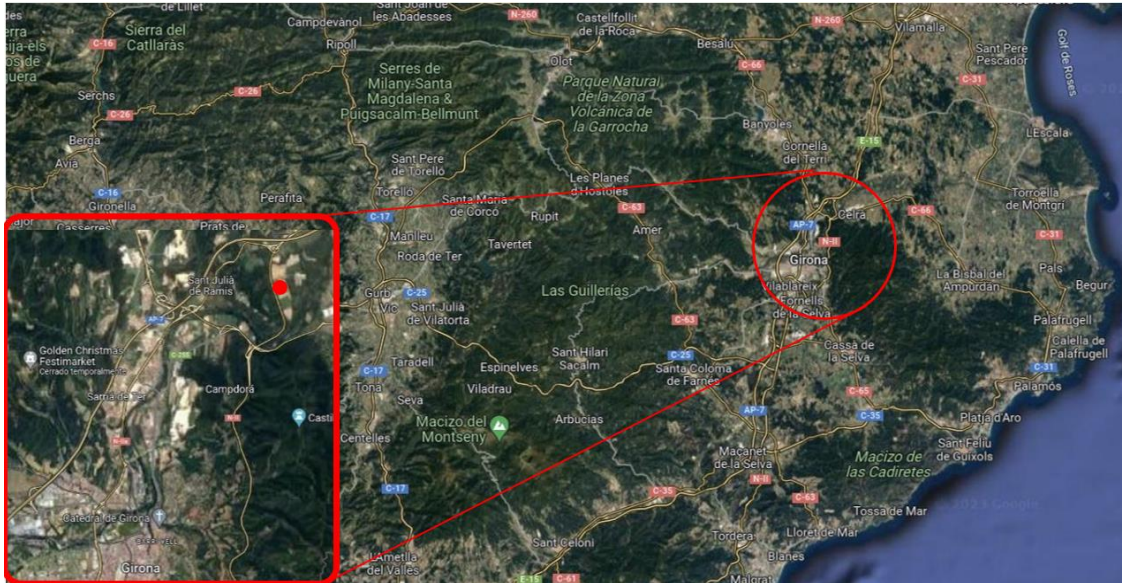


FIGURA 3: Situació de la parcel·la experimental. GoogleMaps.



FIGURA 4: Emplaçament de la parcel·la experimental (polígon groc). GoogleEarth.

La parcel·la presentava una geometria rectangular de 240x90 m (2,16 ha). Tenia la captació d'aigua de reg directament del canal principal de la comunitat de regants, de manera que presentava una plena disponibilitat d'aigua pel reg automatitzat.

El pendent de la parcel·la no era constant al llarg del camp (Figura 5) i s'observava un gran pendent en els primers 100 m, en comparació a la resta del camp que va ser gairebé horitzontal.

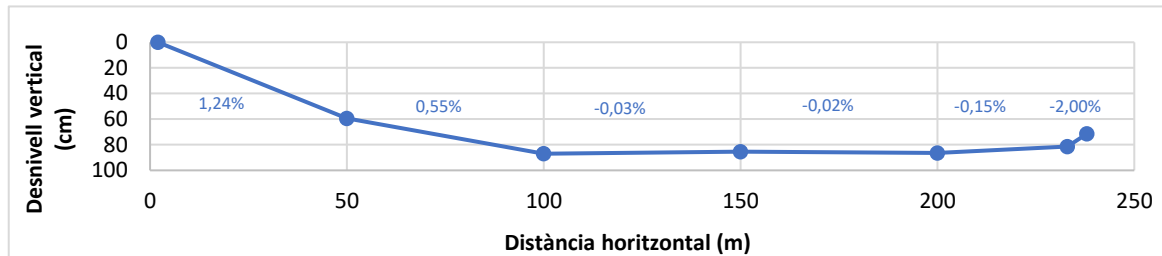


FIGURA 5: Representació del perfil topogràfic de la parcel·la. FONT: Pròpia.

La diferència de nivell en els últims 5 m pot ser deguda a com estaven distribuïdes les regues en aquella zona. L'agricultor va sembrar els últims 5 m en direcció perpendicular a les altres. Com a conseqüència, no es van poder regar bé les últimes regues, ja que el solc no permetia la correcta comunicació de l'aigua.

La parcel·la es va regar gràcies al canal de reg de Sant Jordi Desvalls, el qual subministra aigua per al reg als termes municipals de Sant Julià de Ramis, Medinyà, Cervià de Ter, Sant Jordi Desvalls i Colomers. El canal principal, amb una longitud de 20 km, presenta una secció rectangular oberta en pràcticament tot el seu traçat, a excepció d'alguns trams entubats per al encreuament de camins, carreteres i poblacions. La distribució de l'aigua va ser en làmina lliure, de manera que el reg dels cultius (majoritàriament blat de moro) es va realitzar per gravetat. Al llarg del canal hi havia diverses comportes automatitzades que permetien el control remot del cabal o de la làmina d'aigua amunt o avall de cada comporta.

### 3.2. CARACTERITZACIÓ METEOROLÒGICA

Els principals factors meteorològics a considerar són la precipitació i la temperatura, a més d'altres factors influents en el càlcul de l'evapotranspiració de referència (ET<sub>o</sub>), com són la humitat relativa, la intensitat del vent i la radiació solar.

La precipitació anual dels últims 10 anys és de 683 mm, tot i que en els últims 2 anys ha estat per sota de la mitjana. Durant l'època del cultiu (juny-setembre), la precipitació mitja és de 222 mm, mentre que la campanya del 2022 va ser de 165 mm (SMC, 2023).

Destaca l'augment de temperatura de l'any 2022 en relació als anys anteriors, ja que la mitjana dels últims 10 anys era de 14,7 °C, mentre que el 2022 va ser de 15,8 °C. Durant l'època del cultiu (juny-setembre), la temperatura màxima va ser de 38,4 °C, mentre que durant la campanya del 2022 va ser de 40,8 °C (SMC, 2023).

Això va implicar canvis en la freqüència de reg i en l'evolució fenològica de la planta respecte a temprades normals.

### 3.3. CARACTERÍSTIQUES FÍSiques, QUÍMIQUES I HIDROLÒGIQUES DEL SÒL

Les anàlitzes de sòl es van fer en dues zones: a) zona canal (en els primers 80 m de les regues) i b) zona del camí (en la resta del camp). La presa de mostres de sòl es va fer a 2 profunditats: 0-20 cm i 20-40 cm. Les mostres analitzades eren compostes, és a dir, que s'agafaven mostres en tres punts repartits per la zona i es barrejava i homogeneïtzava per obtenir una sola mostra final, l'anàlitzada. Les mostres es van analitzar en un laboratori amb acreditació ENAC. A la Taula 3 es mostren els resultats dels anàlisis.

**TAULA 3:** Resultats de les anàlisis físics i químics del sòl de la campanya del 2022. FONT: Pròpia.

Característiques	Mostra de sòl			
	0-20 canal	20-40 canal	0-20 camí	20-40 camí
<b>PROPIETATS BàSIQUES</b>				
pH	8,1	8,2	8,1	7,8
CE en extracte 1:5 (25º) (dS/m)	0,23	0,18	0,23	0,39
Matèria Orgànica oxidable (% sms)	2,57	1,46	2,57	2,98
Carbonat Càlcic equivalent (% sms)	26,02	17,43	26,02	25,47
<b>NUTRIENTS</b>				
Nitrogen (N) (% sms)	0,16	0,13	0,16	0,20
Fòsfor (P) Olsen (mg/Kg sms)	72,2	45,8	72,2	157
Potassi(K) (mg/Kg sms)	340	199	340	553
Calci (Ca) (mg/Kg sms)	6443	5080	6443	5828
Magnesi (Mg) (mg/Kg sms)	261	156	261	311
<b>RELACIONS D'INTERÈS</b>				
C/N	9,52	6,69	9,52	8,56
<b>PROPIETATS FÍSiques</b>				
Argila <0,002 mm (%)	31,7	21,5	31,7	27,7
Llims total 0,002-0,05 mm (%)	26,7	21,3	26,7	26,8
Arena total 0,05-2 mm (%)	41,6	57,3	41,6	45,5
Textura	Franco-Argilosa	Franco-Argillo-Arenosa	Franco-Argilosa	Franco-Argillo-Arenosa

A continuació, d'acord amb la "Guia d'interpretació d'anàlisis de sòls i plantes" (Villar i Arán, 2008) es valoren els paràmetres analitzats.

- 1) Propietats bàsiques: El pH era moderadament bàsic, però sense cap restricció pel cultiu de blat de moro; la CE va ser correcta, no presentava salinitat; el nivell de matèria orgànica oxidable era mig-alt, en excepció de "20-40 camí" que era mig-baix; respecte al carbonat càlcic equivalent es va classificar el sòl com a calcari, essent el nivell més elevat a la zona del canal.
- 2) Fertilitat: El nivell de nitrats era mig-alt en el cas de "20-40 camí", mentre que a la resta era alt; els valors de fòsfor van ser molt alts, ja que superaven el líndar màxim proposat de 36 ppm; els valors de potassi eren molt alts, ja que el líndar va ser de 250 ppm; respecte al

magnesi, els valors eren normals en el camí, mentre que eren alts en el canal; els valors de calci van ser alts, sobretot en la zona del canal, ja que van ser superiors a 4.000 ppm.

- 3) Relacions d'interès: La relació del C/N propera a 10 significa que el sòl estava equilibrat, amb un control entre l'alliberació del nitrogen mineral i el contingut de carboni al sòl.
- 4) Granulometria: La zona propera al canal presentava una textura més pesada que la del camí, propietat fàcilment observable a camp.

El contingut d'aigua -33 kPa, conegut també com capacitat de camp (Taula 4) es va determinar a partir de la textura del sòl, el contingut de matèria orgànica i la conductivitat elèctrica (CE), d'acord amb Saxton i Rawls (2023).

**TAULA 4:** Contingut volumètric a capacitat de camp per cada mostra i profunditat de sòl analitzades. FONT: Pròpia.

CONTINGUT VOLUMÈTRIC A CAPACITAT DE CAMP (%)		
LOCALITZACIÓ	PROFUNDITAT	CC (%)
CANAL	0-20 cm	33
	20-40 cm	30,9
CAMÍ	0-20 cm	23,4
	20-40 cm	24,5

### 3.4. CARACTERÍSTIQUES DE L'AIGUA DE REG

Per determinar la qualitat de l'aigua de reg del canal de Sant Jordi, es va analitzar una mostra en data 03/08/2022, la qual va donar els resultats mostrats a la Taula 5.

**TAULA 5:** Anàlisi de l'aigua del canal de reg de la campanya del 2022. FONT: Pròpia.

PROPIETATS BÀSIQUES	
pH	8,2
CE (25º) (dS/m)	0,59

NUTRIENTS	
Nitrats (NO3) (mEq/l)	0,025
Clorurs (Cl) (mEq/l)	1,300
Sulfats (SO4) (mEq/l)	1,470
Fluorurs (F) (mEq/l)	0,007
Carbonats (mEq/l)	<0,060
Sodi (Na) (mEq/l)	3,190

D'acord amb la guia d'interpretació d'una anàlisi d'aigua per regar (Monge, 2017):

- 1) Propietats bàsiques: El pH va ser moderadament bàsic, però sense cap restricció pel cultiu de blat de moro; la CE era correcta, no presentava salinitat.
- 2) Anions i cations: El nivell de nitrats, clorurs, sulfats, fluorurs i sodi van ser normals i sense cap restricció; en el cas del carbonat va ser un valor acceptable, però presentava lleugera restricció.

### 3.5. DISSENY EXPERIMENTAL

La parcel·la, que formava part d'un treball de recerca més extens, estava dividida en dues zones, segons el criteri de reg practicat:

- **ZONA/PARCEL·LA AUTOMÀTICA:** es va regar segons criteris tècnics (evapotranspiració del cultiu, contingut d'aigua al sòl) que es van suportar amb la tecnologia instal·lada a camp. La zona s'abreuja com AUT.
- **ZONA/PARCEL·LA AGRICULTOR:** es va regar segons el criteri de l'agricultor; la zona s'abreuja com AG.

Cada zona, que ocupava una superfície aproximada d'una hectàrea, estava dividida en 2 subzones, és a dir, que la parcel·la experimental va quedar distribuïda de la següent forma (Figura 6):

- **BAY-1:** Està regat amb el criteri AUT. Superfície: 0,57 ha.
- **BAY-2:** Està regat amb el criteri AUT. Superfície: 0,52 ha.
- **BAY-3:** Es rega segons el criteri AG. Superfície: 0,51 ha.
- **BAY-4:** Es rega segons el criteri AG. Superfície: 0,51 ha.

Aquest treball experimental es va desenvolupar fonamentalment en les parcel·les BAY-2 i BAY-3, en les quals es van dur a terme totes les mesures experimentals descrites en l'apartat 3.9. En les parcel·les BAY-1 i BAY-4 únicament es va mesurar el cabal d'entrada per poder executar les simulacions i obtenir els paràmetres de qualitat del reg.

El reg per superfície en aquesta parcel·la va ser a solcs, és a dir, que entre cada fila de cultiu hi havia un solc per on se subministrava l'aigua. La distribució de regues es va veure afectada amb petites variacions: en la zona AG (BAY-3 i BAY-4) hi ha 30 regues, mentre que en la zona AUT (BAY-1 i BAY-2) hi ha 29 i 31 regues respectivament.

Els elements que s'observen a la Figura 6 pertanyen al material utilitzat per efectuar i gestionar el reg (Bladevalve, Pikometer i Quarterturn), mentre que la Weather Station és l'element que es va utilitzar per recollir dades meteorològiques.

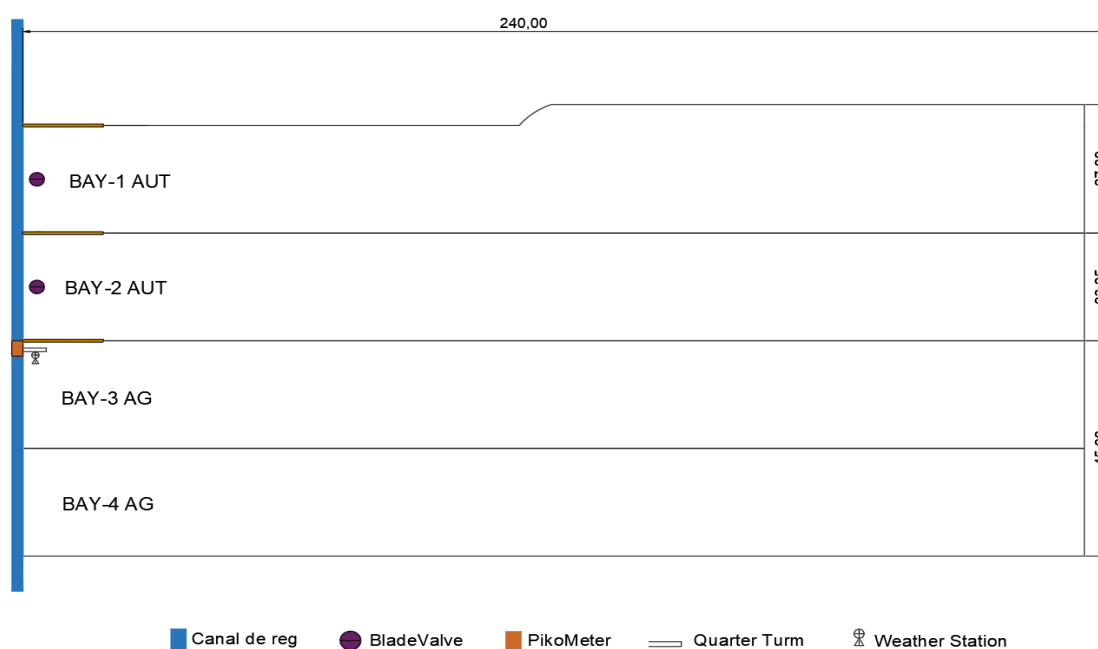


FIGURA 6: Distribució general de la parcel·la. FONT: Pròpia.

### 3.6. DESCRIPCIÓ DE LA INSTAL·LACIÓ DE REG

La gestió del reg estava basada en un sistema de vàlvules i comportes. A continuació es descriuen i detallen els diferents elements que componen la instal·lació de reg.

El primer element seguint el flux de l'aigua va ser la comporta de guillotina (Figura 8b) que estava situada en el punt de captació d'aigua del canal (Figura 7a i 8a). Concretament, es tractava de la comporta Pikometer (RubiconWater, Melbourne, Austràlia). Era una comporta que permetia variar el volum d'aigua que es volia fer entrar en la parcel·la a partir del control de la làmina d'aigua o del cabal. En l'assaig portat a terme, el control de l'aigua entrant a la parcel·la es va realitzar mitjançant la regulació del cabal. El cabalímetre feia lectures amb freqüència variable, és a dir, quan no hi havia consigna de reg ho feia cada 20 minuts, mentre que durant el reg era cada 1-2 minuts.

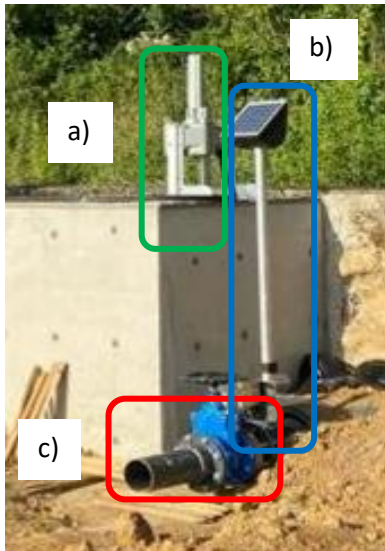
Les dades de cabal de la comporta es desaven al núvol, on es podien visualitzar i descarregar. La font d'alimentació de la comporta era gràcies a la placa solar que disposava i que estava col·locada en un pedestal. La vàlvula Pikometer, a través de la plataforma SCADAConnect (RubiconWater, Melbourne, Austràlia) permetia regular el cabal d'aigua (Q) entrant a cada BAY i el temps de tall (Tco). Aquest sistema permetia fer el registre de les dades i fer un reg el màxim acurat possible a les necessitats del cultiu.

Per poder instal·lar la Pikometer va ser necessari realitzar una obra civil que va consistir en una ampliació del canal de reg en el punt de captació de la parcel·la, com s'observa a la Figura 8a.

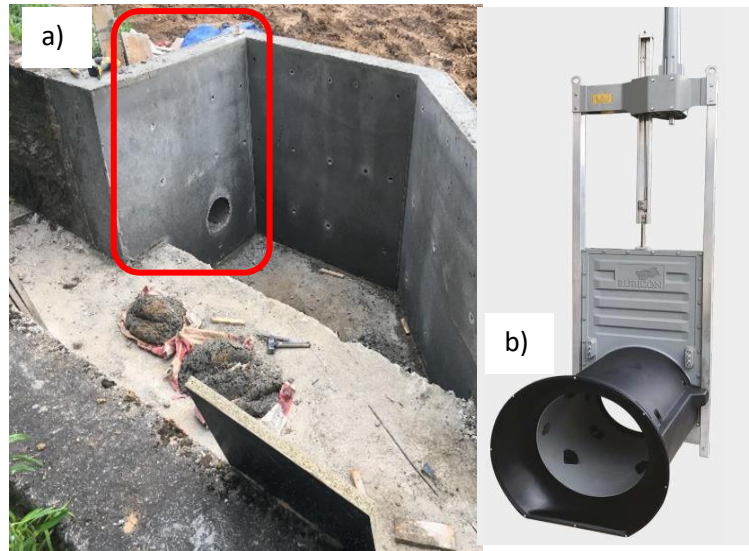
La distribució de l'aigua de la Pikometer fins a la parcel·la va ser gràcies a una canonada de PVC DN315. Una bifurcació en forma de "T" va permetre distribuir l'aigua de reg a les parcel·les AG i AUT.

En la zona AG, un cop l'aigua sortia de la Pikometer, es trobava amb una vàlvula automatitzada anomenada Quarterturn (RubiconWater, Melbourne, Austràlia); la finalitat d'aquesta vàlvula no era regar en sí, sinó que era una eina que permetia evitar que l'agricultor regués durant el torn de la zona AUT. Seguint de la Quarterturn hi havia una vàlvula de papallona manual de DN150 i que l'agricultor obria o tancava en funció de la seva necessitat de regar. Per transportar l'aigua fins a l'inici dels solcs, l'agricultor utilitzava mànegues de polietilè que s'estenien per l'inici del camp a l'hora de regar, com s'observa a la Figura 9. Prèviament al reg 1, l'agricultor va haver de foradar els punts de sortida de l'aigua convenient distribuïts. A la Figura 7 s'il·lustren els diferents elements esmentats.

La zona AUT utilitzava un altre sistema per fer arribar l'aigua fins a les regues. Concretament, es va fer ús de les vàlvules Bladevalve (RubiconWater, Melbourne, Austràlia), alimentades per una canonada amb DN400. La vàlvula permetia el desguàs de l'aigua al camp i que es distribuís per totes les regues. Aquestes vàlvules s'obrien en forma de papallona. L'energia per poder obrir-se era gràcies a la placa fotovoltaica que tenia adossada. A la Figura 10 s'observa la Bladevalve en ple funcionament. Per poder regar amb més uniformitat entre regues es va dissenyar un sistema perquè la làmina d'aigua guanyés cota i després vessés per cada rega de forma més uniforme. Aquest sistema rep el nom de "ponton". Les dimensions van ser de 22,5 m (30 regues) per 15 m de llargada, amb una alçada de 0,3-0,4 m. En la Figura 14b s'observa el "ponton".



**FIGURA 7:** a) de color verd la Pikometer; b) de color blau la Quarterturn; c) de color vermell la vàlvula normal de l'agricultor.  
FONT: Pròpia.



**FIGURA 8:** a) Eixamplament del canal per col·locar la Pikometer; b) Pikometer utilitzada. FONT: a) Pròpia; b) RubiconWater (2013).



**FIGURA 9:** Reg amb mànega de PE flexible en la zona de l'agricultor. FONT: Pròpia.



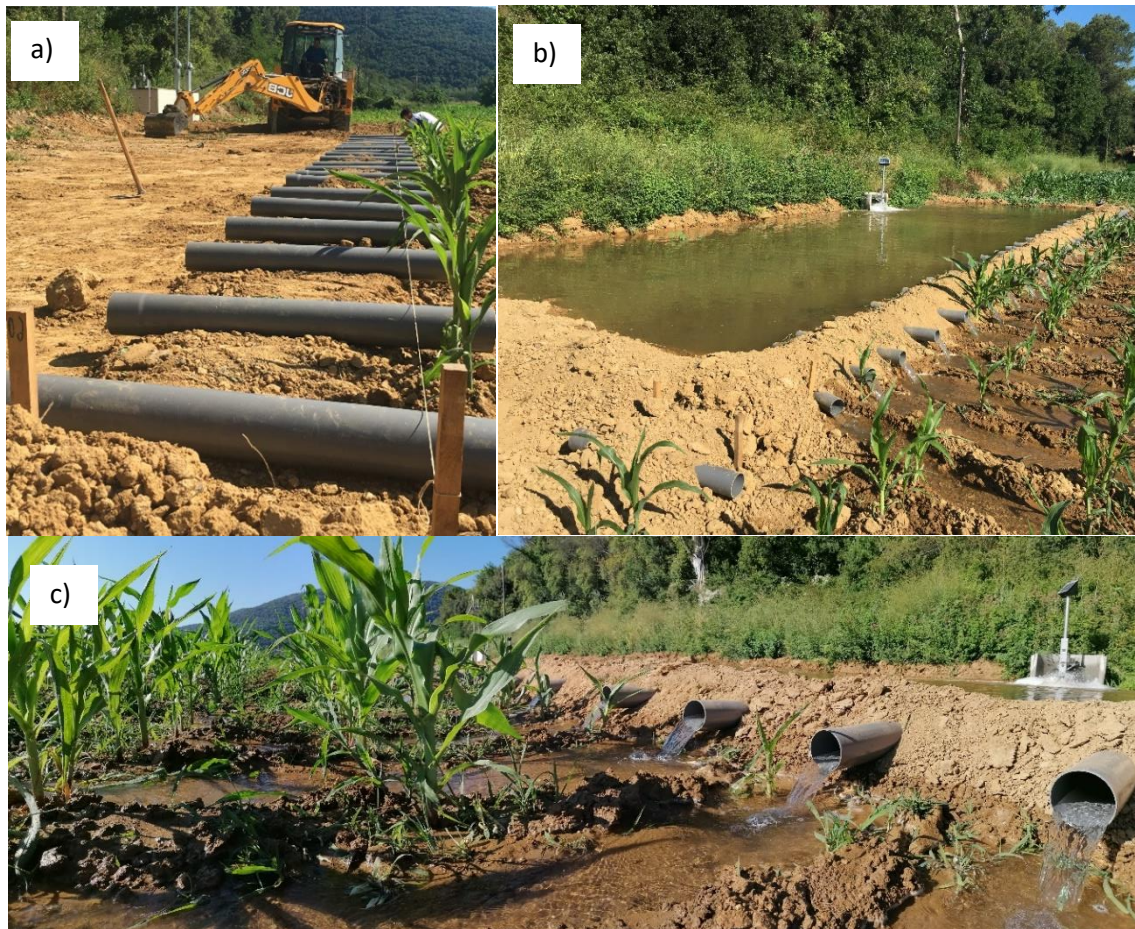
**FIGURA 10:** Reg en la zona AUT amb les Bladevalves. FONT: Pròpia.

