

Tecnologies digitals de suport al reg: sensors, teledetecció i sistemes de presa de decisions

Jaume Casadesús, Joaquim Bellvert

Programa d'Ús Eficient de l'Aigua en Agricultura, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), Lleida

REBUT: 14 DE DESEMBRE DE 2020 · ACCEPTAT: 5 DE FEBRER DE 2021

RESUM

El reg de precisió consisteix a aplicar el paradigma de l'agricultura de precisió a la dosificació d'aigua de reg, en el sentit d'aportar la quantitat d'aigua adequada, en el moment i lloc adequats. Per a dur-ho a terme, es basa en diverses tecnologies capaces de prendre i processar les dades, a més d'integrar-les amb altres fonts d'informació, per a acabar prenent les decisions oportunes per a la dosificació del reg. Aquest article en revisa l'aproximació general i els avenços més recents. Posa èmfasi en dues vies d'adquisició de dades, complementàries, que transcorren en paral·lel: la mesura de la humitat del sòl amb sensors i el monitoratge del desenvolupament i estat hídric dels cultius per teledetecció. Dins de la teledetecció, l'article repassa breument l'oportunitat que representen les diferents plataformes d'observació, entre les quals hi ha els satèl·lits de la constel·lació Copernicus. Seguidament, el text exposa com aquestes dades es poden integrar amb models de balanç hídric que acaben proporcionant les estimacions de necessitats precises de reg. També

Correspondència: Jaume Casadesús i Joaquim Bellvert. Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) - Parc Científic i Tecnològic Agroalimentari de Lleida, Parc de Gardeny - Edifici Fruitcentre, Lleida. Tel.: 973 032 850. A/e: jaume.casadesus@irta.cat i joaquim.bellvert@irta.cat.

remarca la importància d'emmarcar les dosificacions diàries dins d'una estratègia de conjunt per a tota la campanya de reg. Finalment, l'article apunta les perspectives de futur del reg de precisió en el context tecnològic actual.

PARAULES CLAU: reg, agricultura de precisió, reg de precisió, sensors, teledetecció, digitalització.

Tecnologías digitales de soporte al riego: sensores, teledetección y sistemas de toma de decisiones

RESUMEN

El riego de precisión consiste en aplicar el paradigma de la agricultura de precisión a la dosificación de agua de riego, en el sentido de aportar la cantidad de agua adecuada, en el momento y lugar adecuados. Para llevarlo a cabo, se apoya en varias tecnologías capaces de tomar y procesar datos, además de integrarlos con otras fuentes de información, para acabar adoptando las decisiones oportunas para la dosificación del riego. Este artículo revisa la aproximación general y los avances más recientes. Pone énfasis en dos vías de adquisición de datos, complementarias, que transcurren en paralelo: la medida de la humedad del suelo con sensores y la monitorización del desarrollo y estado hídrico de los cultivos por teledetección. Dentro de la teledetección, el artículo repasa brevemente la oportunidad que representan las diferentes plataformas de observación, entre ellas los satélites de la constelación Copernicus. Seguidamente, el texto expone cómo estos datos se pueden integrar con modelos de balance hídrico que acaban proporcionando las estimaciones de necesidades precisas de riego. También remarca la importancia de enmarcar las dosificaciones diarias dentro de una estrategia de conjunto para toda la campaña de riego. Finalmente, el artículo apunta las perspectivas de futuro del riego de precisión en el contexto tecnológico actual.

PALABRAS CLAVE: riego, agricultura de precisión, riego de precisión, sensores, teledetección, digitalización.

Digital irrigation support technologies: Sensors, remote sensing and decision-making systems

ABSTRACT

Precision irrigation consists of applying the paradigm of precision agriculture to the dosage of irrigation water, in the sense of providing the right amount of water at the right time and place. To do this, it relies on various technologies for data acquisition and processing which can be integrated with other sources of information, allowing appropriate decisions to be made on the dosage of irrigation. This article reviews the general approach to this practice and the most recent advances. It emphasizes two complementary data acquisition technologies that operate in parallel: the measurement of soil moisture with sensors and the monitoring of the development and hydration of crops by remote sensing. We make a brief review of the opportunities provided for remote sensing by different observation platforms, including the Copernicus satellite constellation. Next, we show how the data can be integrated with water balance models to provide estimates of precise irrigation needs. The paper also highlights the importance of framing the daily dosages within an overall strategy for the entire irrigation season. Lastly, it discusses the future prospects of precision irrigation in the current technological context.

KEYWORDS: irrigation, precision agriculture, precision irrigation, sensors, remote sensing, digitalization.