Un cop finalitzat el reg 1, es va observar com la distribució de l'aigua en sortir de la Bladevalve era molt dolenta, ja que es movia segons la cota d'energia i l'anivellació del camp no era la correcta. Com a conseqüència, implicava que l'aigua no tingués una distribució uniforme per totes les regues. Per solucionar-ho, amb una aixada i es va anar conduint l'aigua manualment entre les regues, evitant que algunes tinguessin excés i altres mancances d'aigua. La reconducció de l'aigua per les regues va comportar una despesa d'hores de personal molt important, cosa que s'ha d'evitar.

Finalitzat el reg 1, per reduir l'excés d'hores de mà d'obra necessàries es va utilitzar el "pontoon" i es va decidir posar una canonada de PVC de DN110 per a cada rega i així facilitar la distribució de l'aigua. Les canonades es disposaven a sobre de la mota i es compactaven amb l'ajuda de la retro-excavadora, que agafava terra dels primers 15 m on no hi havia cultiu, per posar-ho a sobre dels tubs. Per saber quanta terra s'havia d'afegir i que totes les regues estiguessin anivellades, es va fer un aixecament



topogràfic. Amb l'ajut de piquetes i un cordill es va marcar el nivell desitjat, com es veu a la Figura 11a. En la Figura 11b i 11c es pot observar els tubs PVC a camp i com va ser el seu reg.



**FIGURA 11:** a) col·locació dels tubs de PVC a nivell; b) inici del reg amb el "poontom" ple; c) distribució de l'aigua en cada reça gràcies als tubs de PVC. FONT: Pròpia.

El 10 de maig del 2022 es va sembrar el camp amb blat de moro (*Zea mays* Linnaeus, 1753) amb la varietat *Pioneer 0937* que destaca per l'excel·lent nivell productiu, la regularitat en la producció i el ràpid assecat del gra. A més, també presenta certa tolerància als fongs *Cephalosporium* i *Helminthosporium*. El cultiu pot ser utilitzat per finalitats de gra i per ensitjat. Està classificada amb un cicle mig-llarg, del tipus FAO 500-600 (Corteva Agriscience, 2023). La dosi de sembra va ser de 75.000 llavors/ha, amb un marc de sembra de 0,75x0,17 m. Es va utilitzar una sembradora monogrà.

Com s'ha comentat abans, la nutrició de la planta és un factor essencial pel seu correcte desenvolupament, així que es van fer un seguit d'aportacions: 1) abans de sembrar, en data de 01/03/2022 es van aplicar 180 UF de N, 112 UF de  $P_2O_5$  i 330 UF de  $K_2O$ , aplicats amb 40 m<sup>3</sup> de purí de porcí; 2) aplicació de 200 kg/ha del fertilitzant 8-6-14 en data de 05/04/2022; 3) aplicació de 190 kg/ha del fertilitzant N32 en data de 05/06/2022.

## 3.8. GESTIÓ DEL REG A LES PARCEL·LES AUTOMATITZADES

### 3.8.1. CRITERIS DE REG I DETERMINACIÓ DE LES VARIABLES

A l'hora de regar, una de les qüestions que generava més controvèrsia per la gestió de les subparcel·les AUT era quines consignes de Q entrant i Tco s'havien de seguir, ja que l'única referència que es disposava era l'article Smith *et al.* (2005), el qual conclou que en utilitzar un cabal alt les eficiències d'aplicació són pròximes al 75%. Per determinar els valors de consigna (Q i Tco) es van utilitzar els coneixements tècnics del grup de recerca i la informació extreta de Smith *et al.* (2005).

En el reg 1 es va utilitzar un cabal de consigna entrant a la rega de 2,5 l/s durant un temps d'1h 58'. Es va observar com el cabal utilitzat era molt gran i les regues no suportaven tant de volum, cosa que va provocar desbordaments. Després del reg 1 es va implementar el sistema dels tubs PVC al "pontoon" per millorar la distribució del reg. També es van reduir els cabals d'entrada a les regues per evitar desbordaments. Els cabals utilitzats en el reg 2 i reg 3 van ser de 1,42 i 0,90 l/s respectivament.

Després de dur a terme els primers regs (del primer al tercer) es va observar com l'aigua circulava a molta velocitat en el tram inicial de les regues, cosa que dificultava i reduïa la infiltració en aquesta zona. Això passava a causa de l'elevat pendent en els primers 50-100 metres (Figura 5). Com a possible solució, es va optar per utilitzar un cabal variable en futurs regs. Va consistir en regar aquest tram inicial amb un cabal baix perquè l'aigua pogués infiltrar millor en la zona amb pendent pronunciat i posteriorment augmentar el cabal, ja que el pendent era gairebé zero i l'aigua pogués arribar al final del camp.

Al reg 4 es va utilitzar l'estratègia de cabal variable, on primer es va regar amb un cabal de 0,68 l/s durant 2h 45' i després es va augmentar el cabal fins a 1,22 l/s, amb un temps de tall de 2h 21'. En total, el reg va durar 5h 6'.

La gestió dels regs 1 a 4 va permetre recollir dades suficients per establir un criteri de reg pel reg 5 i pel reg 6. El criteri es basava en saber quina era la làmina d'aigua necessària a aportar en cada reg perquè les condicions de la planta fossin òptimes, és a dir, que la zona radicular tornés a estar a capacitat de camp. El càlcul de la làmina d'aigua a aportar es va recolzar en les dades de les sondes de contingut d'aigua al sòl i l'ETc. Gràcies al codi WinSRFR (descriu en l'apartat 3.10.1.) es van modelar els nous regs, establint un Q i Tco que corresponguessin a valors d'eficiència òptims. Aquests dos últims regs es van programar completament, és a dir, que ja estava consignada l'hora d'inici i fi del reg, cosa que no s'havia fet en els regs anteriors, ja que sempre es donava la consigna de finalitzar el reg d'acord amb les observacions a camp en temps real.

Totes les consignes de Q i Tco recollides gràcies al cabalímetre implementat a la comporta Pikometer es mostren a la Taula 6.

Per valorar la gestió del reg es va tenir en compte el volum d'aigua utilitzat i els índexs d'eficiència del reg. El volum es va determinar amb el comptador volumètric, mentre que els índexs es van calcular amb el codi WinSRFR que s'explicarà posteriorment.

**TAULA 6:** Cabal de consigna i temps de tall (Tco) en cada reg. FONT: Pròpia.

Nº Reg	Cabal (l/s)	Tco (hr:min)
Reg 1	2,50	1:58
Reg 2	1,42	4:13
Reg 3	0,90	7:00
Reg 4	0,68	2:45
	1,22	2:21
Reg 5	0,68	2:43
	1,22	1:30
Reg 6	0,68	2:44
	1,22	2:02

### 3.8.2. PROGRAMACIÓ DELS REGS. FARMCONNECT

La gestió i automatització del reg es va fer gràcies al programa de FarmConnect (RubiconWater, Melbourne, Austràlia). El sistema utilitzat requeria introduir les dades de: a) el sector de reg (BAY-1-AUT o BAY-2-AUT); b) moment d'inici del reg (dia i hora); c) durada del reg; d) ajust del reg (en cas de precipitació, es podia contrarestar l'aportació extra d'aigua amb una reducció de la durada del reg), o bé, en dies on les necessitats hídriques augmentaven, es podia incrementar la durada del reg. El funcionament era amb percentatges, així que un ajust del 70% equivalia a una reducció del 30% a la durada del reg. La funció ajust del reg estava incorporada al programa, però no va ser utilitzada en aquest treball.

Actualment, l'aplicació del FarmConnect està en fase de desenvolupament, de manera que s'està implementant un sistema que permeti sincronitzar les sondes de contingut d'aigua al sòl amb la programació del reg, cosa que els diferencia dels altres programadors de reg. D'aquesta manera, el reg es podria fer de forma semi-autònoma amb les lectures de les sondes. El funcionament consisteix en utilitzar les sondes de contingut d'aigua disposades al sòl i quan aquestes arriben al llindar mínim determinat, l'agricultor rep un avís que cal regar, així doncs ja es pot executar l'operació. El sistema no està pensat perquè sigui una operació totalment automàtica, sinó com una eina que ajuda a determinar el dia de reg. Aquest procediment és el que està definit en el manual d'usuari del FarmConnect (RubiconWater, 2013).

## 3.9. PRESA DE DADES DE CAMP I ACTIVITATS

En aquest apartat es presenten les tasques necessàries per a la presa de mostres. Es classifiquen en dues temàtiques, en funció del moment d'actuació i les repeticions necessàries.

### 3.9.1. ABANS DE L'INICI DEL REG

#### 3.9.1.1. AIXECAMENT TOPOGRÀFIC

Es va dur a terme el 2 de juny, quan el cultiu ja estava sembrat, utilitzant un taquímetre. Primer es va fer l'anivellament, el qual consistia en determinar l'alçada exacta de l'estació i col·locar-la perpendicular al sòl. Es mesurava l'alçada als diferents punts del camp amb l'ajuda de la mira taquimètrica i així poder representar la cota i el pendent. Els diferents punts mesurats són els que s'observen a la Figura 5.

#### 3.9.1.2. MARCATGE DE REGUES A ESTUDIAR

Les mesures d'avançament de l'aigua es van dur a terme a les regues 10-11-19-20 de la zona AUT la BAY-2 (Figura 6). Per aconseguir-ho, després del cavallonat de les regues es van instal·lar piquetes cada 10 metres indicant-hi la longitud, de manera que a l'hora de regar es pogués mesurar l'avançament de l'aigua a les regues monitoritzades. En la Figura 12 es mostra com es col·locaven les piquetes.



FIGURA 12: Col·locació de les piquetes amb la seva distància corresponent. FONT: Pròpia.

### 3.9.2. DURANT LA TEMPORADA DE REG

#### 3.9.2.1. DADES METEOROLÒGIQUES

Per tenir un millor monitoratge i avaluació es va col·locar l'estació meteorològica Weather Station (RubiconWater, Melbourne, Austràlia), que permetia obtenir dades de temperatura màxima i mínima, humitat relativa màxima i mínima, velocitat i direcció del vent, pressió atmosfèrica i radiació solar. L'estació estava agrupada en un cos cilíndric i estava protegida amb unes punxes dels ocells. Aquesta estació estava alimentada gràcies a la placa solar que disposava. Les dades es recollien i s'enviaven al núvol, que després es podien baixar gràcies a l'aplicació de SCADAConnect. La freqüència de lectura

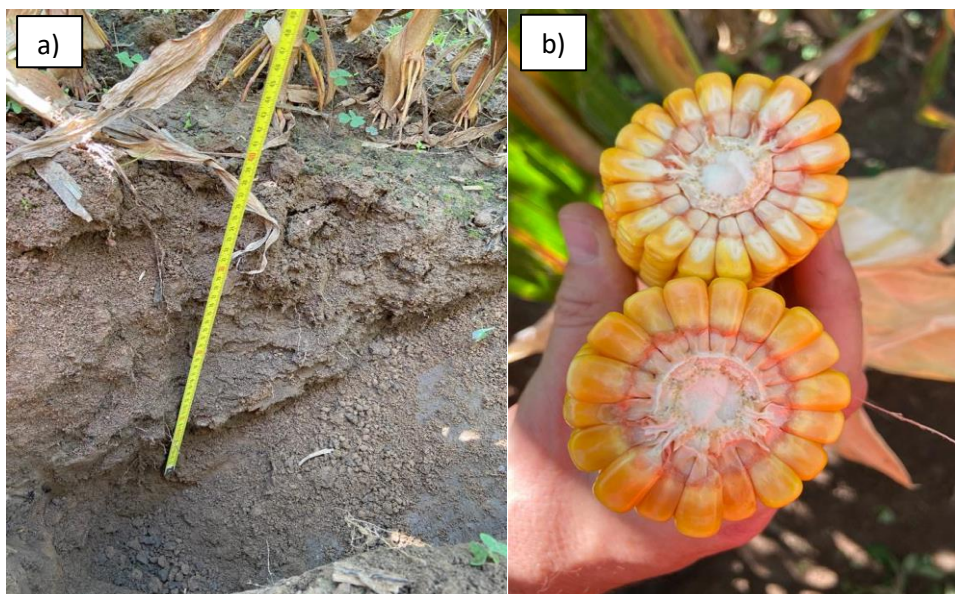
era de 30 minuts. A la Figura 19 s'observa com és la infraestructura de l'estació meteorològica amb el pedestal i la placa fotovoltaica.

Durant la temporada de reg també es van recollir les dades registrades per l'estació meteorològica de Girona, pertanyent a la xarxa d'estacions meteorològiques automàtiques (XEMA) del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC, 2023). Això va permetre contrastar les dades climàtiques recollides per la Weather Station.

### 3.9.2.2. DESENVOLUPAMENT DEL CULTIU

#### - ESTADIS FENOLÒGICS

Els seguiments fisiològic i fenològic de la planta es van mesurar amb una periodicitat de 15-25 dies i es van agafar mesures de l'alçada de la planta i de la profunditat radicular. En el cas de l'alçada de la planta, es mesurava des de la base fins a la part superior, on s'iniciava la flor masculina. En el cas de la profunditat radicular, calia fer un sot a terra amb l'ajuda de l'aixada per mesurar fins on arribava la màxima densitat radicular, com s'observa a la Figura 13a. Durant els primers 20 dies després de sembra no es va realitzar la mesura de profunditat radicular, evitant així possibles danys i interferències en el creixement de la planta.



**FIGURA 13:** a) lectura de la profunditat radicular; b) valoració de l'estadi de la planta durant la maduració del gra.

FONT: Pròpia.

L'estadi fenològic de la planta es va mesurar utilitzant la classificació BBCH (Weber i Bleiholder, 1990; Lancashire *et al.*, 1991), on en funció del nombre de fulles, alçada, qualitat de la panotxa i consistència dels grans es podia saber en quin estadi es trobava. Un dels estadis amb la classificació BBCH va ser avaluar la consistència del gra, com s'observa a la Figura 13b.

#### - DETERMINACIÓ DE LA BIOMASSA

La determinació de la biomassa va consistir en prendre mostres de plantes per després separar els diferents òrgans aeris (tija, fulla i panotxa) al laboratori i mesurar el pes fresc i el pes sec. Les mostres

s'agafaven de 4 plantes aleatòries de la parcel·la AUT i 4 més de la parcel·la AG. El procediment variava en funció del moment d'estudi, ja que fisiològicament la planta era diferent després del primer reg i dies abans de la recol·lecció. En un inici només es va separar la part aèria de tiges i fulles. Quan la panotxa ja estava ben desenvolupada, es separaven les fulles, tija i panotxa. A mesura que el gra agafava consistència, es separaven fulles, tija, panotxa i gra (com s'observa a la Figura 14), i d'aquest últim també se'n mesurava el volum (expressat en hectolitres) i el pes de mil grans per posteriorment fer l'estimació de la producció final en matèria seca. Les mesures es feien amb una freqüència periòdica de 15-25 dies. Aquestes dades eren útils per comparar els resultats en funció del tipus de reg i mirar si les diferents gestions de l'aigua resultaven en canvis en la biomassa i la producció. També van permetre fer un seguiment de l'evolució del cultiu.



**FIGURA 14:** Anàlisi de la panotxa amb el gra ben desenvolupat. FONT: Pròpia.

### 3.9.2.3. CABAL DELS SOLCS

La mesura del cabal entrant a la rega de la parcel·la AUT es va mesurar utilitzant una galleda per recollir el volum, un cronòmetre per mesurar el temps i una proveta graduada amb precisió de  $\pm 50$  mL per fer la mesura del volum de l'aigua. Abans de prendre les mesures, es van enumerar tots els tubs de PVC de les regues amb l'ajuda d'un retolador permanent. Aquesta mesura es va fer dues vegades per a cada rega i se'n va calcular el valor mig.

Cal tenir en compte que en el reg 1 de la parcel·la AUT la distribució de les regues no va permetre mesurar el cabal directe, ja que no hi havia els tubs de PVC, així que es va obtenir el cabal teòric a partir del cabal de consigna entrant de la Pikometer dividit pel nombre de regues. A partir del reg 2, la mesura del cabal es va realitzar seguint el procés descrit anteriorment de mesura de volum i temps. Així doncs, es va distingir entre el cabal teòric de consigna i el cabal mesurat i aplicat al solc.

En el cas de la parcel·la AG, el cabal el va decidir el propi agricultor. Per validar-ho es va realitzar la mesura a camp amb el primer procediment descrit per la zona AUT.

#### 3.9.2.4. TEMPS D'AVANÇAMENT

Consisteix a mesurar el temps que trigava a avançar l'aigua fins a determinats punts en els solcs estudiats en cada reg. La mesura es va realitzar únicament en les regues on hi havia piquetes (10-11-19-20) de la zona AUT BAY-2. La posició en què es trobava l'aigua en cada moment es podia conèixer gràcies a les estaques instal·lades en el marcatge de les regues (Figura 12). Es va agafar com a moment inicial l'inici del reg i s'anotava quin temps trigava en avançar fins a les estaques. Aquestes mesures havien de permetre fer la modelització i estimació de les eficiències de cada reg.

#### 3.9.2.5. GEOMETRIA DELS SOLCS

Una altra dada bàsica que demanava el codi WinSRFR per fer la modelització era la forma del solc, és a dir, quina era la secció per on es transportava l'aigua. Per mesurar aquesta geometria es va utilitzar un perfilòmetre, el qual era una barra graduada que mesurava la profunditat amb una precisió de  $\pm 0,05$  m (Figura 15). Consistia en fer les mesures al llarg de l'amplada de la rega, cada 2 cm. El mostreig es va fer en dues regues aleatòries del camp AUT i dues més del camp AG.



FIGURA 15: Lectura del perfil del solc amb l'ajuda del perfilòmetre. FONT: Pròpia.

#### 3.9.2.6. CONTINGUT D'AIGUA AL SÒL

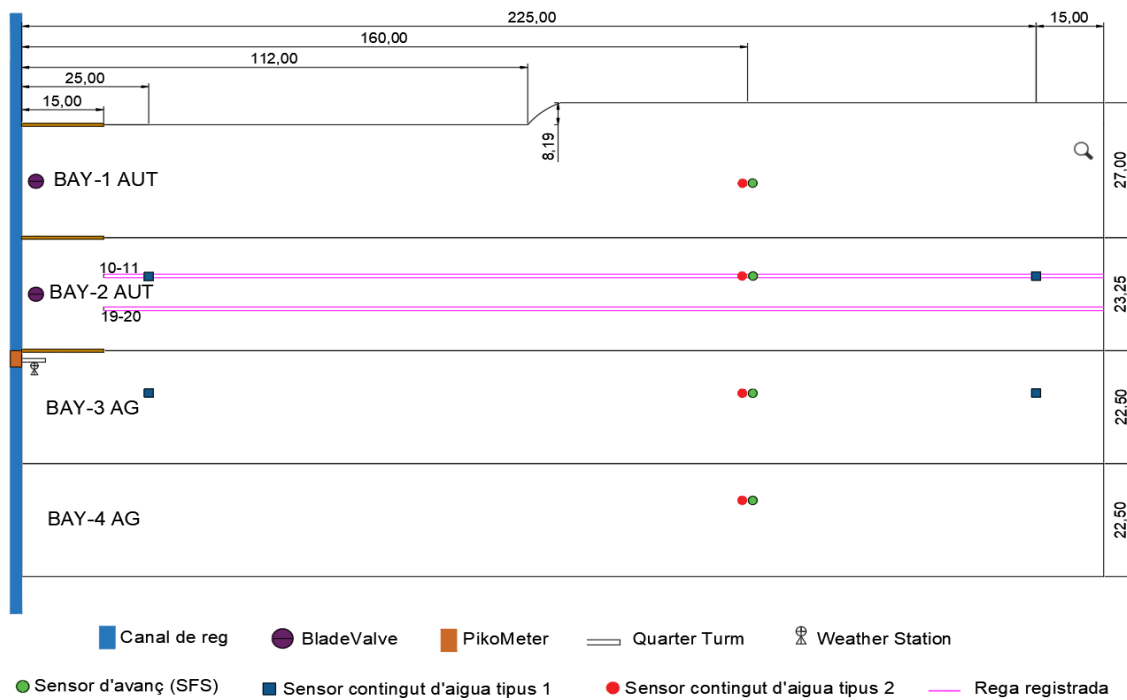
El contingut d'aigua en el sòl es va determinar mitjançant els sensors Drill and Drop TriSCAN (Sentek, Stepney, Austràlia) amb profunditat de mesura fins a 60 cm i 90 cm. Els sensors de la sonda registraven el contingut volumètric d'aigua al sòl cada 30 minuts. Les lectures d'aquests sensors no eren puntuals a una profunditat determinada, sinó que donaven un valor a un rang que anava de 10 en 10 centímetres.

La instal·lació a camp consistia en introduir la sonda gràcies a una barrina, que permetia fer el forat. Sentek recomanava mullar la zona del sòl que estava en contacte amb la sonda per evitar que hi hagués zones d'aire al voltant del sensor i per tant llegís falses lectures.

Els sensors de 60 cm estaven connectats a una bateria que utilitzava una placa fotovoltaica com a font d'energia. Les dades s'enviaven via SMS (senyal telefònica) al núvol de dades, on després es podien

visualitzar i baixar les dades a la web d'IrriMax Live (Sentek, Stepney, Austràlia). D'altra banda, els sensors de 90 cm utilitzaven una bateria amb pila de LiPo. Les dades es transferien gràcies a l'aparell FerIT (RubiconWater, Melbourne, Austràlia), via ràdio, a l'estació de control de la parcel·la, on després s'enviaven al núvol i es podien visualitzar i baixar des de la web FarmConnect.

Quan el cultiu va assolir l'alçada de 2 metres, es va alçar el dispositiu fins als 2 metres per evitar que el FerIT quedés cobert completament i no enviés dades cap a l'estació a causa de les interferències. A les Figures 18a i 18b es pot observar l'aparell FerIT.



**FIGURA 16:** Distribució de tots els elements utilitzats. 10-11 i 19-20: Numero de regues on es registra l'avanç

Els sensors de contingut d'aigua al sòl es van distribuir de la següent forma, seguint la distribució indicada en la Figura 16:

- Sonda tipus 1: Es disposava de 4 unitats dels sensors de 60 cm. Es va escollir la BAY-2 com a representació de la gestió del reg en la parcel·la AUT i la BAY-3 com a representació de la gestió del reg en la parcel·la AG. Es col·locaven 2 sensors en cada parcel·la, un a l'inici (25 m) i l'altre al final del camp (225 m). Es va adoptar aquesta distribució, ja que al llarg de la parcel·la les condicions fisicoquímiques del sòl variaven, com es pot observar en la Taula 3. Aquest sensor es pot visualitzar a la Figura 17, juntament amb la seva placa fotovoltaica.
- Sonda tipus 2: Els sensors de 90 cm es van col·locar a 2/3 parts de la longitud total del camp (a 160 m des de l'inici de la parcel·la). Es va col·locar una sonda a cada subparcel·la de la zona AUT (BAY-1, BAY-2) i de la zona AG (BAY-3 i BAY-4). L'aparell és el que es visualitza a la Figura 18a.

### 3.9.2.7. FRONT D'AVANÇAMENT

Les sondes d'avanç SmartFrontSensor (RubiconWater, Melbourne, Austràlia - SFS, forma abreujada) eren uns aparells que van permetre la gestió del reg. Estaven dissenyats per mesurar: a) el temps que

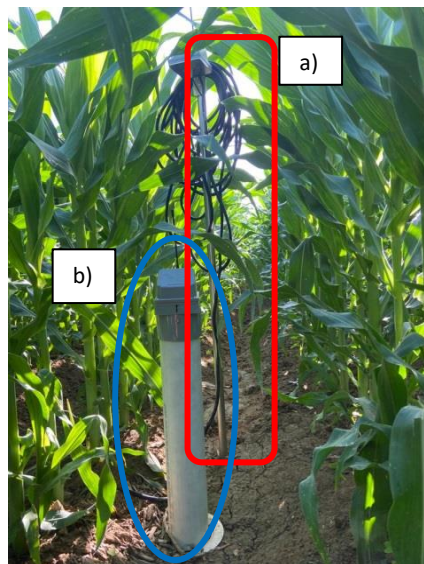


trigava l'aigua a arribar al sensor (temps d'avanç); b) la làmina d'aigua que hi arribava; c) el temps que trigava per infiltrar-se (temps de recés, Time run-off). Consistien en una cassoleta en forma de pou, on l'aigua anava entrant per les ranures que hi havia al tub de PVC fins que s'omplia i arribava a la cota zero. A partir de la cota zero era quan començava a mesurar la làmina d'aigua que hi havia. La mesura es feia gràcies a un sensor d'ultrasons, amb precisió de  $\pm 0.001$  m. La periodicitat de les lectures va ser molt variada: a) quan no hi havia làmina d'aigua llegia cada 5 minuts; b) el primer cop que detectava l'aigua llegia cada 20 segons fins que arribava al màxim; c) un cop assolit el màxim llegia cada 5 minuts fins que la làmina s'havia infiltrat completament; d) només feia lectures quan hi havia un programa de reg activat. L'enviament de dades seguia el mateix sistema que les sondes de contingut d'aigua en el sòl (sistema FerIT). A la Figura 18b es pot observar com és el SFS, amb el FerIT damunt.

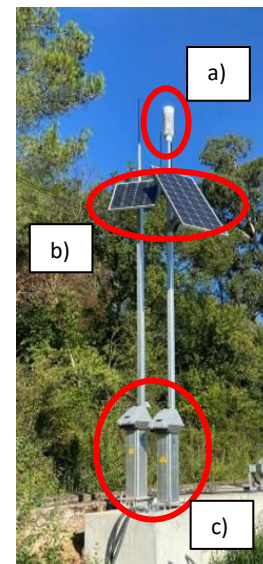
Aquests sensors es van col·locar en la mateixa disposició i localització que els sensors de contingut d'aigua en el sòl de 90 cm, és a dir, un a cada subparcel·la de la zona AUT (BAY-1, BAY-2) i de la zona AG (BAY-3 i BAY-4) i a 2/3 parts de la parcel·la (160 metres), com es mostra a la Figura 16.



**FIGURA 17:** Sensor Sentek Triscan de 60 cm.  
FONT: Pròpia.



**FIGURA 18:** a) sensor Sentek Triscan de 90 cm i b) SFS. FONT: Pròpia.



**FIGURA 19:** Estació meteorològica.  
a) sensor que capta les dades; b) placa fotovoltaica; c) pedestal  
FONT: Pròpia.

La finalitat principal dels sensors SFS va ser, en un sistema totalment automatitzat, detectar el moment d'arribada de l'aigua i ajustar el Tco inicialment previst en el sistema SCADA per optimitzar els valors de les eficiències en cada reg. Aquest procés encara està en fase de desenvolupament, de manera que no es va poder implementar en aquest treball.

### 3.9.3. DETERMINACIÓ DE LA DOSI DE REG REQUERIDA

A l'hora de fer el modelatge del reg, una de les primeres condicions que es requeria introduir era el paràmetre de dosi requerida, que era la quantitat d'aigua necessària pel cultiu, també conegut com a dosi de reg neta. Per determinar la dosi d'aigua que realment es necessitava aplicar, és a dir, aigua de reg bruta, s'havia d'utilitzar l'eficiència de reg. En el cas d'aquest treball es va utilitzar una eficiència del 80%, ja que segons Smith *et al.* (2005) i Arbat *et al.* (2011) era un valor raonable.

$$DR\ bruta = \frac{DR\ neta}{Ef} \quad \text{equació 1}$$

La dosi de reg neta es va determinar a partir de 2 procediments:

1. Procediment 1, basat en el contingut d'aigua al sòl:

Les dades utilitzades s'han obtingut a partir dels valors registrats per les sondes de contingut d'aigua en el sòl ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) a diferents profunditats.

El procediment per obtenir la dosi requerida (DR) es va fer seguint les equacions 2 i 3. Les sondes donaven els valors en franges de profunditat de 10 cm, la dosi requerida total era la suma de totes les parcials, com es mostra en l'equació 2. La DR parcial (equació 3) es basava en la diferència del contingut volumètric a capacitat de camp (condicions que es buscaven després del reg) i el contingut volumètric en el moment abans de regar. Calia multiplicar-ho per la profunditat de la mostra, que en aquest cas, el rang entre mostres va ser de 10 cm.

$$DR = \sum_{i=1}^n DR_i \quad \text{equació 2}$$

$$DR_i = (\theta^{vcc} - \theta^{vact}) \cdot p_i \quad \text{equació 3}$$

On:

- DR: Dosi requerida (mm)
- $DR_i$ : Dosi requerida parcial (mm)
- $\theta^{vcc}$ : Contingut volumètric a capacitat de camp ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )
- $\theta^{vact}$ : Contingut volumètric actual ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )
- $p_i$ : Profunditat de la mostra (mm)

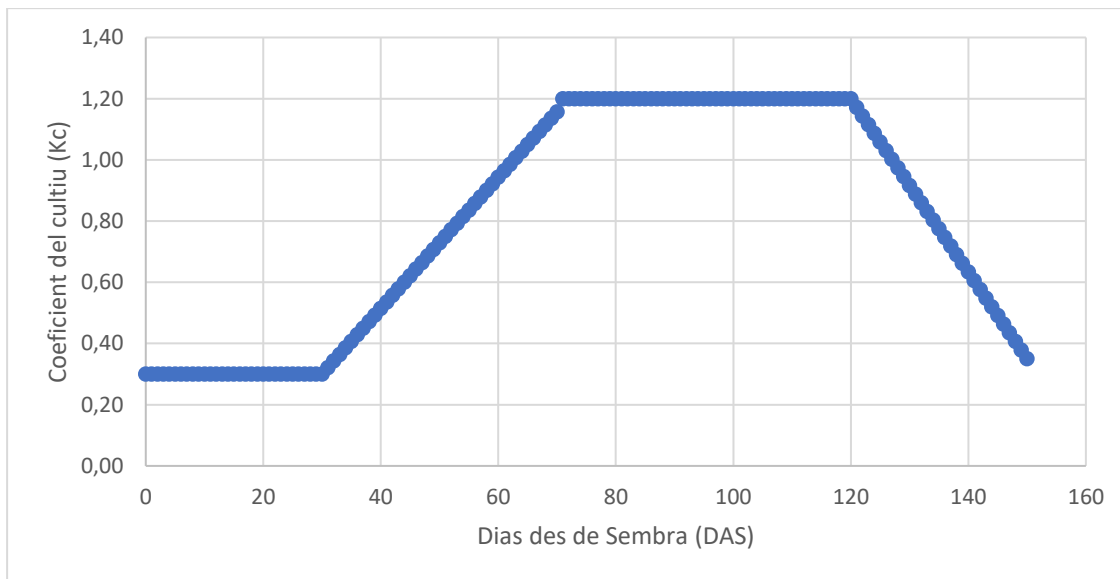
2. Procediment 2, basat en l'evapotranspiració del cultiu (ETc):

Una altra forma per determinar la dosi requerida va ser a partir de l'evapotranspiració de referència (ETo) i el coeficient de cultiu (Kc). La ETc es va calcular amb l'equació:

$$DR = ETc = ETo \cdot Kc \quad \text{equació 4}$$

Les dades d'ETo es van obtenir de l'estació agrometeorològica de Girona que proporcionava valors diaris, ja que l'estació meteorològica instal·lada a la parcel·la no proporcionava correctament les dades.

La Kc es va obtenir d'acord amb el mètode Allen *et al.* (2001) que proporcionava la Kc escalada, és a dir, a mesura que el cultiu anava evolucionant, el valor de la Kc variava. Com s'observa a la Figura 20, hi ha 4 etapes molt marcades: a) *Kc inicial*, on pren valor de 0,30; b) *Kc inicial-mitja*, on augmenta el valor dels 0,30 fins als 1,20; c) *Kc mitja*, on pren valor d'1,20; d) *Kc final*, on disminueix el valor dels 1,2 fins als 0,35.



**FIGURA 20:** Evolució del factor corrector del cultiu Kc. FONT: Allen et al., 2001.

El valor de l'ET<sub>o</sub> utilitzat pel càlcul de la dosi requerida era la suma de les ET<sub>o</sub> diàries (parcials) al llarg dels dies entre regs (equació 5), ja que era el valor de la làmina d'aigua que s'havia evapotranspirat del cultiu i, per tant, que s'havia d'aportar. En el cas del reg 1 de la campanya, no es va poder obtenir el valor de la dosi requerida amb aquest mètode, ja que no es podia trobar la suma d'ET<sub>o</sub> a causa que no hi va haver reg anterior.

$$ET_{o_{total}} = \sum_{i=1}^n ET_{o_i} \quad \text{equació 5}$$

Per determinar el valor final de la DR que s'utilitzava en el modelatge, es va optar per escollir el valor més gran dels proporcionats pels procediments 1 i 2, ja que d'aquesta forma es generava el cas més desfavorable. Va ser molt important l'elecció de la DR final, ja que les eficiències que s'obtidrien amb el model WinSRFR depenien de manera molt significativa d'aquest valor.

### 3.10. SIMULACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE

#### 3.10.1. CODI WINSRFR

L'avaluació dels regs realitzats es va dur a terme mitjançant el codi WinSRFR 5.1. (Bautista i Schlegel, 2019). Era un software sofisticat i lliure que permetia simular com era el moviment de l'aigua en un reg per superfície i quantificar la qualitat del reg en base a les eficiències obtingudes. El modelatge es basava en el mètode de balanç de volum descrit per Elliot i Walker (1982) i Bautista i Schlegel (2017).

El codi utilitzava la funció d'infiltració de *Kostiakov-Lewis simple* (equació 6).

$$Z = K * t^a + b * t \quad \text{equació 6}$$

On:

- Z: Quantitat d'aigua infiltrada (mm)
- a, b: Constants empíriques estimades a partir de paràmetres experimentals

- K: Constant d'infiltració (mm/hr)
- t: Durada del temps de reg (hr)

El codi WINSRFR estava classificat en quatre apartats, anomenats "mons", on cadascun tenia unes finalitats diferents:

- **EVENT ANALYSIS:** La finalitat d'aquest "món" era modelar el reg un cop realitzat i recollides totes les dades per obtenir la funció d'infiltració. Per gestionar aquest món, calia introduir les característiques generals de la parcel·la (geometria, longitud, separació entre regues), dades del reg (Q i Tco) i de l'avançament de l'aigua per les regues. A l'inici calia determinar la làmina d'aigua que es volia aplicar en cada reg (DR). Un gran avantatge d'aquest codi era que permetia fer l'estudi a partir de dos mètodes: "Two Point Method" suggerit per Elliot i Walker (1982), que requeria de mostrejar dos punts d'avançament en tot el camp, o bé el que s'ha utilitzat en aquest treball que era el mètode de balanç de volum, proposat per Bautista i Schlegal (2017) i Strelkoff *et al.* (1999) i a partir d'un conjunt més ampli de dades de l'avançament. Per acabar l'anàlisi, calia ajustar la funció d'infiltració de camp amb la funció d'infiltració que prediu (modela) el sistema. El programa retornava els valors numèrics dels paràmetres de la funció de *Kostiakov-Lewis simple* (K, a, b), així com el càlcul de les percolacions profundes i les eficiències d'aplicació i requeriment del reg (Bautista i Schlegal, 2019).
- **SIMULATION:** La finalitat d'aquest "món" era simular unes condicions de regs de les quals es volien obtenir els valors de les eficiències de reg utilitzant la funció d'infiltració obtinguda en el "món" anterior ("Event Analysis"). Un cop es coneixia la funció d'infiltració s'utilitzava aquest "món" per introduir les condicions del reg que es volia modelar, és a dir, el cabal i el temps de tall (Q i Tco). El programa retornava els valors d'eficiència del reg (aplicació, requeriment i pèrdues per percolació profunda), dades sobre avançament, recés i profunditat d'infiltració per als inputs que s'havien introduït (Bautista i Schlegal, 2019).
- **PHYSICAL DESIGN:** Aquest "món" s'utilitzava per obtenir les mides del camp; longitud i separació entre regues per un determinat cabal i acceptant unes eficiències de reg determinades. En aquest cas, la solució donada concordava amb el valor mínim de l'eficiència d'aplicació potencial (P A<sub>Emin</sub>), que era definit com la mínima profunditat d'infiltració, és a dir, les necessitats del cultiu. Permetia examinar com afectaven les dimensions de la parcel·la a les eficiències del P A<sub>Emin</sub>, a la uniformitat de distribució, a la percolació profunda i a l'escorrentia superficial (Bautista i Schlegal, 2019).
- **OPERATIONS ANALYSIS:** Les dades que calien introduir eren les característiques generals (pendent de la parcel·la, longitud i separació entre regues), la infiltració obtinguda, la rugositat hidràulica i els requisits de reg (profunditat d'aplicació objectiu, Dreq o DR). Permetia identificar solucions (combinacions de cabal i el temps de tall) per satisfer els requisits del reg (Dreq) (Bautista i Schlegal, 2019).

Les simulacions es van fer només amb les regues 10-11-19-20 de la BAY-2 de la parcel·la AUT, ja l'avançament de l'aigua es va mesurar en aquestes regues. Per simplificar la nomenclatura els events de reg es simbolitzen amb la lletra "R" seguida del número del reg i els solcs es simbolitzaven amb la lletra Q seguida del número del solc, considerant que el solc 10 era el número 1, solc 11 era el número 2, solc 19 era el número 3 i solc 20 era el número 4.

La codificació de tots els events de reg i solcs es mostra a la Taula 7.

**TAULA 7:** Codificació de les situacions de regs i regues. Cada rega es representa del mateix color. FONT: Pròpia.

Nombre de reg	NOM ABREVIAT	NOM COMPLET
1	R1_Q1	Primer reg _ primera rega (10)
	R1_Q2	Primer reg _ segona rega (11)
	R1_Q3	Primer reg _ tercera rega (19)
	R1_Q4	Primer reg _ quarta rega (20)
2	R2_Q1	Segon reg _ primera rega (10)
	R2_Q2	Segon reg _ segona rega (11)
	R2_Q3	Segon reg _ tercera rega (19)
	R2_Q4	Segon reg _ quarta rega (20)
3	R3_Q1	Tercer reg _ primera rega (10)
	R3_Q2	Tercer reg _ segona rega (11)
	R3_Q3	Tercer reg _ tercera rega (19)
	R3_Q4	Tercer reg _ quarta rega (20)
4	R4_Q1	Quart reg _ primera rega (10)
	R4_Q2	Quart reg _ segona rega (11)
	R4_Q3	Quart reg _ tercera rega (19)
	R4_Q4	Quart reg _ quarta rega (20)
5	R5_Q1	Cinquè reg _ primera rega (10)
	R5_Q2	Cinquè reg _ segona rega (11)
	R5_Q3	Cinquè reg _ tercera rega (19)
	R5_Q4	Cinquè reg _ quarta rega (20)
6	R6_Q1	Sisè reg _ primera rega (10)
	R6_Q2	Sisè reg _ segona rega (11)
	R6_Q3	Sisè reg _ tercera rega (19)
	R6_Q4	Sisè reg _ quarta rega (20)

### 3.10.2. DETERMINACIÓ DE LA FUNCIO D'INFILTRACIÓ

Per fer la determinació de la funció d'infiltració es va utilitzar el món "Event Analysis", on calia introduir les dades característiques de la parcel·la, com: geometria de la parcel·la, geometria del solc, pendent, dades d'avanç, consignes de cabal i temps de tall. Per finalitzar, el programa retornava els valors de les variables K, a, b obtingudes gràcies al mètode "Volume balance".

### 3.10.3. DETERMINACIÓ DELS ÍNDEXS D'EFICIÈNCIA DE REG OBTINGUTS EN ELS ASSAJOS A CAMP

Un dels principals objectius del treball era avaluar com havia estat la gestió del reg en la parcel·la AUT. Així doncs, entrant les dades característiques de la parcel·la i del reg en qüestió, es determinava la funció d'infiltració, per obtenir posteriorment els valors de les eficiències de cada reg. El món "Event

Analysis” s'utilitzava per obtenir la funció d'infiltració en qüestió i el món “Simulation” per avaluar com havien estat les eficiències de reg.

Pel que fa a la valoració de la qualitat del reg s'utilitzen els índexs que es defineixen en el treball de Rogers *et al.* (1997), els quals permeten la seva qualificació i quantificació, que són:

- L'eficiència d'aplicació (AE) és aquella que mostra la relació entre l'aigua necessària per a la zona radicular i l'aigua total aplicada (equació 7); interessa que el volum total s'ajusti el màxim al volum de la zona radicular (Figura 21). L'eficiència d'aplicació és l'indicador d'eficiència més important en la gestió del reg (GEROCA, s.d.).

$$AE = \frac{\text{Volum aplicat} - \text{Volum percolat}}{\text{Volum aplicat}} \times 100 \quad \text{equació 7}$$

- Relacionat amb l'eficiència d'aplicació hi ha dos indicadors més: a) la pèrdua per percolació per sota de la zona radicular (equació 8), conegut també com a percolació profunda (DP). Aquest indicador quantifica l'aigua que marxa de la zona radicular i, per tant, no és útil pel cultiu; b) la pèrdua per escorrentiu (WP), aquest indicador quantifica l'aigua que marxa del sistema, és a dir, que sobre passa l'alçada de les regues i per tant no és útil pel cultiu. En aquest treball, al tractar-se d'un sistema tancat es va considerar nul·la.

$$DP = \frac{\text{Volum percolat}}{\text{Volum aplicat}} \times 100 \quad \text{equació 8}$$

- L'eficiència de requeriment (RE) expressa la relació entre el volum d'aigua aplicat a la zona radicular i el volum d'aigua que necessita la planta (equació 9), habitualment calculada en funció de l'evapotranspiració del conreu. Dit d'una altra manera, representa el percentatge de l'àrea que s'ha regat correctament i satisfent les necessitats del cultiu.

$$RE = \frac{\text{Volum aplicat} - \text{Volum percolat}}{\text{Volum requerit}} \times 100 \quad \text{equació 9}$$

La Figura 21 permet visualitzar i entendre que representen els diferents índex de qualitat del reg.

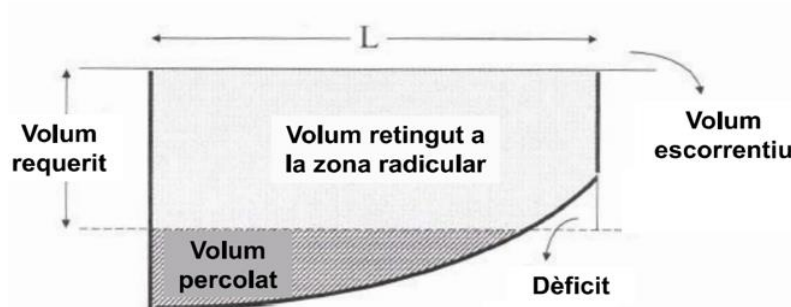


FIGURA 21: Representació del flux d'aigua a l'hora de rega. FONT: Pròpia.

Es calculaven les eficiències d'aplicació, eficiències de requeriment i percolacions profundes de tots els regs (1-2-3-4-5-6) en cadascuna de les parcel·les (BAY 1-2-3-4).

Cal tenir en compte que les funcions d'infiltració utilitzades en la parcel·la AUT es van obtenir únicament de la BAY-2, ja que era on es van mesurar de dades d'avançament. Així doncs, en el cas de la zona AUT BAY-1 es va utilitzar la funció d'infiltració del reg corresponent a la BAY-2. Les simulacions del reg AG es van realitzar utilitzant les dades del reg de la BAY-2 que van presentar les condicions de Q i Tco més similars a la gestió del reg AG, que eren les de Q baix i Tco elevat.

Les funcions d'infiltració es van obtenir a partir de les dades de Q i Tco de la Taula 6. Es van obtenir a partir dels valors de consigna determinats en la Pikometer, ja que d'aquesta forma es pensava que descrivia millor com havia sigut l'eficiència general del reg en la BAY i no en una sola rega.

### 3.10.4. DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE REG ÒPTIMS. CABAL I TEMPS DE TALL

D'altra banda, el treball pretenia determinar els paràmetres de Q i Tco per obtenir les màximes eficiències, com un dels objectius. D'aquesta forma es podria informar a l'agricultor de les variables de reg adequades per ell i sempre assolir les eficiències de reg òptimes.

En aquest cas, la funció d'infiltració es va ajustar a partir de l'estandardització de la corba d'avançament. Inicialment va consistir en avaluar com de diferents van ser els avançaments mesurats al llarg de la campanya de reg. Després es va determinar que la corba d'avançament representativa de tota la resta era aquella que es trobava en el centre del núvol de dades, com descriu Koech *et al.* (2014b). Un cop trobada la corba, es van assignar les condicions d'avançament (QX\_RX) com a estàndard. A partir d'aquí, es va generar una funció d'infiltració que rep el nom de funció STD\_1, però que calia validar.

Per fer la validació es va utilitzar el món "Simulation". En aquest món es van modelar tots els avançaments mesurats a la BAY-2 de la zona AUT, de manera que es van obtenir els avançaments simulats pel model de cadascun d'ells. Gràcies a les dades de l'avançament real, mesurat a camp, es va poder comparar amb els valors de l'avançament modelat amb la funció STD\_1. D'aquesta forma es va poder comparar quantitativament i qualitativament com eren les diferències. És a dir, si el reg modelat avançava més ràpid o era més lent que l'observat a camp.

En en algunes ocasions el codi no va ser capaç de convergir i trobar una solució per determinades condicions. En aquests casos, per solucionar el problema i obtenir les dades d'avançament, es va modelar amb la hipòtesis que el final del solc era obert, de manera que una vegada l'aigua arribava al final, generava escorrentiu. D'aquesta manera, en aquells casos on la relació entre les dades estimades en el sistema obert i tancat va ser propera a 1:1, es va considerar que la variació de resultats era negligible i, per tant, els resultats obtinguts sota la hipòtesis de solc obert eren vàlids.

L'índex estadístic que es va utilitzar en les comparacions entre les dades experimentals i les simulades va ser l'estadístic RMSE (Root Mean Square Error). Aquesta decisió estava fonamentada en els resultats obtinguts per Soto i Gonzalez (2019). Aquests autors, després de comparar els índexs  $r^2$  (r quadràtica), MBE (Mean Bias Error), MAE (Mean Absolut Error), MSE (Mean Square Error) i RMSE (Root Mean Square Error) conclouen que per avaluacions en l'agronomia, l'estadístic RMSE és ideal per quantificar la diferència entre dades observades versus estimades, en aquest cas les dades de l'avançament observat versus els resultats de l'avançament modelat. L'estadístic RMSE es va calcular amb l'equació:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x \text{ modelada} - x \text{ camp})^2} \quad \text{equació 10}$$

On:

- N: nombre total de mostres
- n: mostra individual

- x modelada: dada d'avançament obtinguda a partir del modelat amb WinSRFR (minuts)
- x camp: dada d'avançament obtinguda a camp (observada) (minuts)

Quan més proper a zero sigui el valor de l'índex significava que millor era l'ajustatge entre les dades experimentals i els resultats modelats. Es va definir com a llindar màxim de RMSE un valor de 20 minuts, ja que en base a l'experiència adquirida es pensava que un reg amb una diferència de  $\pm 20$  min era força acceptable. D'altra banda, cal assenyalar que el manual d'usuaris del WinSRFR 5.1. dona l'estadístic RMSE com a vàlid per fer la comparació entre les dades de camp versus les modelades (Bautista i Schlegal, 2019).

Les validacions es van efectuar comparant el valor del RMSE obtingut per a cada solc i reg, i comprovant que sigues menor a 20 minuts. En els casos que superava el límit de RMSE de 20 min, significava que la funció STD\_1 no simulava correctament el que succeïa a camp.

Una última comprovació que es va efectuar per validar que la funció estàndard fos correcte va ser comparar si la làmina aplicada en les regues era semblant al de la dosi requerida (DR). El valor de la làmina aplicada en cada reg es va obtenir obtingut gràcies al WinSRFR, que permetia calcular-ho.

Arribat al pas final, calia executar el model en diferents escenaris de Q i Tco, per arribar a les pautes de reg més recomanables. Com a primera consigna, es van establir uns criteris de cabal entre 0,5 i 1,8 l/s, ja que d'acord amb les experiències de camp efectuades en cas de valors superiors, el solc desbordava. Per tant, en base a anar variant el Q i el Tco s'executava el codi i es van obtenint les eficiències de reg corresponents a cada cas, per finalment seleccionar els Tco per cada consigna de cabal que resultaven en les eficiències òptimes.

**TAULA 8:** Dades de Q i Tco utilitzades durant el procés d'estandardització. FONT: Pròpia.

n Reg (R)	n Solc (Q)	Cabal (l/s)		Tco (hr)
2	1	1,33		4,22
	2	1,02		
	3	1,60		
	4	1,39		
3	1	1,18		6,58
	2	0,79		
	3	1,63		
	4	1,07		
4	1	1,11	1,65	0,00 2,71 5,11
	2	0,67	1,18	
	3	1,06	1,83	
	4	0,95	1,39	
5	1	1,22	1,73	0,00 2,71 4,23
	2	0,74	1,25	
	3	1,12	1,70	
	4	1,02	1,56	
6	1	1,33	1,85	0,00 2,71 4,78
	2	0,61	1,22	
	3	1,11	1,78	
	4	0,92	1,40	



Es va decidir que el criteri de reg considerés un cabal constant, ja que era més fàcil el control d'una sola variable, i a part, segons el treball de Koech *et al.* (2014a) s'afirmava que és més simple determinar el cabal òptim i maximitzar les eficiències amb cabal constant.

Per obtenir la funció model STD\_1 es van utilitzar les dades de Q i Tco mesurats a camp per a cada número de reg i per a cada solc mostrejada (Taula 8).

### 3.11. AVALUACIÓ ECONÒMICA

Amb l'objectiu d'avaluar la viabilitat pràctica del reg per superfície automatitzat es va dur a terme una anàlisi econòmica comparativa entre les parcel·les regades amb aquest sistema (AUT) i les parcel·les regades manualment pels agricultors (AG), basant-se en el càlcul de les costos, ingressos i beneficis generats.

Els diferents apartats avaluats van ser els següents:

a) Costos referents al material de reg tecnològic o tradicional utilitzat i actuacions/obres realitzades per la seva instal·lació. Incloua els següents elements: Pikometer, SFS, Quarterturn, estació meteorològica, sensor del contingut d'aigua al sòl, Bladevalve, vàlvula manual agricultor, manega de reg agricultor.