1. Introducció

Aconseguir un ús més productiu de l'aigua a l'agricultura no és una utopia infundada. Les necessitats de reg dels cultius varien d'un cas a un altre per les característiques de la vegetació, per les propietats del sòl, pel sistema de reg i pels objectius productius propis de cada explotació. A més, varien al llarg del temps segons la meteorologia i el desenvolupament del cultiu. Investigacions dutes a terme en les darreres dècades han demostrat que, aplicant estratègies que distribueixen de manera adequada les aportacions d'aigua al llarg de la campanya de reg, es poden mantenir rendiments estables inclús amb disponibilitats d'aigua reduïdes (Ruiz-Sánchez, Domingo i Castel, 2010).

Si bé sobre el paper hi ha força coneixement científicotècnic sobre el tema, a la pràctica les principals limitacions són poder disposar a escala de finca de les habilitats i eines necessàries per a executar, amb poc esforç i de manera metòdica, les tasques requerides

per a aportar la quantitat de reg adequada en el moment i llocs adequats. En aquest context, el reg de precisió, que consisteix en l'aplicació del concepte *agricultura de precisió* a l'àmbit del reg, pot aportar-hi l'aproximació tecnològica. L'*agricultura de precisió* es defineix com una estratègia de gestió que recopila, processa i analitza dades temporals, espacials i individuals, i les combina amb altra informació per a donar suport a les decisions de gestió segons la variabilitat estimada, per tal de millorar l'eficiència en l'ús de recursos, productivitat, qualitat, rendibilitat i sostenibilitat de la producció agrícola (ISPA, 2020). Els darrers desenvolupaments tecnològics en reg de precisió ofereixen grans oportunitats per a reduir l'esclatxa entre la productivitat potencial de l'aigua i el rendiment real de les finques i les conques hidrogràfiques.

Aquest article revisa l'estat actual d'algunes tecnologies que hi ha darrere del reg de precisió. En primer lloc, revisa els reptes i avenços en les dues principals vies, paral·leles, per a la captació sobre el terreny de les dades d'interès en el control del reg. En segon lloc, revisa les aproximacions per a integrar aquestes dades en la presa de decisions de reg i en comenta les perspectives de futur.

2. Monitoratge de la humitat del sòl

L'ús de sensors permet fer un seguiment de com es troba la disponibilitat d'aigua per a les arrels i com evoluciona en el temps en funció del reg aplicat. Si l'aportació d'aigua a la superfície del sòl és prou homogènia, per exemple, per efecte de la pluja, del reg per aspersió o del reg a tesa, a efectes de gestió agronòmica, és assumible que la humitat del sòl canvia només amb la profunditat. En aquests casos, amb uns quants sensors que mesurin a diferents profunditats seria possible obtenir una visió representativa de la dinàmica de l'aigua en la parcel·la. Ara bé, la mesura de la humitat del sòl no sempre és tan fàcil. A la majoria de parcel·les de cultiu, el sòl no és perfectament uniforme sinó que acostuma a haver-hi variabilitat espacial, tant en la fondària del sòl com en les seves propietats fisicoquímiques (Lin *et al.*, 2005). A més, la mobilitat de l'aigua en el sòl cau ràpidament a mesura que el sòl s'asseca, de manera que en un moment donat poden coexistir valors d'humitat bastant diferents a poques desenes de centímetres de distància, tant entre diferents profunditats com també en el pla horitzontal (Domínguez-Niño *et al.*, 2020b). Habitualment, com a efecte dels períodes de pluges, la humitat del sòl tendeix a uniformar-se i, a mesura que el sòl es va assecant, la distribució d'humitat es fa més heterogènia.

L'heterogeneïtat en la distribució d'aigua al sòl és especialment rellevant en el cas del reg per degoteig, en què l'aigua es distribueix a partir dels emissors formant en el sòl el que es coneix com a *bulbs humits* (Kilic, 2020). La forma i mida dels bulbs humits depenen de les propietats físiques del sòl, del cabal dels degoters i de les dosis de reg que s'es-