En el cas de tot l'equipament utilitzat en la parcel·la AUT (Pikometer, Bladevalve, Quarterturn, SFS, Smart Meter Node) i les actuacions realitzades, eren preus proporcionats per l'empresa RubiconWater (tot i que no eren preus de tarifa, perquè aquests productes no es venien en el mercat europeu, sinó preus estimats, basats en els del mercat australià i estatunidenc). Les dades proporcionades eren preus sense IVA (J. Pujades, *comunicació personal*, 22 de novembre de 2022).

Per reflectir les amortitzacions de la maquinària amb una vida útil superior a un any en l'estudi de costos, es van haver d'estimar les vides útils gràcies a les dades proporcionades per RubiconWater. A més, també es van incloure els costos de manteniment anuals aproximats (també proporcionats per l'empresa). El valor residual dels elements plurianuals es va considerar nul; d'aquesta forma, les condicions de partida eren més desfavorables. En aquest estudi, el mètode d'amortització de la maquinària (Pikometer, Bladevalve, Quarterturn, SFS, Smart Meter Node, sensor contingut d'aigua, estació meteorològica) era lineal, és a dir, cada any s'amortitzava la mateixa quantitat.

Cal fer un aclariment i comentar que a l'hora de fer l'avaluació econòmica, només es requeria d'un sensor per BAY. Només es van comptabilitzar els de 90 cm, ja que aquests eren capaços d'obtenir dades a major profunditat. Es va suposar que la vida útil de les instal·lacions era de 30 anys (excepte els tubs repartidors de regues de PVC que era de 10 anys) i les dels sensors de contingut d'aigua i d'avanç eren de 7 anys, sempre i quan la tasca de manteniment seguis les pautes que recomanava el fabricant RubiconWater (J. Pujades, *comunicació personal*, 22 de novembre de 2022).

Tampoc no es va tenir en compte el material de sondes i la vàlvula Quarterturn en les parcel·les AG (BAY-3 i BAY-4), ja que es van utilitzar a escala experimental i en una parcel·la comercial estàndard no hi serien.

Les pautes de manteniment consistien en: a) neteja dels sensors, revisió de l'oli de la caixa de canvis, canvis de bateries al cap de sis anys; b) actualitzacions de firmware i software; c) actualitzacions de l'electrònica dels aparells dels components obsolets; d) recanvis de peces que es desgasten (gomes,

motor, Gearbox, cable d'acer). El preu aproximat segons el fabricant RubiconWater era del 3-5% del cost total de l'inventari utilitzat (J. Pujades, *comunicació personal*, 22 de novembre de 2022).

La vàlvula de reg utilitzada en la parcel·la de l'agricultor presentava una vida útil de 15 anys, mentre que la mànega de reg s'havia de substituir anualment (F. Brunsó, *comunicació personal*, 22 de novembre de 2022).

b) Costos referents a les actuacions realitzades a camp. Aquestes actuacions incloïen:

- I) Preparació del sòl: subsolat, pasd de grades i fresat anualment; i anivellació el camp cada 7 anys
- II) Aplicació d'adobat de fons: anualment
- III) Producte de llavors i sembradora: anualment
- IV) Calçat de les regues i cobertura: anualment
- V) Aplicació d'herbicides: anualment es realitzaven varies actuacions, en funció de la severitat de la campanya
- VI) Mà d'obra de reg emparada
- VII) Recol·lecció i transport del gra
- VIII) Arrendament de la parcel·la
- IX) Taxa comunitat de regants

Tots els preus d'actuacions on intervenien producte i aplicador o tractorista estaven inclosos en el propi cost. Les dades econòmiques de les actuacions executades a camp i dels productes (llavors, adobs i fitosanitaris) utilitzades es van obtenir a partir d'informació aportada per l'agricultor (F. Brunsó, *comunicació personal*, 22 de novembre de 2022).

No es va comptabilitzar la mà d'obra emprada per recollir les dades de reg i supervisar que tot funcionava correctament el dia del reg en la parcel·la AUT. Aquestes hores no serien necessàries en el cas que fos una parcel·la comercial automatitzada, perquè el sistema ja estaria ben desenvolupat. Així doncs per calcular la mà d'obra invertida durant el reg es van tenir en compte les intervencions que es realitzaven: a) instal·lació de les sondes de contingut d'aigua i d'avanç; b) temps invertit per efectuar els regs i supervisar que es realitzava correctament a camp. Un cop es va obtenir el temps requerit per realitzar la gestió del reg, calia multiplicar-ho pel preu de l'operari.

c) Els ingressos generats es basaven únicament en la venda del gra de blat de moro al 14% d'humitat a la llotja comercial, on el preu estava fixat pel mercat de la collita del 2022.

d) Els beneficis finals obtinguts van ser la diferència entre ingressos totals respecte despeses totals.

Cal remarcar que els resultats obtinguts corresponien al cas específic de l'estudi i no serien directament extrapolables a conclusions sobre l'aplicabilitat del sistema a nivell de parcel·la comercial.

Els elements de l'estació climàtica, comporta del canal, obres associades, entre d'altres, que s'han fet servir a l'assaig estaven en una parcel·la petita, quan comercialment podrien cobrir una superfície molt més gran. En aquestes condicions, llavors els costos per ha de mà d'obra utilitzada per la gestió del reg també es veuria reduïda, ja que cobriria més superfície i el temps dedicat per unitat de superfície seria menor. En aquest sentit, es va generar un cas hipotètic en què els elements i la mà d'obra emprada per la gestió del reg s'aplicaven a una parcel·la més gran, de 5 ha aproximadament.

## 4. RESULTATS

### 4.1. DESENVOLUPAMENT DEL CULTIU

#### 4.1.1. ESTADIS FENOLOÒGICS

En la Taula 9 s'indica l'evolució del cultiu d'acord amb els paràmetres d'estadi fenològic segons (Weber i Bleiholder, 1990; Lancashire *et al.*, 1991), alçada de la planta i profunditat radicular.

Durant els primers 44 dies només es va comptar el nombre de fulles que hi havia en la planta. Als 58 dies va començar a despendre el pol·len de la flor masculina i els estigmes de la flor femenina ja eren visibles. En aquest punt es va fer la valoració del gra (Figura 13b) i es va observar que presentava un cert nivell lletós. Als últims dies (93 i 114) es va arribar al nivell de maduresa del gra; eren grans, durs i brillants, amb un 65% de matèria seca.

TAULA 9: Resum de l'evolució del cultiu. FONT: Pròpia.

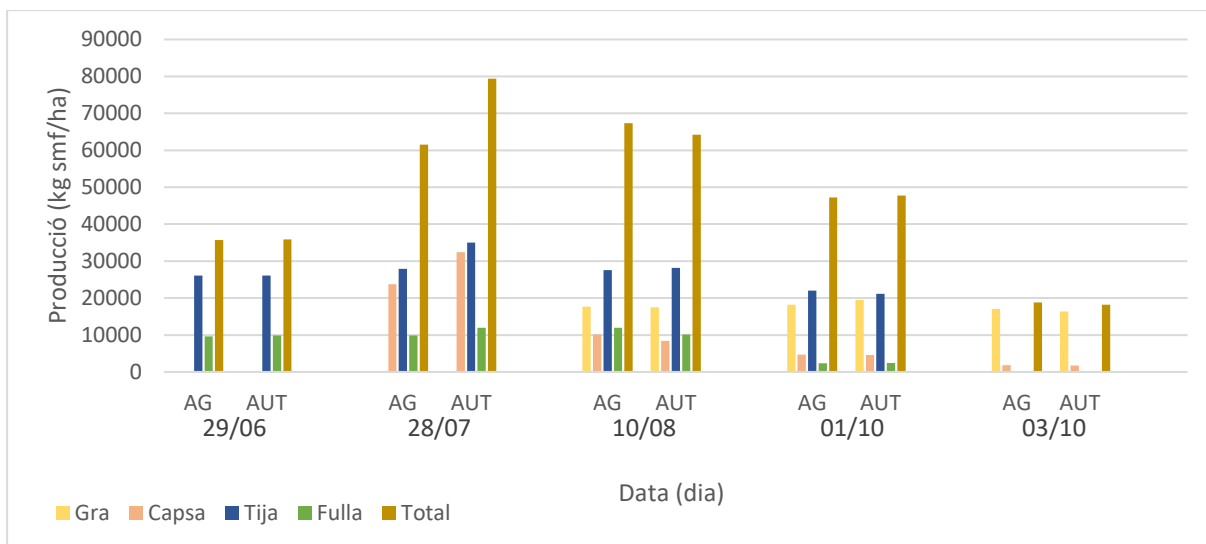
Dies després de sembra (DAS)	Estadi fenològic (BBCH)		Alçada de planta (cm)		Profunditat radicular (cm)	
	Maneig AUT	Maneig AG	Maneig AUT	Maneig AG	Maneig AUT	Maneig AG
10	3 fulles BBCH 13	3 fulles BBCH 13	-	-	-	-
16	4 fulles BBCH 14	4 fulles BBCH 14	8	8	-	-
23	6 fulles BBCH 16	6 fulles BBCH 16	25	25	33,5	33,5
44	9 fulles BBCH 19	9 fulles BBCH 19	107	107	-	-
58	Flor BBCH 63-65	Flor BBCH 63-65	234	200	28	30
79	Formació fruit BBCH 75	Formació fruit BBCH 75	250	242	48	38
93	Maduració BBCH 85	Maduració BBCH 85	241	228	53	50
114	Maduresa BBCH 89	Maduresa BBCH 89	240	237	45	45

Cal destacar que del dia 44 al 58 va haver un augment de l'alçada de la planta considerable en els dos sistemes de reg, però al final del seguiment (dia 114) no es van apreciar diferències en aquest paràmetre entre els dos sistemes de reg.

Pel que fa a la profunditat radicular, tampoc es van apreciar diferències entre els dos maneigs utilitzats.

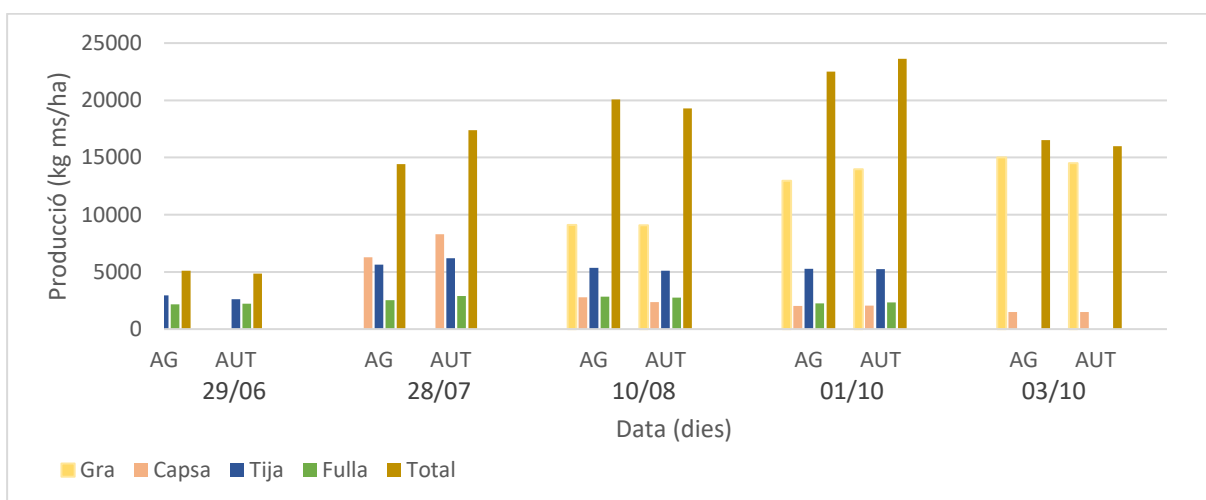
#### 4.1.2. DETERMINACIÓ DE LA BIOMASSA

En les Figures 22 i 23 es mostra l'evolució en el temps de la matèria fresca i matèria seca segons els sistemes de reg AUT i AG utilitzats.



**FIGURA 22:** Evolució de la biomassa en kg de matèria fresca/ha classificat en funció de la zona AUT o AG. FONT: Pròpia.

El 28 de juliol es va assolir la màxima producció de kg sobre matèria fresca per hectàrea (Figura 22; observar la columna de la variable “Total”) i a partir d’aquesta data els valors van començar a reduir-se fins el dia de recol·lecció.



**FIGURA 23:** Evolució de la biomassa en kg de matèria seca /ha classificat en funció de la zona AUT o AG. FONT: Pròpia.

Es pot apreciar com el pes en kg sobre matèria seca per hectàrea va augmentar al llarg de la temporada (Figura 23; observar la columna de la variable “Gra”), fins arribar al valor màxim de l’últim dia de mesura i dia de recol·lecció, el 3 de d’octubre.

La producció final, estimada a partir de la determinació dels components del rendiment, va ser de 12.957 kg ms/ha per la zona AG i de 13.963 kg ms/ha per la zona AUT, amb una diferència de producció de gairebé 1.000 kg ms/ha a favor del sistema de reg AUT respecte l’AG.

## 4.2. VARIABILITAT DE CABALS EN CADA REG DE LA PARCEL·LA AUT

La Taula 10 va permetre comparar com va ser la homogeneïtat de cabals entre regues al llarg dels diferents regs en la parcel·la AUT (BAY-2). El reg 3 va tenir el rang de cabals més grans, mentre que en el reg 5 els cabals van ser més homogenis.

**TAULA 10:** Cabals (L/s) en els events de reg en la parcel·la AUT (BAY-2); “-” indica que no hi ha dades mostrejades.

FONT: Pròpia.

Nº Reg	Cabal de consigna	Cabal mesurat			
		Mitjana	Desviació estàndard	Coefficient de variació (%)	Rang de cabals (màx-mín)
1	2,50	-	-	-	-
2	1,42	1,17	0,28	24	0,59 – 1,60
3	0,90	0,92	0,32	35	0,19 – 1,85
4	0,68	0,80	0,25	31	0,26 – 1,25
	1,22	1,33	0,32	24	0,61 – 1,92
5	0,68	0,83	0,26	31	0,27 – 1,25
	1,22	1,32	0,32	24	0,64 – 1,74
6	0,68	0,83	0,26	31	0,25 – 1,33
	1,22	1,34	0,33	25	0,67 – 1,85

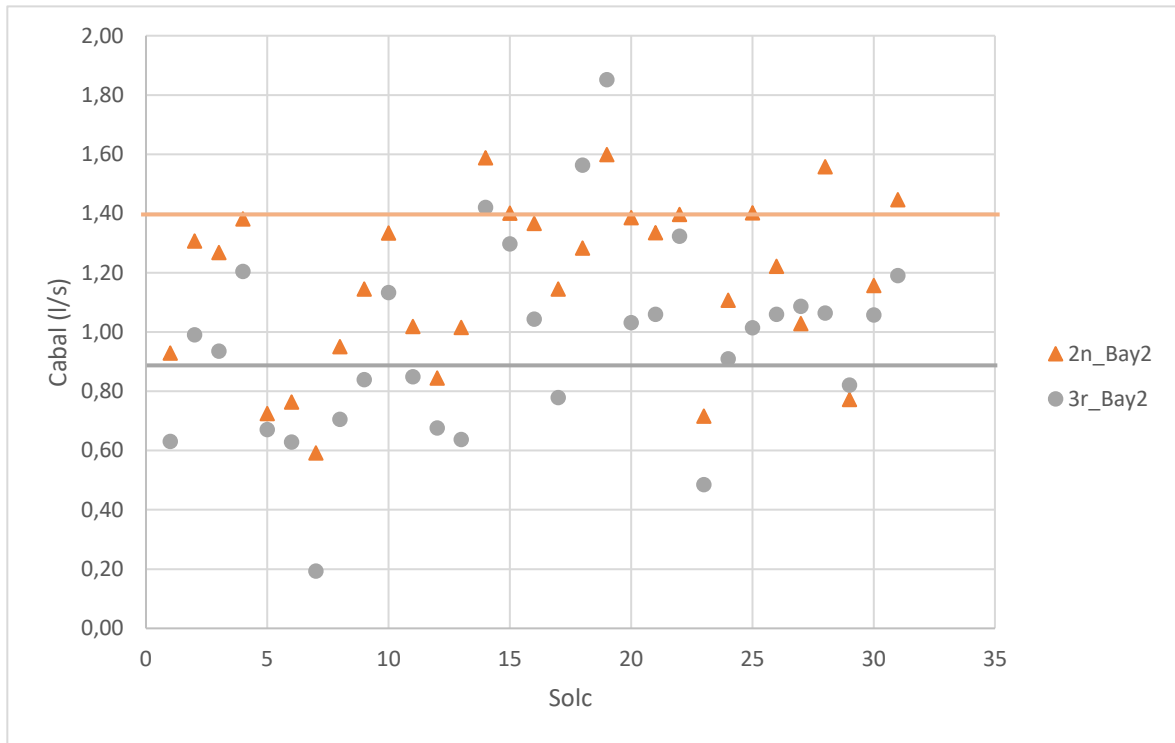
En la Figura 24 es mostra la variació de les dades, on el rang de cabals més ampli va correspondre al reg 3. Per poder ser comparat la variació de cabal entre regues s'utilitza el reg 2, ja que va ser l'altre cas on el reg va ser amb cabal constant.

La distribució de l'aigua entre regues va presentar discrepàncies que disten de la perfecció (Figura 24). Cal destacar que el reg 3 va tenir més variabilitat en els cabals en comparació amb el reg 2.

Va destacar la variabilitat notable en el reg 3 (cabal constant més baix) i en la rega número 7, on el cabal de consigna va ser d'0,9 l/s, però el cabal mesurat va ser de 0,19 l/s, gairebé un 80% menys. En el reg 2 (cabal constant més alt) i també en la mateixa rega número 7, el cabal de consigna va ser de 1,4 l/s i es va regar amb un cabal mesurat de 0,59 l/s, una disminució de gairebé del 60% de la consigna.

D'altra banda, el cas més destacable on es va regar per sobre de la consigna en el reg 3 (cabal constant més baix) va ser la rega número 19, on el cabal de consigna va ser d'0,9 l/s i va estar regant amb un cabal mesurat de 1,85 l/s, el que va representar un augment del 105%. En el reg 2 (cabal constant més alt) i també en la mateixa rega número 19, amb un cabal de consigna de 1,4 l/s es va regar amb un cabal mostrejat de 1,60 l/s, el que va representar un increment de gairebé del 13% respecte del cabal de la consigna.

Es pot observar en la Figura 24, menyspreant les dades atípiques (solc 7, 19 i 23), com els valors dels cabals mesurats van presentar rangs molt constants i amb petites variacions.



**FIGURA 24:** Cabals sortints de les regues monitoritzades; cabal consigna del 2n reg (línia taronja) i del 3r reg (línia grisa).  
FONT: Pròpia.

### 4.3. TEMPS D'AVANÇAMENT

Els resultats de les mesures experimentals d'avançament en tots els solcs i regs es mostren a la Figura 25. Es pot observar com el reg 1 (color blau fosc) va presentar un progrés molt més ràpid que la resta d'avanços. Prescindint d'aquest reg, en el qual encara no s'havia fet l'actuació per la millora de la distribució de l'aigua, el reg 2 (color vermell) va destacar per tenir l'avanç més accelerat, mentre que el reg 3 (color verd clar) va presentar l'avanç més lent. Respecte als valors del coeficient  $R^2$ , es pot observar com en tots els casos presentava valors molt bons, pròxims o superiors a 0,9, amb excepció del reg 2.

Fent una avaluació general, s'observa com la Figura 25 està fraccionada en dues franjes. La primera franja amb els regs 1 i 2, on l'avanç va ser més ràpid, coincideix quan el cabal va ser constant i elevat. La segona franja amb els regs des del 3 al 6, on l'avanç va ser més lent, coincideix quan va ser constant i baix o variable. Així doncs, en la segona franja s'observa com les regues estan compreses dins del rang de 3h 15' i 4h 30', on la diferència aproximada va ser d'una hora entre l'avanç més ràpid i el més lent.

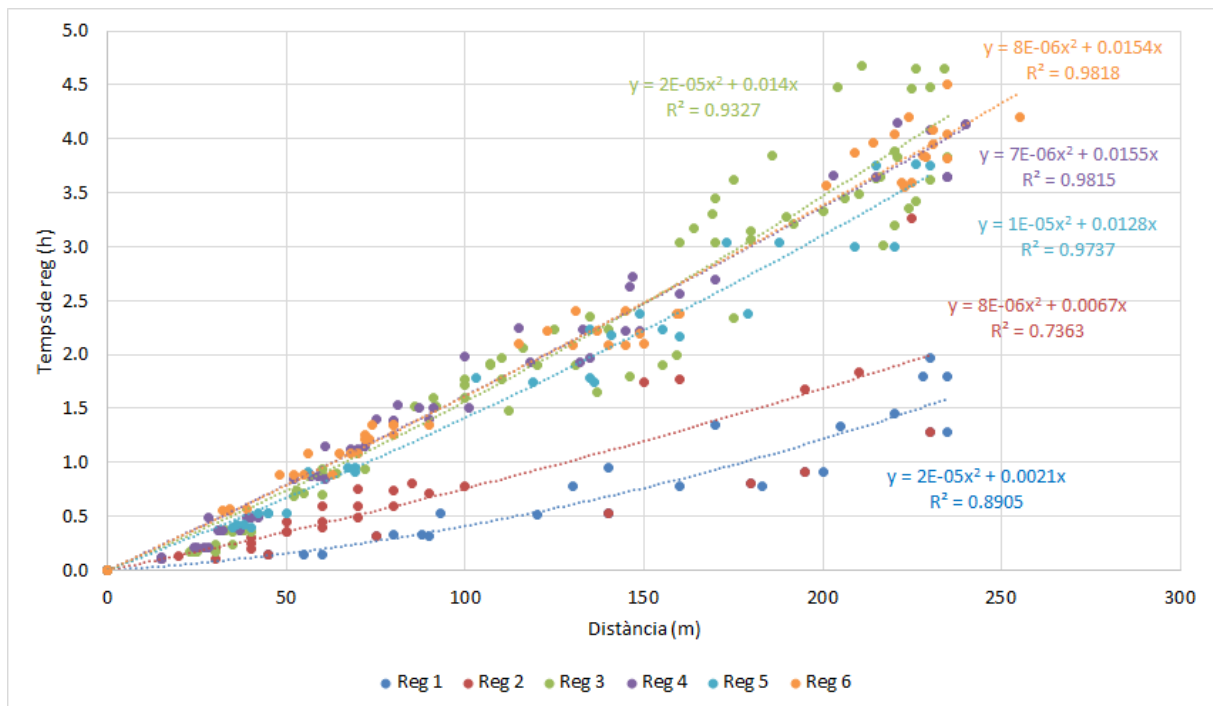


FIGURA 25: Corba d'avançament de cada reg. FONT: Pròpia.

#### 4.4. GEOMETRIA DELS SOLCS

La forma del solc proporcionava informació crucial sobre la capacitat portant d'aigua de reg i va ser un factor essencial pel càlcul de les eficiències de reg. En les Figures 26 i 27 es mostra l'evolució de la forma del solc al final del solc on el reg s'ha gestionat amb el sistema de la zona AUT i AG, respectivament.

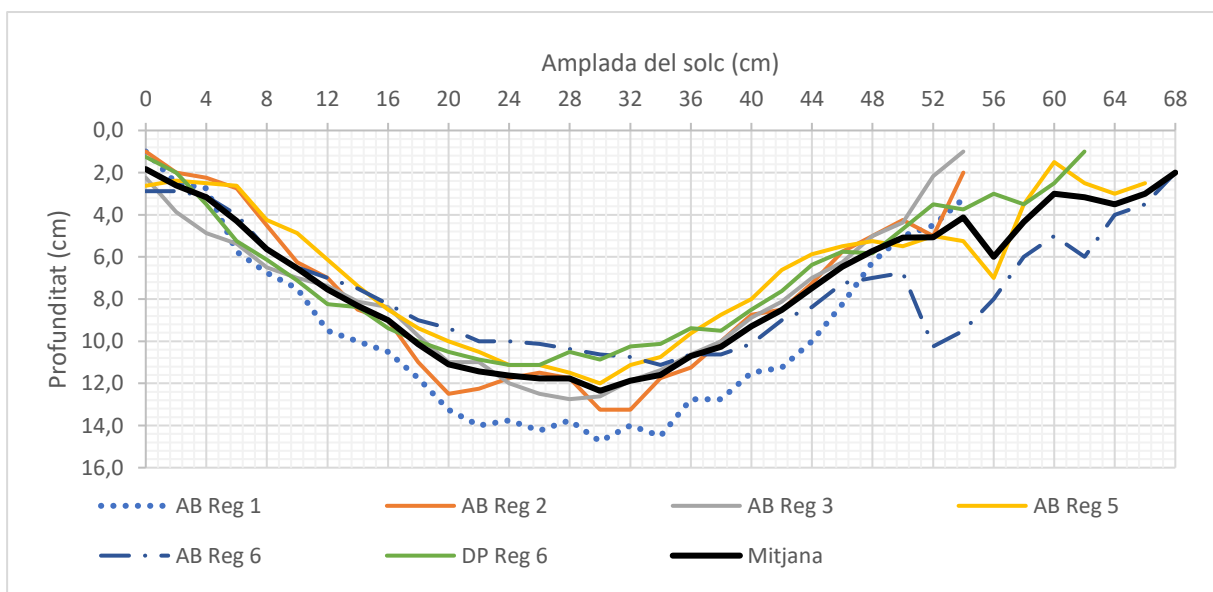
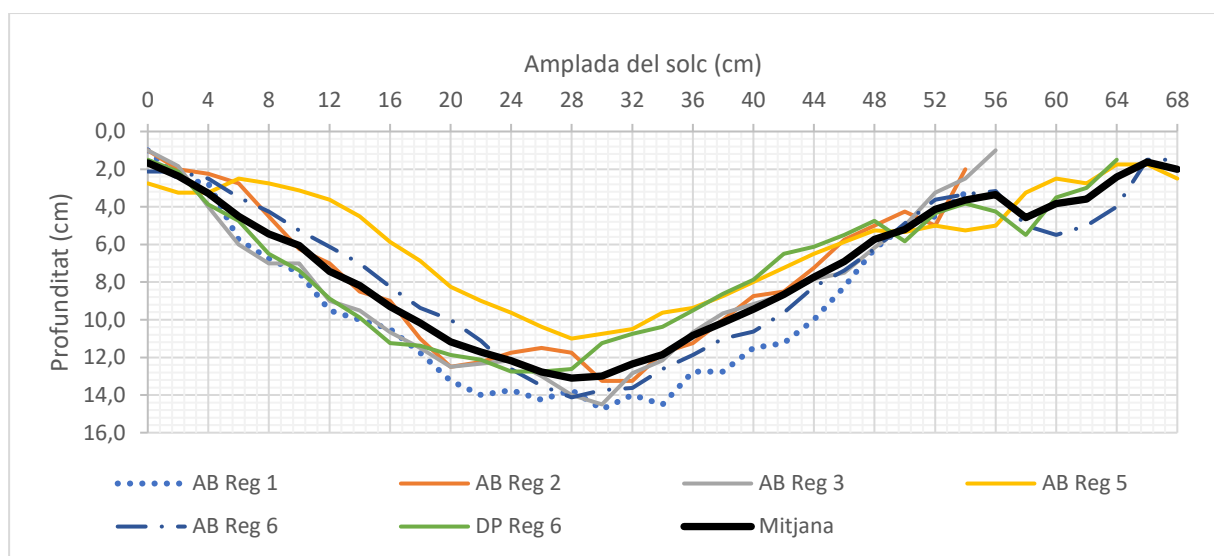


FIGURA 26: Evolució de la forma del solc mitjana al final de la parcel·la AUT (AB: abans; DP: després). FONT: Pròpia.

En relació al solc de la parcel·la AUT (Figura 26), la màxima profunditat es va assolir abans d'iniciar el reg, però a mesura que es feien els regs, la secció va disminuir provocant una reducció del volum portant d'aigua. La línia negra (valor mig) mostra com el solc va experimentar un canvi de tendència als 56 cm d'amplada. El moment on el solc va presentar la menor profunditat va ser abans del reg 6, amb una diferència de 3,7 cm de profunditat, respecte a la màxima. En general, totes les formes van ser molt semblants, tant a inici com a final de campanya.

La Figura 27 permet observar com evoluciona la secció del solc en la parcel·la AG al llarg de la temporada. El solc més profund es va donar abans d'iniciar el reg i després la profunditat es va reduir, de manera similar a la parcel·la AUT. En aquest cas, la profunditat mínima es va donar abans del reg 5, amb 3,12 cm respecte a la màxima. Com s'ha observat en la parcel·la AUT, també hi va haver un canvi de tendència en el pendent una vegada s'arribava als 56 cm d'amplada.



**FIGURA 27:** Evolució de la forma del solc mitjana al final de la parcel·la AG (AB: abans; DP: després). FONT: Pròpia.

Si es comparen les línies grogues (AB Reg 5) de la zona AUT i AG s'observen diferències mínimes (de 15 mm) entre les formes de les regues. La forma del solc de la parcel·la AUT i AG presentaven perfils molt similars, però la rega de la parcel·la AUT va assolir menys profunditat que l'AG.

## 4.5. CONTINGUT D'AIGUA AL SÒL

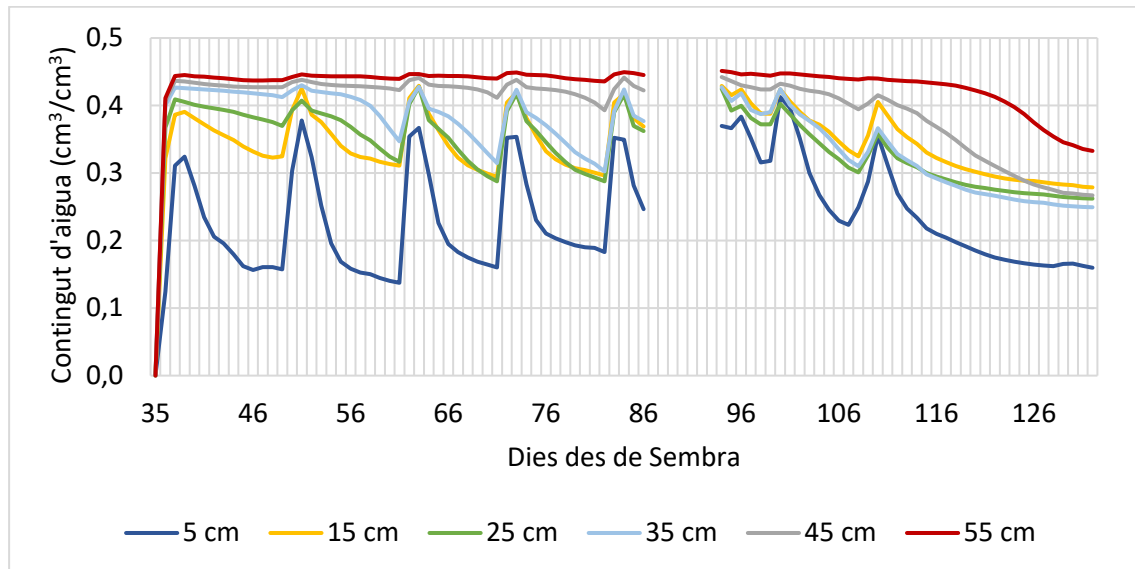
Les dades recopilades per les sondes de contingut d'aigua al sòl van permetre analitzar les variacions del contingut d'aigua en el sòl i identificar els moments de reg, així com calcular la dosi de reg necessària.

Les dades de les sondes de contingut d'aigua al sòl de tipus 2 no es van poder utilitzar, per problemes d'incompatibilitat entre el portal FarmConnect i Excel. Per aquest motiu, sols es mostren les dades de les sondes de contingut d'aigua al sòl de tipus 1, distribuïdes a l'inici i final de la parcel·la, i de les zones AUT-BAY-2 i AG-BAY-3.



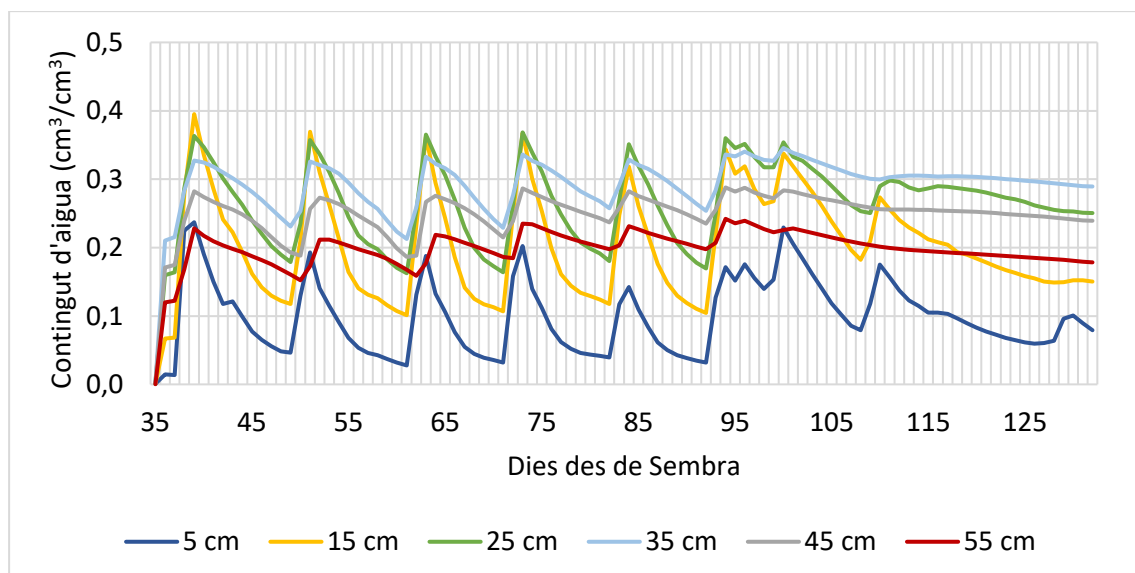
Les dades representades a les Figures 28-29-30-31 expressen el contingut volumètric d'aigua al sòl a diferents profunditats des del dia 35 de sembra (quan es van instal·lar a camp).

A l'inici de la parcel·la AUT (Figura 28) s'observa com el contingut en profunditat va ser de forma esglaonada, és a dir, a major profunditat el contingut volumètric augmentava. Les fluctuacions dels regs no arribaven a tanta profunditat, ja que a 45 i 55 cm les variacions eren molt petites. Del dia 86 al 96 va haver-hi un problema tècnic amb el sensor i no enviava dades (Figura 28).



**FIGURA 28:** Evolució del contingut d'aigua de la sonda inici de camp a la zona AUT. FONT: Pròpia.

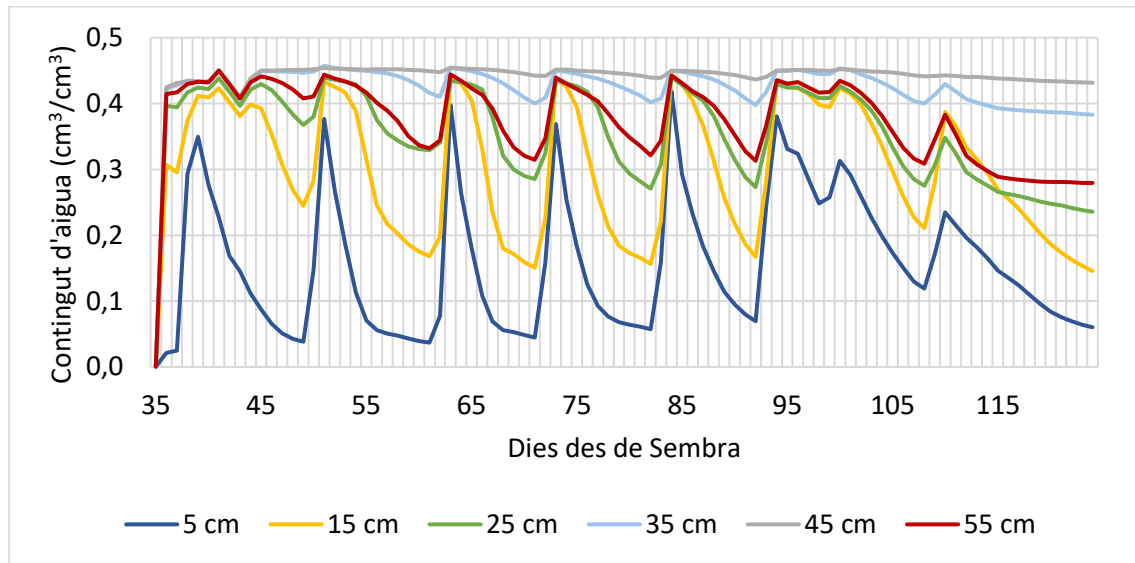
La representació del contingut volumètric d'aigua al final de la zona AUT (Figura 29) va ser diferent a la de l'inici de la zona AUT (Figura 28), ja que els continguts volumètrics van variar en totes les profunditats.



**FIGURA 29:** Evolució del contingut d'aigua de la sonda final de camp a la zona AUT. FONT: Pròpia.

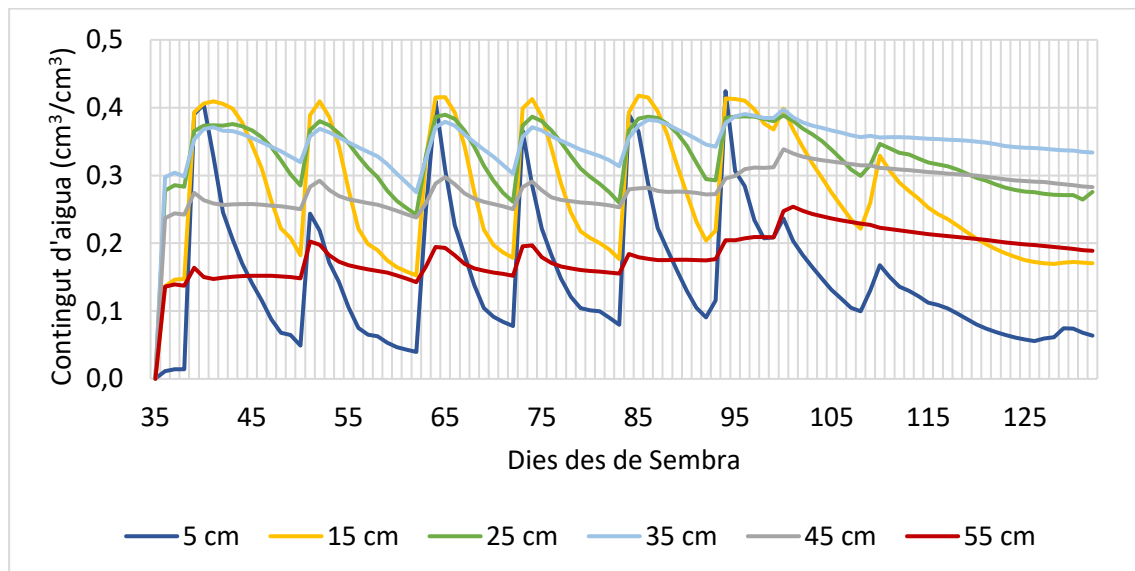
Es pot observar com el contingut d'aigua a l'inici de la zona AG (Figura 30) en profunditat va ser elevat i a mesura que avançaven els DAS (Dies des de Sembrar), el contingut volumètric disminuïa, de forma

similar com succeeix a la Figura 28. S'observa com l'aigua va tenir més efecte a la profunditat de 55 cm que a 35 i 45 cm. El valor va ser molt baix en els 5 cm de profunditat i després de regar va augmentar significativament, però després retornava aproximadament a la seva posició inicial.



**FIGURA 30:** Evolució del contingut d'aigua de la sonda inici de camp a la zona AG. FONT: Pròpia.

El contingut volumètric mesurat al final de la zona AG (Figura 31) va prendre valors diferents als de l'inici de la zona AG (Figura 30), ja que a DAS inicials, el contingut volumètric a major profunditat (35-45-55 cm) no era tan elevat com els de l'inici de la parcel·la. Es pot observar com en la zona del final de la parcel·la AG hi havia més variació del contingut volumètric en totes les profunditats en comparació a l'inici. Però presentava fluctuacions del contingut volumètric més lleugeres en comparació a la parcel·la AUT (Figura 29).



**FIGURA 31:** Evolució del contingut d'aigua de la sonda final de camp a la zona AG. FONT: Pròpia.

## 4.6. DOSI REQUERIDA

La dosi de reg es va calcular a partir de l'evapotranspiració del cultiu (Kc) i de les lectures de contingut d'aigua al sòl. Els resultats obtinguts es mostren a la Taula 11.

**TAULA 11:** Dotació d'aigua requerida per a cada reg calculada segons l'ETc i segons les lectures de contingut d'aigua del sòl. "ND": No Disponible. FONT: Pròpia.

Número de REG	ETc (mm)	Dosi requerida (mm) Sonda tipus 1	Dosi requerida (mm) Sonda tipus 2
1	ND	70	84
2	45	57	72
3	60	62	75
4	68	55	66
5	66	46	60
6	72	50	60

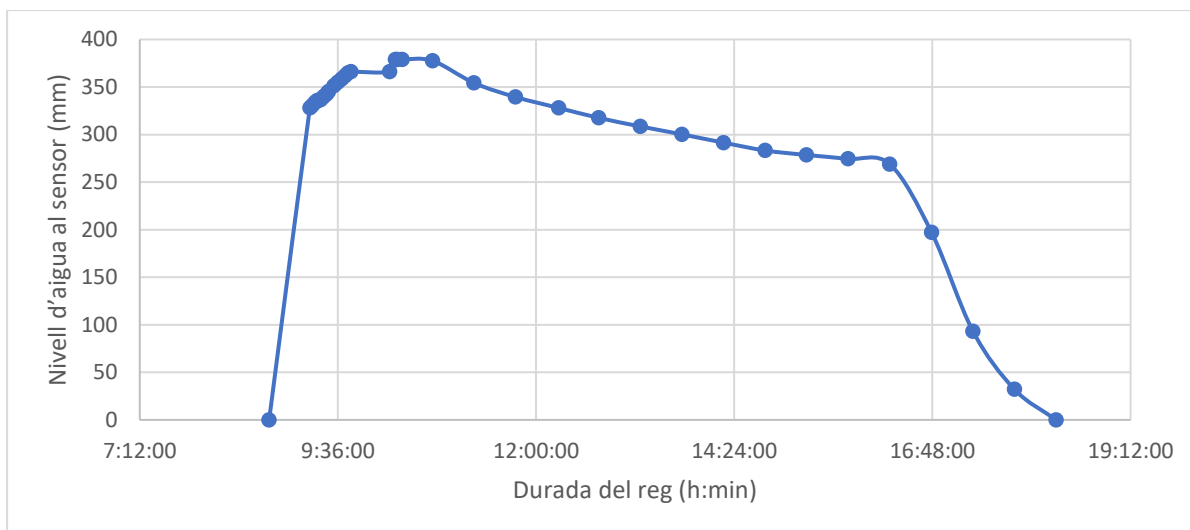
D'acord amb els valors de la dosi de reg requerida per una profunditat objectiu de 60 cm, aquesta seria variable en cada reg. Per problemes de protocol en la connectivitat entre les sondes de contingut d'aigua al sòl i el FarmConnect no va ser possible programar el reg de forma automatitzada. Alternativament en els regs 1, 2, 3 i 4, el criteri de reg es va basar en fixar el Tco d'acord amb el front d'avançament. Els regs 5 i 6 es van plantejar com una automatització parcial, on fixant una dosi requerida es van obtenir els temps de reg per uns cabals determinats maximitzant les eficiències a partir de l'execució del codi WinSRFR. La dosi requerida en els regs 5 i 6 es va determinar com a la més desfavorable dels regs anteriors (Taula 11). D'aquesta manera, la dosi de reg bruta, tenint en compte una eficiència de reg del 80%, va resultar ser de 100 mm.

## 4.7. SENSOR D'AVANÇ

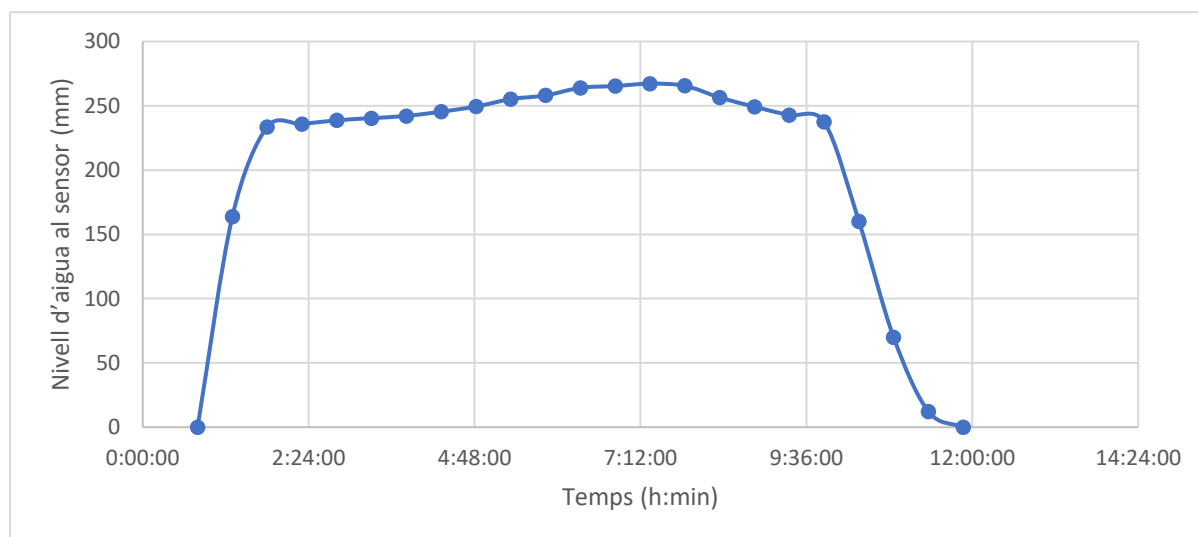
Com s'ha esmentat en la metodologia, l'Smart Front Sensor (SFS) no va funcionar correctament, ja que no realitzava les lectures de forma constant, ni amb la mateixa freqüència.

No obstant, de les lectures registrades en la localització del sensor (2/3 parts de la longitud de la parcel·la) es va observar una pauta de comportament similar, tal com es pot observar en les Figures 32, 33 i 34. En tots els casos es poden distingir 3 fases: a) una fase inicial caracteritzada per un increment molt ràpid de la làmina d'aigua fins a assolir el màxim; b) seguida d'una fase d'estabilització, on la làmina d'aigua manté un valor força constant; c) finalment es produeix una davallada de la làmina d'aigua a causa del recés, moment en què s'acaba d'infiltrar tota l'aigua en el sòl.

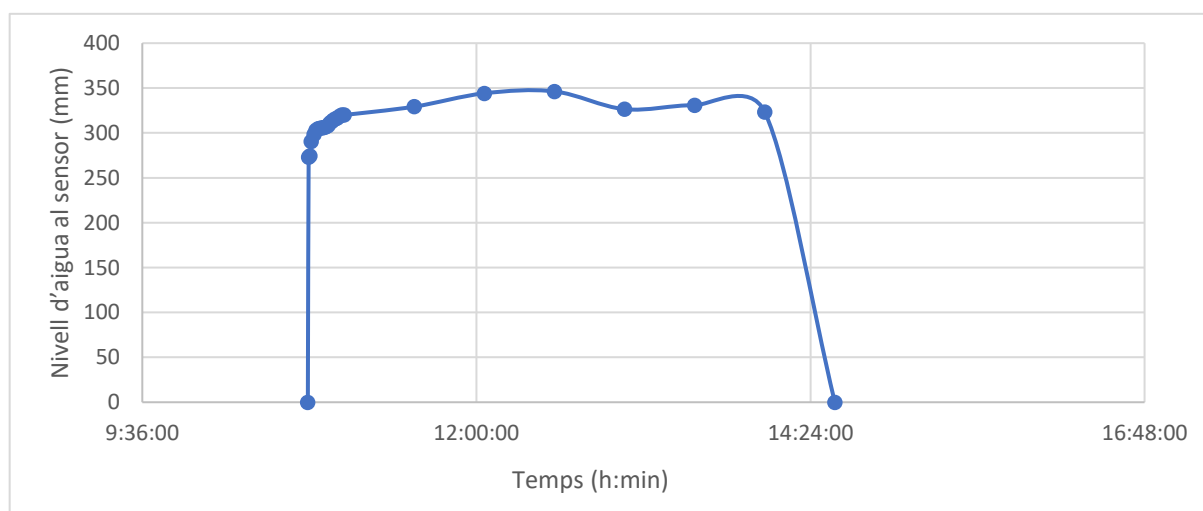
Cal tenir present que les lectures del SFS mostraven el nivell d'aigua que hi havia en el sensor, però observant aquestes dades no es va poder determinar la profunditat de referència, el que dificultava i impossibilitava la interpretació de les dades.



**FIGURA 32:** Registres del sensor de front d'avançament, zona AUT BAY-2 reg 1. FONT: Pròpia.



**FIGURA 33:** Registres del sensor de front d'avançament, zona AG BAY-4 reg 2. FONT: Pròpia.



**FIGURA 34:** Registres del sensor de front d'avançament, zona AUT BAY-1 reg 2. FONT: Pròpia.

## 4.8. SIMULACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE

### 4.8.1. DETERMINACIÓ DELS ÍNDEXS D'EFICIÈNCIA DE REG OBTINGUTS EN ELS ASSAJOS A CAMP

#### PARÀMETRES DE LES FUNCIONS D'INFILTRACIÓ

A la Taula 12 s'agrupen els paràmetres de les funcions d'infiltració de Kostiakov-Lewis simple (eq 6) amb les que es van obtenir els resultats de les eficiències.

TAULA 12: Paràmetres de les funcions d'infiltració de l'aigua al sòl. FONT: Pròpia.

ZONA	Temporada 2022	K	a	b
AUT	BAY 1 i 2- 1r reg	70,174	0,53	0,24
	BAY 1 i 2- 2n reg	38,174	0,17	0,24
	BAY 1 i 2- 3r reg	60,174	0,16	0,22
	BAY 1 i 2- 4t reg	67,174	0,31	0,24
	BAY 1 i 2- 5è reg	55,174	0,33	0,10
	BAY 1 i 2- 6è reg	64,174	0,36	0,36
AG	BAY 3 i 4 (1-6 reg)	60,174	0,16	0,20

#### ÍNDEXS DE QUALITAT DEL REG

Per avaluar el comportament dels regs es presenten les següents taules, les quals mostren el cabal, el temps de tall (Tco), els volums aplicats i els índexs d'eficiència.