tiguin aplicant (Arbat *et al.*, 2013). Per això, segons la ubicació d'un sensor respecte dels bulbs humits, els valors que mesuri poden ser molt diferents. Idealment, doncs, per a estimar el volum total d'aigua que hi ha en un sòl regat per degoteig, caldria mesurar-ne la humitat a diferents profunditats i, alhora, a diferents posicions respecte del sistema de reg i de les plantes. Com que això seria massa costós i poc pràctic, és necessari escollir uns quants punts de mesura, a profunditats i posicions predeterminades, tenint en compte la ubicació dels emissors de reg i el patró de distribució d'arrels (Soulis, Elmaloglou i Der-cas, 2015). De tota manera, encara que s'instal·lin metòdicament els sensors, s'acostuma a observar variabilitat entre sensors instal·lats en les mateixes coordenades relatives als emissors i a la fondària (Domínguez-Niño *et al.*, 2020b). Una explicació, a part de l'efecte de pedres, macroporus o variacions en la densitat del sòl, pot ser l'efecte del microrelleu a la superfície del sòl, que determina desplaçaments dels punts d'infiltració respecte dels degoters, així com formes arbitràries dels bulbs humits (Domínguez-Niño *et al.*, 2020b). Per tot plegat, l'ús pràctic dels sensors en sòls regats per degoteig ha de ser diferent de l'ús que se'n fa a sistemes de reg que distribueixen l'aigua de manera més homogènia.

En reg per aspersió, en què és possible extrapolar les mesures fetes pels sensors a tot el volum de sòl, es pot estimar el volum d'aigua disponible per al cultiu i decidir el moment i/o el volum de reg per a portar el sòl a una humitat desitjada (Jabro *et al.*, 2020). En canvi, en reg per degoteig aquesta aproximació seria més difícil, sobretot, com s'ha comentat, perquè les lectures pels sensors no solen ser extrapolables a tot el volum de sòl i, aleshores, no acostuma a ser fiable estimar ni el volum d'aigua disponible ni el necessari per a portar el sòl a una humitat desitjada. Una alternativa és interpretar els sensors en termes de tendències entre dies consecutius, que estan menys afectades per la variabilitat entre sensors (Domínguez-Niño *et al.*, 2020b), en el sentit que una tendència de la humitat a l'alça indica un balanç positiu entre les entrades i sortides d'aigua al sòl i vice-versa (Casadesús *et al.*, 2012).

De cara a l'equipament per a mesurar la humitat del sòl, hi ha diversos sensors comercials que inclouen diferents principis de mesura, cadascun amb els seus avantatges i inconvenients (Bitelli, 2011). D'una banda, els tensiòmetres mesuren la tensió matricial de l'aigua al sòl. Els seus avantatges són que mesuren una magnitud física representativa de la dificultat que tenen les plantes per a absorbir aigua del sòl, indistintament, fins a cert punt, del tipus de sòl. La seva interpretació és relativament senzilla, basada en la comparació entre els valors mesurats i el rang de tensions matricials confortables per als cultius (Smajstrla i Locascio, 1996). Com a inconvenients pràctics, tenen un rang de treball limitat a sòls relativament humits i, sobretot, el seu funcionament correcte requereix tasques de manteniment periòdic. D'una altra banda, hi ha tot un ventall de sensors basats a mesurar algunes propietats elèctriques del sòl, entre els quals els més populars són els sensors de capacítància (figura 1), que es basen en la mesura de la permitivitat

FIGURA 1

Sensor d'humitat del sòl de tipus capacitiu, abans d'instal·lar-lo al sòl



FONT: Arxiu de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA).

elèctrica aparent del sòl (Visconti *et al.*, 2014). En general, tenen l'avantatge que no requereixen manteniment, però, per contra, per a poder interpretar-los, acostuma a ser necessari conèixer mínimament algunes propietats del sòl que s'està mesurant.

Les mesures dels sensors d'humitat de sòl són útils per a dosificar el reg quan es pretén que el cultiu es trobi sempre dins del seu rang de confort hídric, en què l'aigua no sigui un factor limitant. Ara bé, hi ha diverses situacions en què interessa controlar el reg per sota de la demanda potencial per al cultiu. És el cas en què la dotació d'aigua per a reg està per sota de les necessitats potencials del cultiu i cal aplicar el que s'anomena *reg de suport*, que consisteix a aportar un volum anual d'aigua relativament baix, repartint-lo en el temps de manera que permeti maximitzar-ne la productivitat (Martín-Vertedor *et al.*, 2011). També és el cas en què, en certs períodes de l'any, interessa estressar hídricament el cultiu, el que s'anomena *reg deficitari controlat* (RDC), que pot anar adreçat a frenar l'excés de creixement vegetatiu o a assegurar la qualitat en la producció (Fereres i

Soriano, 2007). En aquests casos, els sensors d'humitat de sòl continuen sent útils per a evitar excessos de reg ocasionals, però solen ser menys representatius de l'estat hídric de les plantes, de manera que es fa aconsellable complementar-los amb simulacions del balanç hídric i, idealment, amb mesures de l'estat hídric de les plantes.

En paral·lel al monitoratge de la humitat del sòl, tant la teledetecció com alguns sensors instal·lats sobre les plantes permeten observar l'efecte del reg directament en les plantes. La principal diferència és que els sensors al sòl permeten detectar més clarament els excessos de reg associats a entollaments, pèrdues per drenatge i evaporació, encara que són menys eficaços a l'hora d'aportar les dades en què cal basar el manteniment d'un determinat nivell d'estrès hídric per al cultiu.

3. Monitoratge de l'estat hídric dels cultius per teledetecció

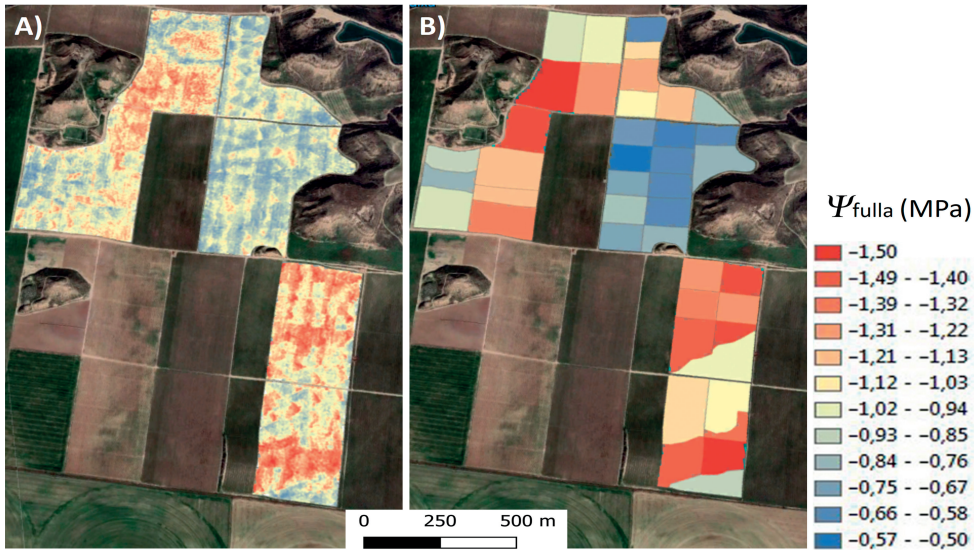
La teledetecció consisteix a adquirir informació d'alguna propietat d'un objecte o fenomen mitjançant un instrument o sensor que no està en contacte físic directe amb l'objecte o fenomen en estudi. El gran avantatge d'usar la teledetecció en l'agricultura, enfront d'altres sistemes que es basen en mesures puntuals, és que a partir d'imatges és possible obtenir informació de la vegetació. Aquesta informació permet estimar, per exemple, les propietats biofísiques de la vegetació, l'estat de salut, el consum d'aigua (evapotranspiració) o l'estat hídric del cultiu.

La teledetecció ofereix mètodes prometedors per a monitorar l'estat hídric, en concret, l'índex d'estrès hídric del cultiu (CWSI, de l'anglès *crop water stress index*), a través d'imatges tèrmiques des de plataformes aerotransportades (drons o avionetes) o des de satèl·lits, i utilitzar-les per a gestionar el reg. Per exemple, Bellvert *et al.* (2016) van demostrar la viabilitat de gestionar el reg d'una vinya a partir de l'estimació del potencial hídric de fulla (Ψ_{fulla}), partint d'imatges tèrmiques d'alta resolució adquirides des d'una avioneta (figura 2).

Altres estudis també han utilitzat informació provinent de teledetecció per a classificar sectors de reg en funció del vigor vegetatiu i identificar punts de control, en els quals, a partir de mesures fisiològiques, es prenen les decisions de reg de manera diferencial (Bellvert *et al.*, 2020). No obstant això, l'elevat cost que suposa sobrevolar, processar i comprar sensors calibrats radiomètricament, a més de la falta d'autonomia de vol d'algunes plataformes (per exemple, drons), o les dificultats relacionades amb el nombre de parcel·les per sobrevolar en un mateix dia, fan que la viabilitat de l'ús de plataformes aerotransportades per a gestionar el reg sigui un factor limitant important que cal tenir en compte. Malgrat això, una bona estratègia per a adoptar en certs cultius sí que podria basar-se a fer un o dos vols d'alta resolució a l'any en moments crítics del cultiu (com ara

FIGURA 2

Estimacions de potencial hídric de fulla d'una vinya, adquirides a partir d'una imatge tèrmica d'alta resolució. A l'esquerra, les dades originals. A la dreta, les dades agregades per sector de reg