Els valors corresponents a la zona AUT BAY-1 s'indiquen en la Taula 13. Les pitjors eficiències d'AE i DP, amb valors de 69% i 31% respectivament, es van donar en el reg 1. Cal destacar que el reg 3 va ser un dels regs que va comportar major aportació d'aigua, tot i obtenir bons valors d'eficiències de reg. Els regs 4-5-6 van presentar un cabal variable, conservant el cabal de consigna, però amb el temps de tall variable. Els regs 4-5 van presentar eficiències d'aplicació iguals, del 84%, mentre que en el cas del requeriment, el reg 4 va ser superior al del reg 5. S'ha de tenir en compte que en els dos regs, les pèrdues per percolació profunda (DP) van ser notables. Per últim, el reg 6 va presentar valors molt bons, a diferència a tots els regs realitzats.

El reg 1 de la zona AUT BAY-2 va ser el que va comportar els millors valors d'eficiències, mentre que en la BAY-1, van ser acceptables. En contra, el reg 6 va exhibir paràmetres d'eficiència del reg bons, però no els millors, com la BAY-1.

**TAULA 13:** Característiques de la gestió del reg a la zona AUT BAY-1. Tco: Temps de tall; AE: Eficiència d'aplicació; RE: Eficiència de requeriment; DP: Pèrdues per percolació. FONT: Pròpia.

Nº REG	Cabal mitjà entrant a les regues (l/s)	Temps de tall del reg (h:min)	Dosi de reg aplicada (m <sup>3</sup> /ha)	AE (%)	RE (%)	DP (%)
1	3,3	2:12	1.359	69	100	31
2	1,4	3:42	1.020	100	43	1
3	0,9	7:02	1.172	98	73	2
4	0,9	3:37	1.053	84	96	16
	1,5	1:39				
5	0,9	2:51	884	84	86	18
	1,5	1:43				
6	0,9	3:22	889	94	90	6
	1,5	1:11				

**TAULA 14:** Característiques de la gestió del reg a la zona AUT BAY-2. Tco: Temps de tall; AE: Eficiència d'aplicació; RE: Eficiència de requeriment; DP: Pèrdues per percolació. FONT: Pròpia.

Nº REG	Cabal mitjà entrant a les regues (l/s)	Tco (h:min)	Dosi de reg aplicada (m <sup>3</sup> /ha)	AE (%)	RE (%)	DP (%)
1	2,5	1:59	1.073	94	93	6
2	1,4	4:13	1.275	99	47	2
3	0,9	6:55	1.329	97	76	3
4	0,9	2:45	1.216	81	98	21
	1,5	2:21				
5	0,9	2:43	952	88	83	13
	1,5	1:30				
6	0,9	2:44	1.110	86	96	15
	1,5	2:02				

A la Taula 15 es mostren els resultats de la parcel·la AG (BAY-3 i BAY-4). Tots els regs van presentar un cabal proper als 0,5 l/s. En general, tots van tenir eficiències d'aplicació baixes i eficiències de requeriment molt altes, pròximes al 100%. Cal remarcar que les percolacions profundes (DP) de la zona AG van tenir valors bastant elevats, en comparació als de la zona AUT.

**TAULA 15:** Característiques de la gestió del reg a la zona AG BAY-3 BAY-4. ND: No Disponibles; Tco: Temps de tall; AE: Eficiència d'aplicació; RE: Eficiència de requeriment; DP: Pèrdues per percolació. FONT: Pròpia.

Nº REG	Cabal mitjà entrant a les regues (l/s)	Tco (h:min)	Dosi de reg aplicada (m <sup>3</sup> /ha)	AE (%)	RE (%)	DP (%)
1 <sup>(1)</sup>	0,58	20:19	2.534	ND	ND	ND
2	0,50	12:08	1.323	79	96	21
3	0,49	14:14	1.488	72	100	29
4	0,51	12:58	1.441	77	100	25
5 <sup>(1)</sup>	0,49	17:48	1.864	ND	ND	ND
6	0,50	15:07	1.618	66	100	34

- (1) El Tco i la làmina d'aigua aplicada van ser tant elevats que van resultar en que l'aigua trigava més de 7 dies a infiltrar-se totalment. En aquests casos el model no va convergir, de manera que no es van poder determinar els valors d'AE, RE i DP.

## PRODUCTIVITAT DE L'AIGUA

Pel que fa a l'evapotranspiració total del cultiu, aquesta va ser de 525 mm, mentre que les aportacions d'aigua van ser de 681 mm per la zona AUT i de 1.026 mm per la zona AG. Les eficiències globals en la utilització de l'aigua de reg van ser del 87% i 55%, respectivament.

En la Taula 16 s'observa que la producció final del camp va ser molt similar en els dos casos, tot i que la zona AUT va produir 292 kg/ha de gra a 14% d'humitat més que la zona AG. Pel que fa al volum d'aigua de reg, es constata que en les parcel·les AG es van aplicar 10.268 m<sup>3</sup>, mentre que en la parcel·la AUT va aplicar 3.459 m<sup>3</sup> menys, un 34% menys d'aigua de reg. Gràcies als coeficients de relació entre producció i volum d'aigua de reg aplicat, es va deduir que la parcel·la AUT va aconseguir un 50% més de productivitat de l'aigua de reg que la parcel·la AG.

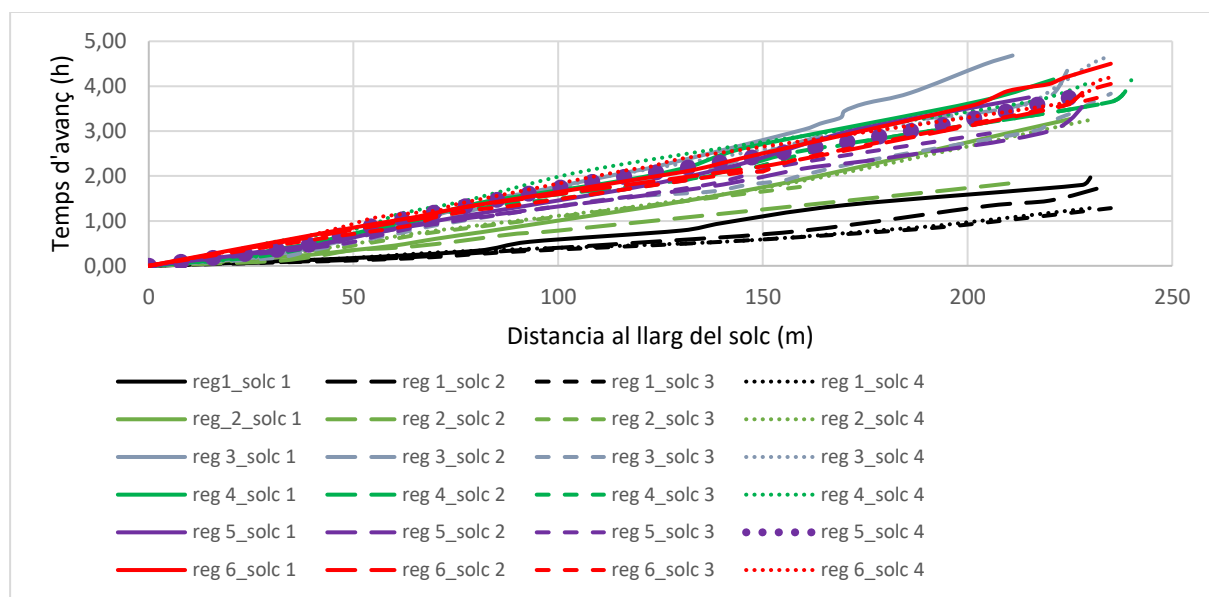
**TAULA 16:** Resum final sobre l'avaluació de la temporada. FONT: Pròpia.

Maneig del reg	Producció (kg /ha, 14%humitat)	Aigua de reg (m <sup>3</sup> /ha)	Aigua de pluja (m <sup>3</sup> /ha)	Aigua total aportada (reg+pluja)(m <sup>3</sup> /ha)	Productivitat de l'aigua de reg (kg/m <sup>3</sup> )	Productivitat de l'aigua total (reg+pluja) (kg/m <sup>3</sup> )
AUT *	9.774	6.809	775	7.584	1,44	1,29
AG	9.482	10.268	775	11.043	0,92	0,86

\* Les dades de la parcel·la AUT s'han obtingut a partir de la mitja entre les dades de les dues repeticions BAY 1 i BAY 2.

## 4.8.2. VALIDACIÓ DE LA FUNCIÓ D'INFILTRACIÓ ESTÀNDAR

El primer pas a realitzar per obtenir la funció d'infiltració estàndard del reg va ser l'elecció del reg-solc per fer el modelatge. En la Figura 35 es pot observar com l'avanç del reg 5\_solc 4 és el que es va seleccionar com a pretendent, ja que es trobava dins de la mitjana de totes les dades d'avanç mostrejades (tenint en compte que es va descartar el reg 1 perquè no es va considerar representatiu del propi reg); així doncs, va ser un candidat per obtenir la funció d'infiltració (STD\_1), tal com s'ha descrit en l'apartat de metodologia 3.10.4.



**FIGURA 35:** Agrupació de tots els avançaments de cada reg i solc; el reg 5\_solc 4 està representat amb punts més gruixuts per indicar l'avançament mig del conjunt. FONT: Pròpia.

Es va procedir a simular tots els escenaris amb la funció d'infiltració STD\_1 i obtenir l'avanç modelat de cada reg i solc. Per avaluar i quantificar la similitud entre els valors d'avançament mesurats a camp i els estimats amb el model, es va utilitzar l'estadístic RMSE.

Com s'observa en la Taula 17, la majoria de resultats van assolir un valor de RMSE inferior al valor preassignat de 20 minuts, que com s'ha esmenat a l'apartat de metodologia (3.10.4.), mentre que altres resultats es van aproximar molt al llindar, com va ser el cas de R3\_Q3 (amb un temps de 24,7 minuts) i R3\_Q1 (amb un temps de 33,5 minuts). D'altra banda, hi ha valors que distaven significativament del llindar, com va ser el cas de R2\_Q2 (amb un temps de 86,0 minuts).

**TAULA 17:** RMSE obtinguts per cada reg simulat (RMSE<20 min en verd i RMSE>20 min en vermell). Les dades del reg 1 s'han descartat a causa de la diferenciació de condicions del reg (indicat amb "-"). FONT: Pròpia.

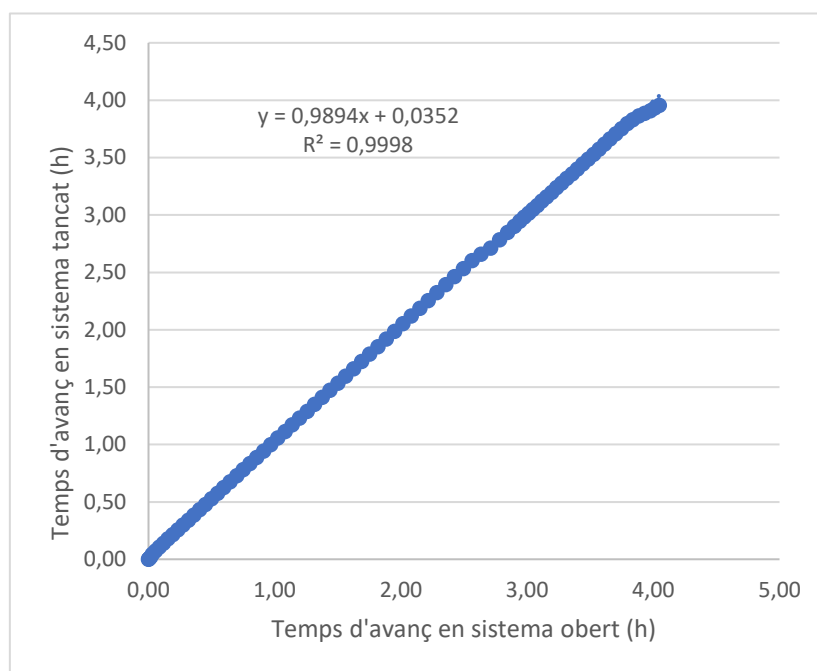
Número de reg	Número de solc			
	1	2	3	4
1	-	-	-	-
2	8,3	65,0	4,9	3,8
3	33,5	86,0	24,7	14,9
4	14,8	52,9	11,0	9,0
5	14,1	59,0	13,9	7,1
6	41,0	60,2	11,5	14,1



En el cas del solc número 2 (Q2) s'observa com en tots els modelatges fets no hi havia cap cas acceptable, mentre que van ser tots acceptables pel número 4 (Q4).

Cal remarcar que la funció obtinguda va ser vàlida pel 60% dels casos, ja que de les 20 mostres de reg, 12 mostres van estar per sota del llindar RMSE.

Com s'ha mencionat en l'apartat de metodologia (3.10.4.), hi ha vegades en que el model no convergeix a una solució. Per obtenir-la es va canviar el sistema de reg dels solcs de tancat a obert en l'extrem final de la parcel·la. La Figura 36 mostra la relació entre les dades estimades amb el sistema tancat en comparació amb el sistema obert, demostrant una relació lineal de gairebé 1:1, el que justifica que el procediment emprat va ser vàlid.



**FIGURA 36:** Relació entre les dades d'avanç amb el sistema tancat versus obert. FONT: Pròpia.

L'últim pas per validar la funció d'infiltració STD\_1 va consistir en verificar si la làmina d'aigua de reg que s'aplica en el cas modelat (reg 5\_solc 4) va ser similar a la dosi requerida (DR). El valor de la làmina aplicada amb el reg va ser de 104 mm i la DR de 100 mm, es a dir, ambdós valors van ser pràcticament coincidents. Per tant, es va concloure que la funció STD\_1 (Taula 18) era correcte per fer el modelatge dels regs i procedir a la determinació de les pautes de reg per les eficiències òptimes.

**TAULA 18:** Paràmetres de la funció d'infiltració de l'aigua al sòl. FONT: Pròpia.

Temporada 2022	K	a	b
STD_1	77,174	0,25	0,24

### 4.8.3. DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE REG ÒPTIMS, CABAL I TEMPS DE TALL

Mitjançant l'aplicació del codi WinSRFR, per un rang de cabals de 0,5 a 1,8 L/s, es van determinar els temps de tall adequats per tal d'assolir eficiències d'aplicació (AE) i requeriment (RE) òptims i pèrdues per percolació profunda (DP) mínimes. Els resultats obtinguts en les simulacions es presenten en la Taula 19, on es poden observar certes tendències en les pautes de reg: a) per a cabals baixos (0,5 – 0,7 l/s), la diferència de temps de tall va ser aproximadament de 2 hores per cada augment de 0,1 l/s; b) per a cabals mitjans (1,0 – 1,4 l/s), la variació de temps va ser de 30 minuts; c) per a cabals alts (1,5 – 1,8 l/s), la diferència de temps va ser de 15 minuts.

Per cabals de reg baixos, el volum d'aigua aplicat va ser aproximadament un 25% superior als regs amb cabal alt. D'altra banda s'observa com els valors de DP van disminuir a mesura que augmentava el cabal. Finalment, les eficiències d'aplicació van mostrar els pitjors resultats pels cabals més baixos, millorant fins a arribar a gairebé al 100% pels cabals més alts, mentre que l'eficiència de requeriment, va assolir valors elevats en tots els casos, els valors superiors van correspondre als cabals inferiors.

**TAULA 19:** Cabals i temps de tall òptims per obtenir una eficiència màxima. FONT: Pròpia.

Cabal (l/s)	Tco (h:min)	Volum d'aigua de reg aplicat (m <sup>3</sup> /ha)	AE (%)	RE (%)	DP (%)
0,5	12:45	1.168	78	99	22
0,6	10:00	1.098	82	99	18
0,7	08:15	1.058	86	98	15
0,8	06:50	953	88	98	12
0,9	06:00	988	90	97	10
1,0	05:10	946	94	95	7
1,1	04:45	956	94	96	6
1,2	04:15	934	95	96	5
1,3	03:45	893	96	95	4
1,4	03:25	876	98	93	2
1,5	03:05	847	99	92	1
1,6	02:55	854	99	92	2
1,7	02:45	856	99	91	2
1,8	02:30	824	99	89	1

## 4.9. RESULTATS ECONÒMICS

Prèviament a desenvolupar l'apartat de l'avaluació econòmica del treball, es van definir els preus de tots els elements imputables (Taula 20).

**TAULA 20:** Valors de tots els elements imputables; \*: els costos ja estan comptabilitzats en l'apartat de mà d'obra de reg.  
FONT: Pròpia.

Gestió del reg automàtic (AUT)			Gestió del reg tradicional (AG)		
Concepte	Cost Unitari	Unitats	Concepte	Cost Unitari	Unitats
<b>Material de reg</b>			<b>Material de reg</b>		
Pikometer (1 u)	13.050,00	€/u	Vàlvula obertura de reg (1 u)	521,34	€/u
Blade Valve (2 u)	2.911,00	€/u	Canonada flexible rull (60 m)	0,91	€/m
Smart Meter Node (1 u)	1.060,00	€/u	Quart Turn (1 u)	2.750,00	€/u
Sensor del contingut d'aigua (2 u)	1.750,00	€/u	Sensor del contingut d'aigua (2 u)	1.750,00	€/u
Sensor de front d'avanç (2 u)	735,00	€/u	Sensor de front d'avanç (2 u)	735,00	€/u
Estació meteorològica (1 u)	4.655,00	€/u			
<b>Obres/actuacions per efectuar el reg</b>			<b>Obres/actuacions per efectuar el reg</b>		
Obra civil i repartidor			Repartiment canonada flexible *	-	€/ha
Moviments de terra per arqueta / base / canonada	450,00	€/ha	Instal·lació de la vàlvula *	-	€/ha
Arqueta pikometer i base pedestal	6.396,12	€/ha			
Canonada de distribució i muntatge	4.448,66	€/ha			
Moviments de terra mota i tubs repartidor	315,00	€/ha			
Tubs repartidors a les regues	355,60	€/ha			
<b>Preparació del sòl</b>			<b>Preparació del sòl</b>		
Anivellament (cada 7 anys)	80,00	€/ha	Anivellament (cada 7 anys)	80,00	€/ha
Subsolat (anualment)	60,00	€/ha	Subsolat (anualment)	60,00	€/ha
Pase de grada de discos (anualment)	55,00	€/ha	Pase de grada de discos (anualment)	55,00	€/ha
Fresat (anualment)	80,00	€/ha	Fresat (anualment)	80,00	€/ha
<b>Actuacions (anualment)</b>			<b>Actuacions</b>		
Aplicació dels adobs de fons	260,00	€/ha	Aplicació dels adobs de fons	260,00	€/ha
Sembra i llavor	316,00	€/ha	Sembra i llavor	316,00	€/ha
Calçat i cobertura	128,00	€/ha	Calçat i cobertura	128,00	€/ha
Tractament herbicida	106,00	€/ha	Tractament herbicida	106,00	€/ha
Preu tractorista collita	9,00	€/t gra	Preu tractorista collita	9,00	€/t gra
Preu tractorista transport	10,00	€/t gra	Preu tractorista transport	10,00	€/t gra
<b>Altres</b>			<b>Altres</b>		
Arrendament de la terra	450,00	€/ha	Arrendament de la terra	450,00	€/ha
Comunitat de regants	148,50	€/ha	Comunitat de regants	148,50	€/ha
Ma d'obra durant el reg	46,00	€/ha	Mà d'obra durant el reg	65,00	€/ha
<b>Ingressos collita</b>			<b>Ingressos collita</b>		
Preu gra (al 14% d'humitat)	312,00	€/t	Preu gra (al 14% d'humitat)	312,00	€/t

Tenint en compte les amortitzacions dels materials, reparacions realitzades i totes les despeses esmentades en la metodologia, es procedeix a l'avaluació econòmica del projecte (Taula 20). Per facilitar la comparació econòmica entre les zones AUT i AG, els preus obtinguts estan referenciats en €/ha.

En el càlcul de la mà d'obra invertida durant el reg es van tenir en compte dos factors: a) el temps que es requeria per la instal·lació de les sondes de contingut d'aigua i dels sensors de front d'avanç va ser de 2-3 hores/ha; b) el temps invertit per efectuar els regs i supervisar que es realitzen correctament a camp va ser de 20 min/reg. Obtingut el temps total invertit per la gestió del reg i tenint en compte els honoraris de l'operari de 12 €/h, es va obtenir l'import final de mà d'obra per la gestió del reg.

**TAULA 21:** Resultats de l'avaluació econòmica de l'assaig per la collita 2022. FONT: Pròpia.

Gestió del reg automàtic (AUT)		Gestió del reg agricultor (AG)	
Costos	€/ha anuals	Costos	€/ha anuals
Automatització reg (excepte sensors)	985,00	Vàlvula manual a l'hidrants	34,41
Sensors de camp (SmartSensor i Moisture Prove)	651,37	Canonada flexible (60 m)	54,06
Costos manteniment	1.267,06		
Obra civil i repartidor:			
Moviments de terra per arqueta/base/canonada	13,76		
Arqueta Pikometer i base pedestal	195,60		
Canonada de distribució i muntatge	136,04		
Moviments de terra mota i tubs repartidor	288,99		
Tubs repartidors als solcs	32,62		
<b>Preparació del sòl:</b>		<b>Preparació del sòl:</b>	
Anivellament	11,43	Anivellament	11,43
Subsolat	60,00	Subsolat	60,00
Pase de grada de discos (anualment)	55,00	Pase de grada de discos (anualment)	55,00
Fresat	80,00	Fresat	80,00
<b>Adob de fons i aplicació</b>	<b>260,00</b>	<b>Adob de fons i aplicació</b>	<b>260,00</b>
<b>Llabor i sembra</b>	<b>316,00</b>	<b>Llabor i sembra</b>	<b>316,00</b>
<b>Calçat i cobertura</b>	<b>128,00</b>	<b>Calçat i cobertura</b>	<b>128,00</b>
<b>Herbicida i aplicació</b>	<b>106,00</b>	<b>Herbicida i aplicació</b>	<b>106,00</b>
<b>Mà d'obra reg</b>	<b>46,00</b>	<b>Mà d'obra reg</b>	<b>65,00</b>
<b>Collita</b>	<b>87,97</b>	<b>Collita</b>	<b>85,34</b>
<b>Transport</b>	<b>97,74</b>	<b>Transport</b>	<b>94,82</b>
<b>Arrendament terra</b>	<b>450,00</b>	<b>Arrendament terra</b>	<b>450,00</b>
<b>Comunitat de regants</b>	<b>148,50</b>	<b>Comunitat de regants</b>	<b>148,50</b>
<b>Costos totals</b>	<b>5.417,08</b>	<b>Costos totals</b>	<b>1.948,56</b>
<b>Ingressos</b>		<b>Ingressos</b>	
Venda (9.774,37 kg/ha cultivada* 0,312 €/kg)	<b>3.049,49</b>	Venda (9.482,36 kg/ha cultivada * 0,312 €/kg)	<b>2.958,38</b>
<b>Beneficis</b>	<b>-2.367,59</b>	<b>Beneficis</b>	<b>1.009,83</b>

En la Taula 21, s'observa com per la parcel·la AUT, els beneficis finals van ser negatius i amb un valor de -2.367,59 €/ha. Per la parcel·la AG, els beneficis finals van ser positius i amb un valor de 1.009,83 €/ha. Així doncs, la parcel·la AG va presentar una diferència de beneficis de 3.377,42 €/ha respecte a la parcel·la AUT.

A continuació, en la Taula 22, es va realitzar una avaluació econòmica per una parcel·la hipotètica de 5 ha. En aquesta situació, els costos afectats per la parcel·la AUT van ser els de materials tecnològics de comportes, obres associades, mà d'obra en el reg i estació meteorològica:

**TAULA 22:** Resultats de l'avaluació econòmica en la parcel·la hipotètica de 5 ha. FONT: Pròpia.

Gestió del reg automàtic (AUT)		Gestió del reg agricultor (AG)	
Costos	€/ha anuals	Costos	€/ha anuals
Automatització reg (excepte sensors)	197,00	Vàlvula manual a l'hidrant	34,41
Sensors de camp (SmartSensor i Moisture Prove)	651,37	Canonada flexible (60 m)	54,06
Costos manteniment	276,22		
Obra civil i repartidor:			
Moviments de terra per arqueta/base/canonada	13,76		
Arqueta Pikometer i base pedestal	195,60		
Canonada de distribució i muntatge	136,04		
Moviments de terra mota i tubs repartidor	288,99		
Tubs repartidors als solcs	32,62		
<b>Preparació del sòl:</b>		<b>Preparació del sòl:</b>	
Anivellament	11,43	Anivellament	11,43
Subsolat	60,00	Subsolat	60,00
Pase de grada de discos	55,00	Pase de grada de discos	55,00
Fresat	80,00	Fresat	80,00
<b>Adob de fons i aplicació</b>	<b>260,00</b>	<b>Adob de fons i aplicació</b>	<b>260,00</b>
<b>Llabor i sembra</b>	<b>316,00</b>	<b>Llabor i sembra</b>	<b>316,00</b>
<b>Calçat i cobertura</b>	<b>128,00</b>	<b>Calçat i cobertura</b>	<b>128,00</b>
<b>Herbicida i aplicació</b>	<b>106,00</b>	<b>Herbicida i aplicació</b>	<b>106,00</b>
<b>Mà d'obra del reg</b>	<b>28,80</b>	<b>Mà d'obra del reg</b>	<b>65,00</b>
<b>Collita</b>	<b>87,97</b>	<b>Collita</b>	<b>85,34</b>
<b>Transport</b>	<b>97,74</b>	<b>Transport</b>	<b>94,82</b>
<b>Arrendament terra</b>	<b>450,00</b>	<b>Arrendament terra</b>	<b>450,00</b>
<b>Comunitat de regants</b>	<b>148,50</b>	<b>Comunitat de regants</b>	<b>148,50</b>
<b>Costos totals</b>	<b>3.6321,04</b>	<b>Costos totals</b>	<b>1.948,56</b>
<b>Ingressos</b>		<b>Ingressos</b>	
Venda (9.774,37 kg/ha cultivada * 0,312 €/kg)	<b>3.049,49</b>	Venda (9.482,36 kg/ha cultivada * 0,312 €/kg)	<b>2.958,38</b>
<b>Beneficis</b>	<b>-571,55</b>	<b>Beneficis</b>	<b>1.009,83</b>

Per la parcel·la hipotètica de 5 ha amb gestió AUT, els beneficis finals van ser de -571,55 €/ha. Per la parcel·la AG, els beneficis finals van ser de 1.009,83 €/ha. Així doncs, la parcel·la AG va presentar una diferència de beneficis de 1.581,38 €/ha en relació a la parcel·la AUT.