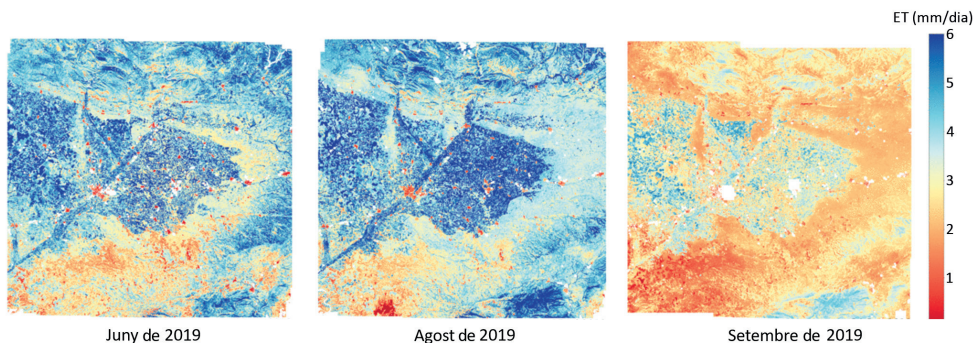
FONT: Arxiu de l'IRTA.

quan les restriccions hídriques arriben al màxim), per tal d'obtenir una visió general de quin és l'estat hídric de tota l'explotació i, en funció d'aquesta informació, prendre les decisions de reg corresponents.

D'altra banda, la informació d'accés lliure que ens aporten alguns satèl·lits obre l'oportunitat d'obtenir informació espaciotemporal dels cultius, gairebé en temps real, de manera més àgil i amb menys cost, encara que a una resolució més baixa. En aquest sentit, els satèl·lits de la missió Sentinel 2 del programa Copernicus de la Unió Europea disposen de dotze bandes espectrals en les regions de l'espectre visible, infraroig proper (NIR, de l'anglès *near infrared*) i infraroig d'ona curta (SWIR, de l'anglès *shortwave infrared*). La freqüència d'adquisició d'imatges d'un mateix punt és de cada 5 dies i les resolucions espacials varien entre 10 i 60 metres. Sentinel 2 s'ha utilitzat majoritàriament per a fer un seguiment del creixement vegetatiu dels cultius, ja sigui a través d'índexs de vegetació (Frampton *et al.*, 2013) o d'estimacions de l'índex d'àrea foliar (LAI, de l'anglès *leaf area index*), la fracció de cobertura (f_c), etc., utilitzant models de transferència radiativa (Weiss i Baret, 2016).

FIGURA 3

Mapes d'evapotranspiració dels cultius a la zona de Lleida, obtinguts en tres dates de l'any 2019, utilitzant l'eina desenvolupada per SEN4ET



FONT: Arxiu de l'IRTA.

D'altra banda, l'evapotranspiració i l'estat hídric dels cultius també es poden monitorar a través de models de balanç d'energia, que usen informació obtinguda a partir de la combinació d'imatges tèrmiques i multiespectrals (Norman, Kustas i Humes, 1995). En aquest sentit, el projecte Sentinels for Evapotranspiration (SEN4ET)¹ ha desenvolupat un producte d'accés lliure, el qual a partir de la fusió d'imatges dels satèl·lits Sentinel 2 i Sentinel 3, més dades meteorològiques obtingudes del Climate Change Service (CCS) de Copernicus i mapes d'usos del sòl,² és capaç d'estimar l'evapotranspiració dels cultius diàriament a una resolució de 20 metres (figura 3). També hi ha alguns projectes, a escala internacional, que intenten unificar els diferents models existents que s'utilitzen per a estimar l'evapotranspiració (ET) amb imatges de satèl·lits, amb l'objectiu de desenvolupar un producte d'accés lliure únic que pugui ser utilitzat globalment.³

1. Per a més informació, vegeu: <www.esa-sen4et.org>.
2. Per a més informació, vegeu: <<https://www.esa-landcover-cci.org/>>.
3. Per a més informació, vegeu: <<https://openetdata.org/>>.

4. Presa de decisions de reg basades en el monitoratge de sòls i cultius

Per tal de satisfer alguna funcionalitat pràctica en la gestió del reg, les observacions provinents de sensors i de teledetecció s'hauran d'interpretar en termes agronòmics. Les aproximacions que cal seguir per a usar aquestes observacions en la presa de decisions depenen de l'escenari agronòmic i de la complexitat tecnològica que es pugui assumir.