Si es vol comparar el cost de la mà d'obra del reg entre els dos sistemes estudiats, s'observa que el cost en la parcel·la AUT va ser un 30% inferior al de la parcel·la AG quan la parcel·la era d'1 ha. Però si es té en compte una parcel·la de 5 ha, llavors el cost de la mà d'obra de reg en la parcel·la AUT va ser un 55% inferior.

Comparant el material utilitzat en l'estudi, s'observa com la parcel·la AUT requeria d'una inversió inicial de 41.521,78 €, mentre que la inversió de la parcel·la AG va ser de 575,94 €, unes 72 vegades inferior.

## 5. DISCUSSIÓ

### 5.1. DESENVOLUPAMENT DEL CULTIU

#### 5.1.1. ESTADIS FENOLÒGICS

Respecte a l'estadi fenològic, el cultiu va seguir una evolució contínua, idèntica en els dos sistemes de reg analitzats (AUT i AG). El desenvolupament total de la planta va estar lligat amb els graus dia, que és la suma de la diferència de temperatura mitjana diària i la temperatura base que ha d'assolir perquè el seu desenvolupament sigui correcte; en el cas del blat de moro, la temperatura base és de 10°C (Noriega *et al.*, 2011). Com s'ha comentat a l'apartat de caracterització climàtica (3.2.) a la metodologia, durant la campanya del 2022 les temperatures van ser més altes en relació a les campanyes anteriors, per tant el cultiu va assolir abans els graus-dia objectius per la maduració. D'altra banda, un augment de la temperatura mitjana diària comporta un augment en el rendiment del metabolisme i per tant major desenvolupament de la planta (Hatfield i Pruegger, 2015).

El fet que no s'hagin apreciat diferències en l'estadi fenològic, en l'alçada de la planta i en la profunditat radicular entre el maneig de les zones AUT i AG descarta la influència del mètode de reg en el desenvolupament del cultiu.

#### 5.1.2. DETERMINACIÓ DE LA BIOMASSA

La biomassa va permetre observar com va ser l'evolució del cultiu respecte: a) la matèria fresca (Figura 22); b) la matèria seca (Figura 23).

En funció de la finalitat del producte, interessava obtenir produccions màximes en matèria fresca o bé en matèria seca. En el cas que s'utilitzés la producció del cultiu per a fer ensitjat, el camp es segaria al voltant del 28 de juliol, quan va haver el màxim nivell de biomassa (més kg mf/ha). En aquesta data, la parcel·la AUT va tenir una millora del 29% de la productivitat si es compara amb la parcel·la AG.

En canvi, si la finalitat productiva del camp és per gra, llavors interessa que hi hagi el valor màxim en matèria seca. En aquest cas, les parcel·les AUT i AG van tenir estimes de producció diferents segons la data de mostreig (1 de setembre i 3 d'octubre), però sense ser significatives. Segons les produccions reals que s'indiquen en la Taula 16, la parcel·la AUT va recollir 9.774 kg ms/ha, un 3% més que la parcel·la AG. Per tant, és molt possible que les diferències observades en les estimacions estiguessin associades al baix nombre de repeticions. Es va concloure que la productivitat de gra en matèria seca va ser poc influenciada pel sistema de reg utilitzat.

Les tendències que es van observar respecte la biomassa de matèria seca van ser les esperades i a mesura que anava creixent el cultiu, el pes de matèria seca va anar augmentant, com també van exposar Barroso *et al.* (2016) en el seu treball. Mentre que en el cas de la matèria fresca, el punt màxim es va assolir molt abans, ja que un cop la planta arriba al màxim nivell fisiològic utilitza les reserves per fer l'emplenament del gra i no per créixer. Per això va perdent humitat i com a conseqüència pes fresc, el que determina fer abans la recol·lecció.

## 5.2. VARIABILITAT DE CABALS EN CADA REG DE LA PARCEL·LA AUT

La màxima variació en el rang de cabals entre les diferents regues es va donar en el reg 3 (Taula 10). Aquesta diferència entre cabals va comportar una baixa uniformitat entre regues que pot estar associada amb una anivellació incorrecta dels tubs de PVC que permetien l'entrada d'aigua des de la capçalera dels camp ("pontoon") a cadascuna de les regues. A conseqüència d'aquest fet, aquells tubs col·locats a una cota menor van permetre el pas de major cabal d'aigua que els de cotes superiors.

Es pot observar en la Figura 24 com el solc 19 és el que va proporcionar més cabal i per tant la seva cota estaria més baixa. Per contra, el solc 7 és el que va proporcionar menys cabal i la cota estaria més alta.

En la Taula 10 s'observa que els regs amb cabal de consigna entrant al "pontoon" alt van resultar amb una menor variabilitat de cabal entre solcs, en comparació amb els regs amb cabal de consigna baix. Per qualsevol cabal de consigna els tubs amb menor cota van proporcionar cabals més alts que els tubs amb major cota. Assumint que les diferències de cabal entre els tubs a diferent cota van ser similars independentment del cabal de consigna entrant, el coeficient de variació serà menor quan s'utilitzen cabals de consigna alts perquè la mitjana prendrà un valor més elevat que en el cas de cabals baixos.

## 5.3. TEMPS D'AVANÇAMENT

Els regs 1 i 2 (cabals alts) són els que van presentar un avanç més ràpid (Figura 25), ja que a l'aplicar un gran volum d'aigua amb una durada de reg baixa, va fer que la velocitat d'avanç fos alta.

S'observa com les dades d'avanç es van ajustar molt bé a una funció polinòmica de segon grau sense terme independent, ja que els valors de l'índex de  $R^2$  van oscil·lar entre 0,74 i 0,98. Les diferències observades són degudes a la variabilitat dels cabals entrants entre regues i probablement a la manca de uniformitat en les propietats hidrològiques del sòl.

## 5.4. GEOMETRIA DEL SOLC

Els solcs més profunds es van assolir abans d'iniciar el reg 1 (Figura 26 i 27). A mesura que es realitzaven els regs, el flux de l'aigua comportava més fenòmens d'erosió, pel que s'arrossegava la sorra que sedimentava al llarg del solc. La sedimentació de les partícules de sorra al final del solc podria comportar problemes de reducció de perfil del solc i com a conseqüència que el volum de capacitat portant del solc fos menor, és a dir, que hi hagués més facilitat per provocar desbordament.

Si es compara la forma del solc entre els dos sistemes de reg, s'observa com en el cas del reg 1 a la parcel·la AUT, a l'aplicar un cabal alt va comportar més deformació del solc i aquesta va ser més sobtada que no pas amb el reg 1 de la parcel·la AG, que es va realitzar amb un cabal 7 vegades més baix.

Al variar la forma del solc després de cada reg, caldria fer un reajustament al perfil de la rega a l'hora de fer els modelatges. Així doncs, seria interessant realitzar un anàlisi de sensibilitat per avaluar com afecta la forma del solc a l'avançament de l'aigua de reg.

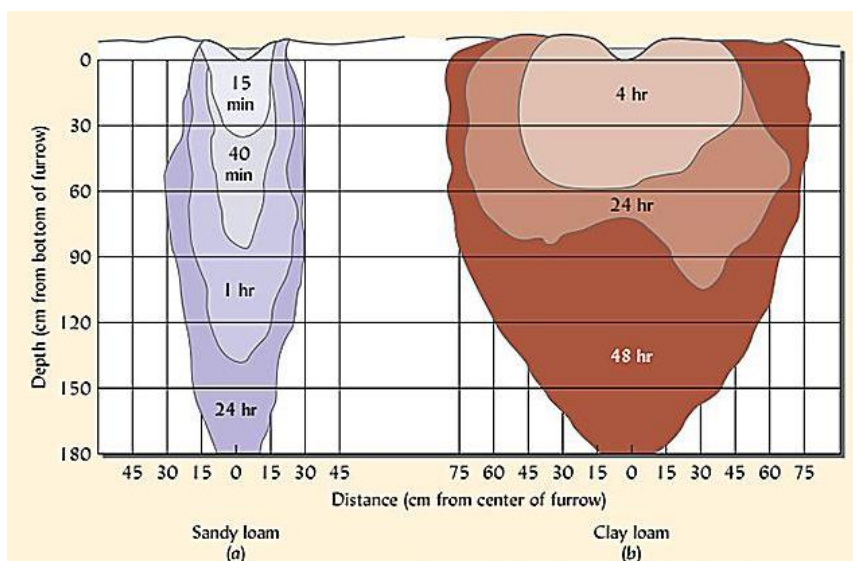


## 5.5. CONTINGUT D'AIGUA AL SÒL

Respecte a les sondes de contingut d'aigua en el sòl, cal remarcar que en funció del lloc on estiguessin (camí o canal), la capacitat i forma d'infiltració van ser diferents. Per simplificar les anàlisis obtingudes de la Taula 3 sobre la classe textural del sòl, es va definir que: a) la zona del canal s'aproximava a un sòl argilós; b) la zona del camí s'aproximava a un sòl sorrenc. En el cas de sòls argilosos, el moviment lateral de l'aigua és major que el vertical, mentre que en sòls sorrencs l'aigua infiltra a més profunditat i poc lateralment (Boman *et al.*, 2002). La representació de les dades de l'assaig realitzat s'adapten bastant a les del treball de Boman *et al.* (2002; 2016; Figura 37).

Les Figures 30 i 32 de l'apartat de Resultats reflecteixen com va ser la infiltració en terrenys on la zona és argilosa. S'observa com en els primers 20 cm, les fluctuacions del contingut volumètric d'aigua en el sòl van ser molt més marcades que a la resta de profunditat, on la variació del contingut volumètric d'aigua va ser 3 vegades més baixa (25 i 55 cm) o gairebé nul·la als 35 i 45 cm. Així doncs, es confirma que la infiltració en terrenys argilosos té menys verticalitat (Figura 37b).

D'altra banda, les Figures 31 i 33 reflecteixen com va ser la infiltració en els terrenys sorrencs. Es va observar que va haver variacions notables del contingut volumètric d'aigua en totes les profunditats. Així doncs, es confirma que la infiltració en terrenys sorrencs és en profunditat (Figura 37a).



**FIGURA 37:** Representació de la infiltració de l'aigua de reg en dos classes texturals de sòls diferents; a) sorrenc; b) argilós.  
FONT: Boman *et al.* (2002)

En les Figures 28-31 a partir de 100 DAS s'observa com les sondes presenten pics i augments en el contingut d'aigua en el sòl. Aquest fenomen va ser a causa de les pluges.

## 5.6. DOSI REQUERIDA

El valor de DR obtingut amb les sondes va presentar una clara disminució a mesura que s'efectuaven els regs, ja que el sòl acumulava una reserva d'aigua i per tant el valor de DR era menor en els regs següents. En contra, el valor de la DR a partir del càlcul de l'ETc va presentar una tendència inversa, on el valor de la DR va augmentar al llarg de la campanya (Taula 11). Aquest efecte era a causa que la

planta va augmentant el seu desenvolupament i metabolisme i, per tant, segueix requerint necessitats hídriques superiors (Hatfield i Pruegger, 2015). Remarcar que el valor de la DR varia en funció de la freqüència en què s'efectuen els regs, és a dir, quan més freqüents siguin els regs, la DR a aplicar serà menor.

## 5.7. FRONT D'AVANÇ

No es va poder obtenir cap valoració tècnica vàlida pels sensors SFS, ja que les dades recollides no van aportar cap informació real i interpretable. A més a més de la impossibilitat tècnica per interpretar aquestes dades, no es coneixia amb total certesa el punt de referència que utilitza aquest aparell per prendre les mesures.

En el cas de la Figura 32, l'evolució de la infiltració de l'aigua va mostrar un comportament que es podria donar com a vàlid, ja que la forma que seguia era molt semblant al que exposa el treball de Ladino *et al.* (2021). Però com no es coneixia el punt de referència dels sensors SFS, les dades obtingudes no es van poder considerar com a vàlides ni aportaven informació rellevant.

En canvi, en les Figures 33 i 34, l'evolució de la infiltració de l'aigua no va seguir el model esperat, ja que la velocitat de recés va ser molt elevada.

## 5.8. SIMULACIÓ DEL REG PER SUPERFÍCIE

### 5.8.1. DETERMINACIÓ DELS ÍNDEXS D'EFICIÈNCIA DE REG OBTINGUTS EN ELS ASSAJOS A CAMP

Respecte a la parcel·la AUT s'observa com les eficiències van variar molt en funció del reg realitzat. En el reg 1 de la BAY-1 (Taula 13), el cabal utilitzat va ser molt gran i com a conseqüència les eficiències en el seu conjunt no van ser les més equilibrades en relació a la resta de regs practicats. En efecte, tot i obtenir una eficiència de requeriment del 100%, l'eficiència d'aplicació va ser millorable i la percolació profunda excessivament elevada. A l'aportar grans volums d'aigua de reg, es satisfan totes les necessitats de la planta, però com a conseqüència hi ha molta aigua que no utilitza la planta i es perd per percolació profunda, ja que no hi havia escorrentiu en ser un reg amb el final del solc tancat.

La solució no és aportar menys volum d'aigua, perquè el reg 3 de la BAY-1 (Taula 13), va aportar un 14% menys de volum d'aigua i les eficiències d'aplicació i pèrdues per percolació profunda van ser molt més bones. Com a conseqüència es va obtenir una RE va molt més baixa, ja que no es va arribar al nivell 100 mm de la dosi requerida. El reg que va presentar els millors valors d'eficiència va ser el reg 6 de la BAY-1 (Taula 13), ja que el balanç entre AE, RE i DP va ser equilibrat. Per tant, si es volen obtenir unes bones eficiències, el maneig del cabal i del temps de tall és clau; cal no obsessionar-se a obtenir el valor de RE del 100%, ja que després es penalitza molt l'AE i la DP.

Comparant els valors obtinguts en el reg 1 entre la parcel·la AUT de la BAY-1 i BAY-2 es van observar com per un Tco similar i variant el cabal de consigna 0,7 l/s, els valors d'eficiència poden variar molt, de forma que passi d'un reg amb valors d'eficiències mitjanes (BAY 1, Taula 13), a un amb eficiències molt bones (BAY 2, Taula 14).

Pel que fa a la parcel·la AG, les dosis utilitzades van ser molt altes (varien entre 120 mm i 232 mm), ja que hi ha alguns casos que gairebé van arribar a duplicar la dosi de la zona AUT (Taulas 13-14-15). Un exemple va ser el cas del reg 1, on la parcel·la AG va utilitzar un 50% més d'aigua. Probablement aquest fet va ser degut a que l'agricultor minimitzava la mà d'obra enlloc del volum d'aigua de reg, ja que econòmicament li era una opció més rendible. L'agricultor no pagava pel volum d'aigua utilitzat a la Comunitat de Regants, sinó per unitat de superfície regable, és a dir, una quota fixe que era independent del volum d'aigua aplicat. En tots els casos, s'observa com la RE va ser gairebé del 100%, però com a conseqüència els valors d'AE i DP van ser molt dolents (Taula 15).

El balanç final de les necessitats hídriques del cultiu i les aportacions realitzades va tenir un valor positiu, ja que l'evapotranspiració del conreu estimada va ser de 100 mm, mentre que la de reg aplicada al llarg de la campanya a la parcel·la AUT va ser al voltant de 88 – 136 mm. L'aigua que estava en excés no era aprofitada per la planta, sinó que s'infiltrava per percolació profunda i era utilitzada per reomplir els aqüífers.

Tot i que a la parcel·la AUT es va utilitzar menys aigua per regar, la producció de la parcel·la va ser un 3% superior a la parcel·la AG. Per tant, es pot afirmar que hi va haver un estalvi d'aigua amb el nou sistema utilitzat, sense cap penalització en la producció. Comparant el projecte pilot realitzat durant la campanya 2021 (Duran-Ros *et al.*, 2021), s'observa com utilitzant un sistema amb els mateixos aparells automatitzats, es van obtenir produccions un 5% superiors que en aquest assaig, amb uns 10.291 kg/ha.

En la parcel·la AUT es va obtenir un millor ajust en l'aplicació de l'aigua de reg en comparació a la parcel·la AG. Això es degut al criteri utilitzat a la parcel·la AUT, on la dosi de reg aplicada es va ajustar més a les necessitats del cultiu (Taula 16). S'ha obtingut que la relació entre la dosi d'aigua de reg aplicada respecte la necessitat del cultiu a la parcel·la AG l'ajust va perdre valor de 1,71, mentre que a la parcel·la AUT es va ajustar molt més a les necessitats del cultiu, amb valor d'1,13.

Com a referència i per la parcel·la AUT, Duran-Ros *et al.* (2021) va aplicar un volum d'aigua de 4.163 m<sup>3</sup>/ha, un 39% inferior al del treball presentat (de 6.809 m<sup>3</sup>/ha). Així doncs, la productivitat de l'aigua va ser de 2,47 kg/m<sup>3</sup>, un 41% millor que els valors obtinguts en aquest treball presentat (de 1,44 kg/m<sup>3</sup>). Aquesta gran diferència entre les productivitats de l'aigua poden ser degudes a causa de: a) variacions meteorològiques observades entre el 2021 i 2022; b) diferències en la qualitat del sòl, així com els nutrients i la classe textural del sòl (Foley *et al.*, 2020); c) varietat sembrada; d) maneig agronòmic.

Malgrat aquestes diferències amb el projecte de Duran-Ros *et al.* (2021), encara hi ha marge de millora en el treball presentat. En el cas d'utilitzar el cabal òptim de 1,2 l/s i temps de tall òptim de 4h 15', el volum d'aigua aplicat seria de 5.604 m<sup>3</sup>/ha (Taula 21) i la productivitat de l'aigua augmentaria un 21%, fins els 1,74 kg/m<sup>3</sup>.

Les productivitats de l'aigua en les parcel·les AG i AUT es troben dintre del rang que varen trobar Zwart i Bastiaanssen (2004) en una revisió de dades publicades en blat de moro per grà al llarg de tot el món (0,22-3,49 kg/m<sup>3</sup>) i també en el rang de valors trobat per Foley *et al.* (2020) en un metanàlisi de 10 anys en 43 assajos de recerca en 13 països del món i 4 continents (0,65-3,09 kg/m<sup>3</sup>). Segons Foley *et al.* (2020), una productivitat de l'aigua inferior a 1,25 kg/m<sup>3</sup> és considerada baixa, mentre que valors de 1,25 fins a 1,75 kg/m<sup>3</sup> és mitjà, així doncs, la productivitat assolida en la parcel·la AUT seria de nivell mig i en la parcel·la AG baix.

## 5.8.2. DETERMINACIÓ DELS PARÀMETRES DE REG ÒPTIMS, CABAL I TEMPS DE TALL

Un cop obtinguda la funció d'infiltració del sòl i verificada per tots els escenaris de l'assaig, es va obtenir que el valor de RMSE va estar inferior als 20 minuts en el 60% dels casos (Taula 17).

S'observa que en el solc 2 (Q2) sempre es va superar el llindar RMSE proposat (20 min), el que indica que les característiques del solc 2 van ser peculiars. Com les condicions de cabal per la rega 2 van ser més baixes en relació a la resta de regues (Taula 8), es pot afirmar que comporten una baixa eficiència en la distribució (com s'ha comentat en l'apartat de resultats 4.2.). D'aquesta forma, es pot dir que les dades del solc 2 van ser atípiques i que no són vàlides per ser modelades amb la funció d'infiltració STD\_1. Eliminant els cinc escenaris del solc 2, la funció STD\_1 guanya en efectivitat i s'accepta més del 85% dels escenaris de l'assaig.

El criteri seguit es basava en l'optimització del Tco per obtenir els millors valors de les eficiències (Taula 19). S'observa que per a cabals baixos, la dosi aplicada va ser gairebé un 30% més gran que per a cabals alts. En aplicar un cabal tan baix, la velocitat d'avançament va ser molt baixa i, per tant, el temps necessari per arribar al final del solc va ser major. Quan les velocitats d'avanç van ser lentes hi havia més infiltració en el sòl i l'eficiència de requeriment obtinguda en el treball va ser molt pròxima al 100%, però a l'aplicar molt més volum d'aigua, l'eficiència d'aplicació va ser del 78% i la percolació profunda del 22%.

D'altra banda, per a cabals alts succeeix el fenomen invers. És a dir, quan el cabal era alt, la velocitat d'avanç era ràpida i, per tant, la infiltració era menor. Per això els valors d'AE van ser del 100% i la DP del 0%, ja que tota l'aigua aplicada va ser utilitzada pel cultiu. En contra, a l'aplicar una làmina d'aigua tan justa, hi ha moments en què la dosi requerida del cultiu no es cobria i per això la RE va ser del 89%.

El rang de cabals òptims proposats varia entre 0,5 l/s i 1,8 l/s (Taula 19). D'aquesta forma l'agricultor pot seleccionar el cabal que més li convingui en funció de la disponibilitat d'aigua i sempre mantenint els màxims índexs d'eficiències en el reg.

Si s'haguessin d'escollir les condicions de reg, sense cap restricció de temps de reg o dosi d'aigua, les més eficients es troben dins de l'interval 1,0-1,3 l/s, on el balanç de les eficiències està més equilibrat. Utilitzant el criteri d'optimització dels paràmetres de cabal i temps de tall, permet reduir la dosi de reg aplicada un 21%, i per tant, millorar la productivitat de l'aigua fins els 1,74 kg/m<sup>3</sup>, on segons Foley *et al.* (2020) es consideraria una producció mitja-alta.

## 5.9. DISCUSIÓ ECONÒMICA

Malgrat la parcel·la AUT hagi tingut una major producció i més estalvi en la mà d'obra i en l'aigua de reg utilitzada envers l'AG, els costos de l'automatització van ser molt elevats i van fer que els beneficis seguessin negatius (Taula 21).

Aquesta diferència tan significativa van ser a causa del material que necessita la parcel·la AUT, amb unes característiques tecnològiques d'última generació i obres a realitzar per la seva instal·lació que encareixen molt el preu. Per altra banda, cal remarcar que la vida útil d'aquestes instal·lacions és molt més llarga en comparació als materials utilitzats en la parcel·la AG.

Per començar a ser rendible la implementació del sistema automàtic en la parcel·la de camp (1 ha) caldrien 17.500 kg/ha, produccions que són inviàbles i irrealistes a Catalunya. En la parcel·la hipotètica de

5 ha i mantenint la producció obtinguda de 9.876 kg/ha, les pèrdues van comportar una reducció lleugerament superior al 75%, passant dels -2.367,59 €/ha als -571,55 €/ha; tot i així, no seria rendible la utilització d'aquest sistema automàtic amb les condicions de partida de 5 ha. Però en aquesta parcel·la hipotètica de 5 ha, si les produccions fossin superiors als 11.500 kg/ha (valor acceptable i poc desorbitat de la realitat), llavors el sistema automàtic començaria a ser rendible. Amb les produccions de la campanya 2022, encara que s'ampliï la superfície de la parcel·la hipotètica, en cap moment els ingressos serien superiors a les despeses, per tant, no seria rendible la implementació del sistema de reg automàtic.

Cal remarcar que la campanya del 2022 va ser atípica, ja que segons els agricultors de la zona, la producció va ser un 10-25% inferior a la dels anys anteriors (F. Brunsó, *comunicació personal*, 2022). Així doncs, en condicions meteorològiques normals: I) la parcel·la d'1 ha mai serà rendible econòmicament; II) en el cas de la parcel·la hipotètica (5 ha) i un augment de les produccions del 18%, comportaria que el desenvolupament d'aquest sistema automatitzat comencés a ser rendible.

Com a possible millora per reduir les despeses caldria estimar les dimensions dels elements del sistema de manera més acurada, ja que en l'assaig que s'ha fet es van sobredimensionar. Per exemple caldria reduir l'allargada del "pontoon", ja que unes dimensions d'amplada pròximes a 2-3 m serien suficients, quan en l'assaig han estat de 15 m.