La manera més estesa de calcular les necessitats de reg, atenent la meteorologia i el desenvolupament del cultiu, és el mètode proposat per l'Organització per a l'Alimentació i l'Agricultura (FAO), basat a aportar el reg necessari per a compensar el balanç entre sortides i entrades d'aigua al sòl (Allen *et al.*, 1998). La principal sortida és l'evapotranspiració del cultiu (ETc) i la principal entrada, a part de la pluja, és el reg. L'ETc és expressada com a $ETc = ET_0 \times Kc$, en què ET_0 és la demanda teòrica d'un cultiu de referència calculada a partir de dades meteorològiques i Kc el coeficient de cultiu, un factor de conversió entre el cultiu de referència i el cultiu d'interès. La FAO i altres organitzacions han publicat valors de Kc recomanats per a diferents cultius en diferents moments del seu cicle vegetatiu. Aquest mètode permet fer estimacions aproximades de les necessitats de reg a curt i mitjà termini. El problema que presenta en alguns tipus de cultius, com ara plantacions d'arbres o hortícoles en fileres, és la incertesa en el valor de Kc que cal aplicar per cada cas concret, ja que se sap que aquest coeficient depèn del marc de plantació, de les dimensions i de l'estructura de la vegetació i, en certs cultius, de la seva càrrega de fruits.

Algunes aproximacions basades en sensors prescindeixen del càlcul del balanç hídric i simplement implementen un bucle de control per retroalimentació del senyal dels sensors, que intenten mantenir dins d'un rang de confort per al cultiu (Dukes i Scholberg, 2005). Aquestes aproximacions són eficaces en sistemes agronòmics en què els canvis són massa ràpids per a atendre'ls a través del balanç hídric, per exemple en cultius fora del sòl en hivernacles i vivers, que poden requerir diversos regs al dia. Però és una aproximació poc generalitzable, pel risc de mal funcionament dels sensors i la complexitat d'interpretar-ne les dades en molts escenaris a camp obert, sobretot quan s'usa reg localitzat.

En general, l'oportunitat de disposar d'observacions del sòl o del cultiu a temps real no seria una alternativa al càlcul del balanç hídric, sinó un complement que permet ajustar millor el balanç hídric a la casuística local. En aquest sentit, les observacions ajuden a aclarir alguns components i processos rellevants del balanç hídric, com la infiltració, les pèrdues per drenatge, l'emmagatzematge d'aigua al sòl, els requeriments del cultiu i la disponibilitat per a les arrels. Per exemple, a partir d'una interpretació gràfica senzilla,

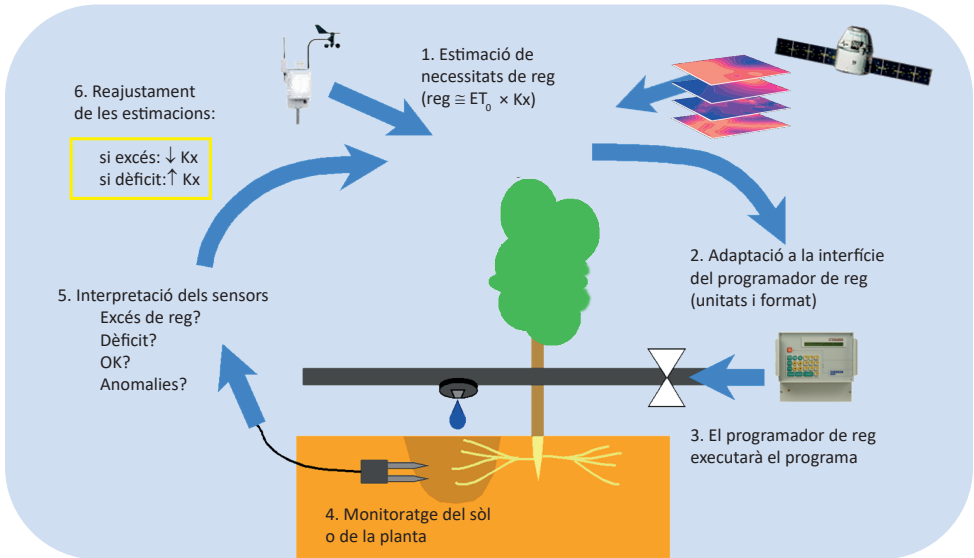
les observacions d'humitat del sòl poden permetre ajustar millor la freqüència de reg i reduir el drenatge (Stirzaker, Mbakwe i Mziray, 2017).

D'una manera més quantitativa, la teledetecció és una font de dades de gran interès en què es poden basar les estimacions del coeficient K_c , que intervé en el càlcul del balanç hídric. Aquesta estimació pot fer-se a partir de seqüències de mapes obtinguts pocs dies abans, cosa que representa el vigor vegetatiu de les parcel·les (Pôças *et al.*, 2005), o inclús representa l'ETc (Bellvert *et al.*, 2018), que indicaria el consum d'aigua pel cultiu. Cal indicar, però, que seria massa simplista suposar que el reg de precisió ha de ser sempre proporcional als valors de vigor o d'ETc observats. A vegades, aquests paràmetres ja estan condicionats per la disponibilitat d'aigua al sòl, en el sentit que les zones amb menys evapotranspiració podrien correspondre a les zones més limitades hídricament —per exemple per les propietats del sòl— i aleshores un reg proporcional a l'ETc encara accentuaria més les diferències. Per això, la complementació del vigor i l'ETc amb mesures d'estat hídric, i sobretot amb simulacions del cultiu, hauria de permetre discriminar més bé aquests casos (Bellvert *et al.*, 2020).

De cara a la programació automatitzada del reg, la combinació entre el balanç hídric i les observacions per sensors o teledetecció es pot sistematitzar. Les observacions normalment no indiquen quin volum de reg cal aportar, sinó en quin sentit (a l'alça o a la baixa) caldria corregir les programacions de reg. El balanç hídric sí que indica un valor numèric d'aigua que cal aportar. La combinació de càlcul del balanç hídric segons la FAO, amb l'ajust d'algun dels seus paràmetres en resposta a observacions per sensors o teledetecció, proporciona un mètode objectiu per al control del reg (figura 4). En concret, el paràmetre K_x s'inicialitza amb el valor de K_c i, posteriorment, es reajusta segons les observacions. Aquest mètode combina els avantatges del balanç hídric, com ara la robustesa, la resposta efectiva a la meteorologia i la capacitat de predir la demanda aproximada, amb els avantatges de la resposta a sensors, que ajusta iterativament el reg a les condicions precises de la parcel·la i als imprevistos que hi puguin sorgir (Casadesús *et al.*, 2012). Aquesta aproximació s'ha mostrat viable perquè el sistema de control s'ajusti espontàniament a casuístiques molt locals, com ara diferents mides d'arbres (Domínguez-Niño *et al.*, 2020a) o, fins i tot, a la presència d'aigua subterrània provinent d'un curs freàtic (Casadesús *et al.*, 2014). En condicions d'estrès hídric, en què les observacions al sòl perden eficàcia, els indicadors d'estat hídric del cultiu (que poden venir de sensors en les plantes o de teledetecció) es poden usar com a font de retroalimentació dels balanços d'aigua, de manera semblant a com usem els sensors de sòl en condicions de no estrès (Casadesús *et al.*, 2012).

FIGURA 4

Visió esquemàtica d'un algorisme de control per al reg de precisió, usant un model de balanç hídric ajustat empíricament per les observacions amb sensors de sòl



FONT: Axiu de l'IRTA.

5. Necessitat de visió del conjunt de la campanya de reg

Els objectius de l'optimització del reg, però, van més enllà de la gestió d'un dia concret. El que interessa realment és optimitzar tota la campanya de reg en funció de les dotacions d'aigua disponible i dels objectius i les peculiaritats de l'explotació. Entre els objectius hi pot haver, per exemple, assolir una producció i qualitat determinades, alhora que no es desaprofita aigua, es controla el vigor vegetatiu del cultiu i s'eviten riscos fitosanitaris per excés d'humitat. Per això, a vegades pot ser necessari restringir el reg i aplicar tècniques de RDC (Fereres i Soriano, 2007), en què les dosis que cal aplicar un dia concret no es corresponen a les necessitats derivades directament de les observacions fetes pels sensors, sinó que segueixen la lògica del conjunt de campanya. Per això, en qualsevol cas, però en especial quan s'ha de regar amb dotacions limitades, convé que el sistema de control de reg segueixi una planificació prèvia de campanya, que li especifiqui què se n'espera en diferents períodes per tal de complir amb el conjunt. D'aquesta manera és

possible gestionar de manera automatitzada tota una campanya de reg aplicant RDC (Millán *et al.*, 2019), així com reg de suport amb dotacions limitades (Millán *et al.*, 2020).