Els resultats de l'avaluació econòmica coincideixen amb els obtinguts per Koech *et al.* (2014a) i Masseroni *et al.* (2017), quan utilitzant el sistema de reg automatitzat hi ha una reducció del nombre d'hores dedicades a la mà d'obra per la gestió del reg. En el cas de la parcel·la experimental d'1 ha, la parcel·la AUT va utilitzar un 30% menys de mà d'obra que la parcel·la AG. Mentre que en la parcel·la hipotètica de 5 ha, en l'AUT hi havia una reducció del 57% de mà d'obra envers a l'AG.

## 6. APLICABILITAT

Espanya representa la superfície més gran de regadius d'Europa, amb un valor de 3,8 Mha, on el sistema de reg per gravetat sols representa el 23% (ESYRCE, 2021). El nivell de sofisticació del sistema de reg per superfície s'està modernitzant perquè pugui ser competitiu amb altres sistemes de reg, com el reg localitzat d'alta freqüència i el reg per aspersió. Actualment, Austràlia és el país on hi ha més desenvolupament i recerca del sistema de reg per superfície automatitzat (Koech *et al.*, 2014a; Koech *et al.*, 2014b; Uddin *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2018). A nivell europeu, l'únic treball on s'exposa l'experiència amb un sistema de gestió del reg automatitzat és el de Masseroni *et al.* (2017), però el grau de sofisticació no va ser tan complex ni ambiciós com la prova pilot realitzada en el projecte presentat.

Cal recordar que la sofisticació dels altres sistemes de reg (localitzat d'alta freqüència i per aspersió) és molt més elevada que el reg per superfície, ja que ja hi ha instal·lacions comercials que permeten la gestió integral del reg de forma remota i amb costos econòmics molt assequibles. Per contra, encara falta molta experiència en el sistema per gravetat i el seu desenvolupament tecnològic tot just està començant. Actualment, a Europa no hi ha cap empresa que comercialitzi a nivell estàndard i l'empresa més reconeguda és RubiconWater (Melbourne, Austràlia).

Tots els aparells utilitzats en el projecte conformen un ecosistema d'escala reduïda, ja que únicament es rega per una parcel·la d'1 ha. Com s'ha demostrat en l'avaluació econòmica, els aparells (pedestal, Pikometer, estació climàtica, Quarterturn) i les actuacions requerides per la seva instal·lació es poden agrupar i englobar per un grup de parcel·les, el que permetria fer una gestió de l'aigua a nivell de parcel·la més rendible econòmicament.

En els últims anys, i especialment durant 2022, s'han patit situacions de sequera significatives, on les temperatures van ser superiors i les precipitacions inferiors de les mitjanes. La pròxima campanya (2023) està fortament condicionada i penalitzada per les condicions de sequera. És fonamental que la gestió de la distribució i maneig de l'aigua de reg es faci el màxim d'eficient. Per tant, una de les possibles solucions és la utilització d'aquestes comportes i sistemes automatitzats que s'han utilitzat en el projecte.

Relacionat amb la sequera actual, una possible solució per reduir les pèrdues d'aigua és regar quan la radiació solar és mínima. L'automatització del sistema de reg permet una plena disponibilitat de temps, sempre i quan no hi hagi restriccions a l'hora de captar l'aigua. Per contra, l'agricultor ha de regar durant el dia, ja que és quan té disponibilitat per realitzar aquesta tasca, però en el cas d'utilitzar el sistema automatitzat, es pot realitzar sense la presència dels treballadors a camp. Això permet que les hores de reg siguin molt variades i que es pugui fer als moments de més baixa radiació solar i així reduir les pèrdues per evaporació.

A l'hora de gestionar el reg del blat de moro en una comunitat de regants com la de Sant Jordi és molt complicat, ja que tots els agricultors requereixen d'aigua per regar i en instants de temps molt propers, de manera que a vegades hi ha solapament entre ells. Com a conseqüència, l'agricultor que estigui situat aigües amunt és el que regarà abans. Com a possible solució hi ha la vàlvula Quarterturn, el qual permet gestionar els temps de reg distribuint l'aigua cap a les diferents parcel·les d'agricultors. D'aquesta manera, tots tindrien els temps de reg pautats i sense possibilitat de sabotatge entre regants.

Finalment es pot resumir que aquest sistema de reg automatitzat pot ser molt útil, tant a la Comunitat de Regants del Baix Ter o com en d'altres, ja que a més de poder assolir eficiències de requeriment i

aplicació molt bones, amb el consegüent estalvi d'aigua, permet una gestió integral del reg de forma remota.

Econòmicament, s'ha observat com la implementació del sistema representa un cost inicial molt elevat i pocs agricultors ho podrien instal·lar. Per solvatar aquest inconvenient, una solució seria que des de l'administració es poguessin gestionar subvencions i ajuts per motivar la implementació d'aquest sistema. Actualment existeixen subvencions que arriben a cobrir el 50% de la instal·lació però per altres sistemes de reg, com són el reg per aspersió i reg localitzat d'alta freqüència.

Cal remarcar que al ser una tecnologia molt innovadora, els aparells utilitzats tenen preus molt elevats. A mesura que es desenvolupi i s'investigui més en el sistema de reg per superfície, els costos de tota la infraestructura del reg per superfície automatitzat s'aniran reduint, tal com va succeir amb els altres sistemes de reg (reg a pressió i reg localitzat d'alta freqüència), on els costos eren molt elevats en els seus inicis i a mesura que es van anar desenvolupant, aquests van ser molt més econòmics i accessibles.

## 7. CONCLUSIONS

Les conclusions que s'han assolit amb el treball han sigut en relació a:

### A. El desenvolupament del cultiu

1. Entre els dos sistemes de maneig del reg avaluats, l'automàtic (AUT) i el practicat per l'agricultor (AG), no es van observar diferències en l'evolució del cultiu, ni en la forma del solc. Cal destacar que en relació a campanyes anteriors, s'ha observat com l'evolució del cultiu ha estat més ràpida degut a l'augment de la temperatura en l'any 2022.
2. La producció de biomassa en matèria fresca en la parcel·la AUT va ser un 29% superior al de la parcel·la AG, mentre que la producció de gra en matèria seca va ser indiferent del sistema de gestió del reg utilitzat.

### B. La hidrologia del reg

3. Els cabals entre regues van presentar una baixa homogeneïtat, amb coeficients de variació entre el 24 i el 35%. Aquesta variació entre el cabal de sortida de cada rega estaria associada a la diferència de cotes entre regues, de manera que amb un cabal baix s'afavoria les regues que estaven en una cota més baixa i es penalitzava les que estaven en cotes més altes.
4. Es va constatar que un cabal alt en el primer reg (2,50 L/s) va provocar una gran erosió en els inicis de la rega i deposició del material al tram final, variant la geometria del solc al llarg de la temporada de reg. Per aquest motiu, seria interessant realitzar un anàlisi de sensibilitat per avaluar com afecta la forma del solc en els resultats de les simulacions.
5. El temps d'avanç es va veure afectat de manera significativa pel cabal i la forma en que es va entregar. Per a cabals alts i entrega constant, la velocitat d'avanç va ser superior que per a cabals baixos i entrega variable, assolint-se una diferència màxima de 3 hores en el temps d'avançament.
6. Les corbes d'avançament es van ajustar molt bé a una equació polinòmica de segon grau sense terme independent, presentant coeficients de determinació entre 0,74 i 0,98.
7. La dosi de reg requerida determinada en base a la evapotranspiració del cultiu va diferir de la calculada d'acord amb les dades mesurades per les sondes de contingut d'aigua al sòl. Tenint en compte que la diferència entre les sondes de tipus 1 i tipus 2 va ser del 22%, es recomana utilitzar la sonda tipus 2. La dosi de reg bruta més elevada va resultar ser de 100 mm/reg, assumint una eficiència d'aplicació del 80%.
8. La funció d'infiltració escollida com a representativa del sòl i utilitzada en les simulacions, després d'efectuar diverses validacions va ser:  $z=77,174 \cdot t^{0,25}+0,24 \cdot t$ , (Z, aigua infiltrada acumulada, mm; t, temps d'oportunitat, h).

### C. Els índexs d'eficiència de reg i la productivitat de l'aigua

9. En la gestió del reg efectuada per l'agricultor (AG) l'eficiència d'aplicació mitjana va resultar ser del 74% i les pèrdues per percolació del 27%. L'eficiència de requeriment va estar propera al 100%, però l'aigua aplicada (10.268m<sup>3</sup>/ha) va ser un 50% superior a l'emprada en la gestió automatitzada (AUT).



10. En la gestió AUT l'eficiència de requeriment mitjana va ser del 95% i el volum d'aigua utilitzat (6.809 m<sup>3</sup>/ha) va suposar un estalvi d'aigua d'1/3 de l'emprada per l'agricultor (AG). A més, l'eficiència d'aplicació mitjana va ser del 90% i la percolació profunda mitjana de l'11%. En conseqüència els índexs de qualitat del reg van ser molts superiors en el cas AUT respecte AG, i a més, la ma d'obra dedicada al reg en AUT va ser el 30% inferior a AG.

11. La productivitat de l'aigua de reg en AUT (1,44 kg/m<sup>3</sup>) va ser un 56 % superior a la obtinguda en AG (0,92 kg/m<sup>3</sup>).

12. L'optimització dels índexs de qualitat del reg mitjançant l'aplicació del codi WinSRFR va mostrar que els millors resultats s'obtenien amb cabals entre 1,0 i 1,3 L/s i temps de tall entre 5h 10' i 3h 45' respectivament, assolint-se amb aquestes pautes de reg unes eficiències d'aplicació i requeriment del 94-96% i del 95-96% respectivament, amb pèrdues per percolació profunda del 7-4%.

13. Els resultats obtinguts demostren que el reg per superfície es eficient si es maneja de manera adequada, inclús de forma convencional, i que els resultats milloren en la seva automatització.

#### D. L'economia del reg

14. La viabilitat econòmica del sistema AUT en la parcel·la d'assaig ha estat negativa, estimant-se que la inversió seria econòmicament viable a partir de 5 ha i amb produccions superiors als 11.500 kg/ha.

#### E. La viabilitat del reg per superfície automatitzat

15. L'objectiu d'aconseguir un reg totalment automatitzat (FarmConnect, Rubicon) no s'ha pogut assolir. La causa ha estat deguda a que és un sistema nou a Europa i no s'ha aconseguit posar encara a punt, bàsicament per a) incompatibilitat dels protocols de comunicació australians amb els europeus, b) el funcionament i el software del sensor de front d'avançament, c) la qualitat de les dades proporcionades per l'estació climàtica i d) la manca d'un software de comunicació entre els sensors de contingut d'aigua al sòl i el sistema d'accionament de les vàlvules d'entrada d'aigua. El treball portat a terme ha ajudat de manera notable a la millora del sistema.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- ACA (Agencia Catalana de l'Aigua). (2006). Pla per a l'eficiència en l'ús de l'aigua per a reg agrícola. *DMAH (Departament del Medi Ambient i Habitatge)*.  
[https://ruralcat.gencat.cat/migracio\\_resources/642447\\_presentacio.pdf](https://ruralcat.gencat.cat/migracio_resources/642447_presentacio.pdf)
- Alejo, L.A. i Espino, A.N. (2020). Evaluation of the SIRMOD model for optimum furrow irrigation performance. *Agricultural Water Management: The CIGR e-journal*, 22(1), 30-39.  
[https://www.researchgate.net/publication/339999382\\_Evaluation\\_of\\_the\\_SIRMOD\\_model\\_for\\_optimum\\_furrow\\_irrigation\\_performance](https://www.researchgate.net/publication/339999382_Evaluation_of_the_SIRMOD_model_for_optimum_furrow_irrigation_performance)
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. i Smith, M. (2001). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO Riego y drenajes 56. Roma. 322 pp.  
<https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Arbat, G., Puig-Bargués, J., Duran-Ros, M., Barragán, J. i Ramírez de Cartagena, F. (2011). Irrigation performance and gross water productivity in furrow-irrigated ornamental tree production. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(2), 627-640. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110902-274-10>
- Barroso, F.R., Ortega, J.F. i Ballesteros, R. (2016). Caracterización del crecimiento y desarrollo del maíz en condiciones de no laboreo en la Mancha oriental. *XXXIX Congreso Nacional de Riegos, Sevilla*.  
<http://dx.doi.org/10.21151/CNRiegos.2016.A12>
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S. i Schlegel, J. (2009). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96, 1146-1154.  
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.007>
- Bautista, E. i Schlegel, J. (2017). A flexible System for estimation of infiltration and hydraulic resistance paràmetres in surface irrigation. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 60(4), 1223-1234. <https://doi.org/10.13031/trans.12117>
- Bautista, E. i Schlegel, J. (2019). *WinSRFR 5.1 User Manual*. USDA-Agricultural Reserch Service  
<https://data.nal.usda.gov/system/files/WinSRFR5.pdf>
- Boman, B., Parsons, L., Obreza, T.A. i Stover, E. (2002). Citrus water use and irrigation scheduling. Dins B.J. Boman (Ed.), *Water and Florida Citrus* (capítol 17, p. 175-191). Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville (Florida, EUA).  
[https://www.researchgate.net/publication/268053359\\_Chapter\\_17\\_Citrus\\_Water\\_Use\\_and\\_Irrigation\\_Scheduling](https://www.researchgate.net/publication/268053359_Chapter_17_Citrus_Water_Use_and_Irrigation_Scheduling)
- Camacho, E., Montesinos P. i Rodríguez J.A. (2017). Ahorro de agua y consumo de energía en la modernización de regadius. Capítulo en *Efectos de la modernización de regadius en España*, Berbel J i Gutierrez-Martín (Coord.) Cajamar Serie Economía, No. 30.
- Corominas J. (2009). Agua y energía en el riego, en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua*, 17(3), 219-233. <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2977>
- Corteva Agriscience. (2023). Maíz 2023.  
[https://www.corteva.es/content/dam/dpagco/corteva/eu/es/es/files/otros-documentos/DOC-Catalogo-Maiz-2023-Pioneer\\_EU\\_ES.pdf](https://www.corteva.es/content/dam/dpagco/corteva/eu/es/es/files/otros-documentos/DOC-Catalogo-Maiz-2023-Pioneer_EU_ES.pdf)
- DACC (Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural). (2021). Superfícies i produccions dels conreus agrícoles. <https://agricultura.gencat.cat/ca/departament/estadistiques/agricultura/estadistiques-definitives-conreus/>

- DARP (Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca). (2012). El regadiu a Catalunya. [http://icea.llocs.iec.cat/wp-content/uploads/sites/4/2013/01/El-regadiu-a-Catalunya-DES\\_2012-1-1.pdf](http://icea.llocs.iec.cat/wp-content/uploads/sites/4/2013/01/El-regadiu-a-Catalunya-DES_2012-1-1.pdf)
- Datosmacro. (Desembre 2022). Precio de la electricidad de los hogares. <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/electricidad-precio-hogares/espana>
- Doorenbos, J. i Pruitt, W.O. (1976). *Las necesidades de agua de los cultivos*. Estudio FAO, Riego y Drenaje. Roma. Volum 24, 194 pp.
- Duran-Ros, M., Cufí, S., Arbat, G., Pujol, J., Pinsach, J., Puig-Bargués, J. i Ramírez de Cartagena, F. (22 d'octubre de 2021). Control automàtic de canals i dels reg per superfície. Jornada de camp, Cervià de Ter.
- Elliot, R.L. i Walker, W.R. (1982). Field evaluation of furrow infiltration advance functions. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 25(2), 396-400. <https://doi.org/10.13031/2013.33542?sid=semanticscholar>
- EUROPARL. (2021). Estadísticas sobre la agricultura de la UE: ayudas, empleo y producción. <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20211118STO17609/estadisticas-sobre-la-agricultura-de-la-ue-ayudas-empleo-produccion>
- Foley, D. F., Thenkabail, P. S., Aneece, I. P., Teluguntla, P. G. i Oliphant, A. J. (2020) A meta-analysis of global crop water productivity of three leading world crops (wheat, corn, and rice) in the irrigated areas over three dècades. *International Journal of Digital Earth*, 13(8), 939-975. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1651912>
- Fundación Aqueae. (2022). Tipos de sistema de riego y sus características. <https://www.fundacionaqueae.org/wiki/tipos-de-riego/>
- GEROCA. (s.d.). Evaluación de la eficiencia de riego y de la uniformidad de distribución para distintos métodos de riego. <https://geroca.ias.csic.es/evaluacion.html>
- Gillies, M.H. i Smith, R.J. (2005). Infiltration parameters from surface irrigation advance and run-off data. *Irrigation Science*, 24, 25-35. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00271-005-0004-x.pdf>
- Gillies, M.H. i Smith, R.J. (2015). SISCO: surface irrigation simulation, calibration and optimisation. *Irrigation Science*, 33, 339-355. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00271-015-0470-8.pdf>
- GM Poly. (2013). Aquator. <https://www.gmpoly.com.au/>
- Hatfield, J.L. i Prueger, J.H. (2015). Temperature extremes: Effect on plant growth and development. *Weather and Climate Extremes*, 10(A), 4-10. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.08.001>
- Koech, R.K., Smith, R.J. i Gillies, M.H. (2014a). A real-time optimisation System for Automation of furrow irrigation. *Irrigation Science*, 32, 319-327. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00271-014-0432-6>
- Koech, R.K., Smith, R.J. i Gillies, M.H. (2014b). Evaluation the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 142, 77-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.020>
- Ladino, G.S., Delgado, T.E. i Arias, N.A. (13 de setembre de 2021). Evaluación de sistemas de riego por superficie y aspersión en cultivos de palma de aceite. *Centro de Información y Documentación Palmero (Colòmbia)*. <http://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/141294>
- Lancashire, P.D., Bleiholder, H., van den Boom, T., Langeluddecke, P., Stauss, R., Weber, E. i Witzemberger, A. (1991). An uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* 119, 561-601. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x>

- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (2010). Estadística de maíz grano. <https://www.mapa.gob.es/app/materialvegetal/fichamaterialvegetal.aspx?idficha=1180>
- MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). (2022). Encuesta sobre superficies y rendimientos de Cultivos en España (ESYRCE). [https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/regadios2022\\_tcm30-655313.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/regadios2022_tcm30-655313.pdf)
- Masseroni, D., Uddin, J., Tyrrell, R., Mareels, I., Gandolfi, C. i Facchi, A. (2017). Towards a smart automated surface irrigation management in rice unit growing in Italy. *Journal of Agricultural Engineering*, 48, 42-48. <https://doi.org/10.4081/jae.2017.585>
- Mateos, L. (2020) El regadío y el paisaje. p. 27-34. [https://digital.csic.es/bitstream/10261/237780/4/Regadio\\_Riego\\_Paisaje\\_Mateos.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/237780/4/Regadio_Riego_Paisaje_Mateos.pdf)
- Mehri, A., Mohammadi, A.S., Ebrahimian, H. i Boroomandnasab, S. (2023). Evaluation and optimization of surge and alternate furrow irrigation performance in maize fields using the WinSRFR software. *Agricultural Water Management*, 276, 10 pp. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108052>
- Monge, M.A. (24 de abril de 2017). Interpretación de un análisis de agua para riego. <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/interpretacion-analisis-agua-riego>
- Noriega, L.A., Preciado, R.E., Andrio, E., Terrón, A.D. i Covarrubias, J. (2011). Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(4), 489-500. <https://www.scielo.org.mx/pdf/remexca/v2n4/v2n4a2.pdf>
- OFTDR (Oficina de fertilització i tractaments de dejeccions ramaderes). (2019). Taula d'extraccions de nutrients en cultius extensius. *DARP (Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca)*. [https://ruralcat.gencat.cat/documents/20181/6865666/Extraccions\\_EXTENSIUS.pdf/b8cbc9e6-4b51-4856-806d-012869592367](https://ruralcat.gencat.cat/documents/20181/6865666/Extraccions_EXTENSIUS.pdf/b8cbc9e6-4b51-4856-806d-012869592367)
- OGTR (Department of Health and Ageing Office of the Gene Technology Regulator). (Septembre de 2008). *The Biology of Zea mays L. spp mays (maize or corn)*. Australian Government. 81 pp. [https://web.archive.org/web/20170921192958/http://www.health.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/Content/maize-3/\\$FILE/biologymaize08\\_2.pdf](https://web.archive.org/web/20170921192958/http://www.health.gov.au/internet/ogtr/publishing.nsf/Content/maize-3/$FILE/biologymaize08_2.pdf)
- Orús, A. (13 de gener de 2023). Volumen de producción de maíz en grano en España en 2021, por comunidad autónoma <https://es.statista.com/estadisticas/501802/produccion-de-maiz-grano-en-comunidades-autonomas-de-espana/#:~:text=Volumen%20de%20producci%C3%B3n%20de%20ma%C3%ADz%20en%20grano%20en,de%20Murcia%20Canarias%20Asturias%20Islas%20Baleares%20Pa%C3%ADs%20Vasco>
- Planas, L. (21 de juliol de 2022). El regadío sostenible será una de las claves para afrontar los retos del cambio climático en la agricultura. *MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación)*. <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/luis-planas-el-regad%C3%ADo-sostenible-ser%C3%A1-una-de-las-claves-para-afrontar-los-retos-del-cambio-clim%C3%A1tico-en-la-agricultura/tcm:30-624054>
- Plusquelles, H. (2009). Modernization of large-scaling irrigation systems: Is it an achievable objective or a lost cause? *Irrigation and Drainage*, 58(1), 104-120. <https://doi.org/10.1002/ird.488>
- Ramirez de Cartagena, F. (19 de març de 2022). *Capítol 0*. [UdG]. [https://moodle2.udg.edu/pluginfile.php/1687462/mod\\_resource/content/2/Cap%C3%ADtulo%200%20alumnas%20web.pdf](https://moodle2.udg.edu/pluginfile.php/1687462/mod_resource/content/2/Cap%C3%ADtulo%200%20alumnas%20web.pdf)

- Rogers, D.H., Lamm, F.R., Alam, M., Trooien, T.P., Clark, G.A., Barnes, P.L. i Mankin, K. (1997). Efficiencies and water losses of irrigation systems. *Irrigations Management Series*, Kansas State University, MF-2243, 7 pp. [https://www.researchgate.net/publication/246028809\\_EFFICIENCIES\\_AND\\_WATER\\_LOSSES\\_OF\\_IRRIGATION\\_SYSTEMS](https://www.researchgate.net/publication/246028809_EFFICIENCIES_AND_WATER_LOSSES_OF_IRRIGATION_SYSTEMS)
- RubiconWater. (2011). FarmConnect. <https://rubiconwater.com/au/>
- RubiconWater. (2013). Quick Guide: Irrigation Automation Module. 47 pp.
- Saxton, K. i Rawls, W. (2023). (SWC) Soil Water Characteristics Hydraulic Properties Calculator. *USDA-Agricultural Research Service*. <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492>
- SMC (Servei Meteorològic de Catalunya). 2023. Dades agrometeorològiques, Girona. *DACC (Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural)*. <https://ruralcat.gencat.cat/web/guest/agrometeo.estacions>
- Smith, R.J., Raine, S.R. i Minikevich, J. (2005). Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. *Agricultural Water Management*, 71(2), 117-130. <https://ideas.repec.org/a/eee/agiwat/v71y2005i2p117-130.html>
- Smith, R.J., Uddin, M.J. i Gillies, M.H. (2018). Estimating irrigation duration for high performance furrow irrigation on cracking clay soils. *Agricultural Water Management*, 206, 78-85. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.014>
- Soto, F. i Gonzalez, M.I. (2019). Anàlisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana*, 30(2), 517-534. [https://www.mag.go.cr/rev\\_meso/v30n02\\_517.pdf](https://www.mag.go.cr/rev_meso/v30n02_517.pdf)
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., El-Ansary, M. i Awad, M. (1999). Surface-irrigation evaluation models: Application to level basins in Egypt. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 42(4), 1027-1036. <https://doi.org/10.13031/2013.13250>
- Uddin, J., Smith, R. i Gillies, M. (2014). A simple strategy to manage furrow irrigation efficiently. *17th Australian Cotton Conference (ACC 2014): Our Fibre, Our Focus, Our Future*. 05-07 d'agost de 2014. Narrabri, Australia. <https://research.usq.edu.au/item/q2zv0/a-simple-strategy-to-manage-furrow-irrigation-efficiently>
- Villar, P. i Arán, M. (2008). *Guia d'interpretació d'anàlisis de sòls i plantes: Aplicació a la fertilització dels cultius arboris en producció integrada*. DACC (Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural), 80 pp. [https://agricultura.gencat.cat/web/.content/de\\_departament/de10\\_publicacions\\_dar/de10\\_a02\\_04\\_guies/enllacos-documents/fitxers-binari/2008\\_Guia-interpretacio-analisi-sols-plantas.pdf](https://agricultura.gencat.cat/web/.content/de_departament/de10_publicacions_dar/de10_a02_04_guies/enllacos-documents/fitxers-binari/2008_Guia-interpretacio-analisi-sols-plantas.pdf)
- Weber, E. i Bleiholder, H. (1990). Erläuterungen zu den BBCH-Dezimal-Codes für die Entwicklungsstadien von Mais, Raps, Faba-Bohne, Sonnenblume und Erbse - mit Abbildungen (Explicació dels codis decimals BBCH de les etapes de desenvolupament de blat de moro, colza, fava, gira-sol i pèsol amb il·lustracions). *Gesunde Pflanzen*, 42, 308–321. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=6944996>
- Zwart, S.J. i Bastiaanssen, W.G.M. (2004). Review of Measured Crop Water Productivity Values for Irrigated Wheat, Rice, Cotton and Maize. *Agricultural Water Management*, 69, 115-133. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.04.007>