Finalment, les decisions s'han d'executar en una instal·lació de reg, en què les vàlvules i altres mecanismes estan controlats pel dispositiu electrònic anomenat *programador de reg*. La pràctica més recomanada fins ara és que els regants actualitzin les programacions del programador de reg amb una freqüència setmanal. La solució ideal, però, és que el programador rebí directament, màquina a màquina, les prescripcions resultants de l'elaboració de dades i presa de decisions comentades més amunt. Actualment, ja és possible integrar tot el bucle de control, sense necessitat de passos manuals intermedis, a través de la interoperabilitat entre els sistemes d'adquisició de dades, els sistemes que les analitzen per a generar prescripcions de reg i els programadors que executaran el reg. En aquest sentit, hi ha diverses experiències en què s'ha deixat un sistema controlant automàticament el reg, usant mesures d'humitat del sòl i dades meteorològiques, sense necessitat d'intervenció de cap operari durant tota una campanya (Domínguez-Niño *et al.*, 2020a). Convé aclarir que la no intervenció d'operaris és una condició experimental per a testar l'autonomia del sistema, però que en una aplicació real sí que interessa que els regants s'hi impliquin i hi participin.

6. Conclusions i perspectives de futur

Cadascuna de les tecnologies que hem comentat té per separat la seva utilitat, independentment de les altres. No obstant això, el veritable potencial rau en la integració de totes. Un aspecte tecnològic que està facilitant enormement la viabilitat del reg de precisió és la connectivitat a Internet dels dispositius de camp. Si bé molts dels sensors i dispositius de control que hem comentat ja existien fa un parell de dècades, la seva usabilitat s'ha disparat recentment gràcies a l'enorme salt que s'està produint en la connectivitat a Internet en el camp. Pel que fa a la integració, s'ha avançat en l'ús de protocols de comunicació i formats de dades que no depenen del fabricant. El paradigma de la Internet de les coses (IoT, de l'anglès *Internet of things*) ha de permetre que dispositius inclosos en sistemes de monitoratge de sòls i cultius puguin interactuar amb d'altres, com són els programadors de reg, de manera autònoma, per a dur a terme funcionalitats cada vegada més complexes. Al mateix temps, l'anàlisi de dades, la intel·ligència artificial i l'aprenentatge automàtic també es troben en un moment de popularitat i tenen diverses aplicacions en l'optimització del reg.

Però, a part dels avenços en aquestes tecnologies facilitadores que no són específiques de l'àmbit del reg, la interpretació de les observacions i la presa de decisions demana l'ús de simulacions de balanç hídric i el desenvolupament de cultius, més específics d'aquest àmbit. Els models que confirmen aquestes simulacions, per exemple AquaCrop

(Steduto *et al.*, 2009) contenen el coneixement disponible al voltant de l'optimització del reg i són una eina bàsica per a la diagnosi de possibles problemes, la planificació de campanyes de reg i per al tempteig de possibles estratègies. Tradicionalment, les simulacions han estat limitades per la disponibilitat de dades per a configurar i calibrar els models de cara a usar-los en zones molt específiques. Com a exemple, després de més d'una dècada d'experiències en proves pilot, l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA) ha obert al mercat la plataforma web IrriDesk®, que, a través de la integració de les tecnologies comentades, juntament amb l'estat de l'art en agronomia del reg, permet aplicar estratègies de reg eficients de manera gairebé desatesa (figura 5).

L'aplicació d'aquestes tecnologies al reg està arribant a una fase de maduresa suficient per a esperar que el sector les adopti de manera estesa en els propers anys. Però cal tenir en compte que, sobretot per als casos més complexos, una eina digital de gestió del reg no hauria de substituir el paper de l'assessorament agronòmic per part d'un expert, sinó que seria una eina més, juntament amb analítiques, mostrejos manuals i el judici de l'expert, per a facilitar-li i fer-li més efectiu l'assessorament.

FIGURA 5

IrriDesk, plataforma web que integra diferents fonts d'informació per a usar-les en la programació automatitzada del reg de precisió



FONT: Arxiu de l'IRTA.

Bibliografia

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Roma: FAO. (FAO Irrigation and Drainage Paper; 56)
- ARBAT, G.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. de (2013). «Drip-Irrigation: Computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation». *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 98, p. 183-192.
- BELLVERT, J.; ADELIN, K.; BARAM, S.; PIERCE, L.; SANDEN, B. L.; SMART, D. R. (2018). «Monitoring crop evapotranspiration and crop coefficients over an almond and pistachio orchard throughout remote sensing». *Remote Sensing*, vol. 10, p. 2001.
- BELLVERT, J.; MATA, M.; VALLVERDÚ, X.; PARIS, C.; MARSAL, J. (2020). «Optimizing precision irrigation of a vineyard to improve water use efficiency and profitability by using a decision-oriented vine water consumption model». *Precision Agriculture* [en línia]. <<https://doi.org/10.1007/s11119-020-09718-2>> [Consulta: febrer 2021].
- BELLVERT, J.; ZARCO-TEJADA, P. J.; MARSAL, J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; GIRONA, J.; FERERES, E. (2016). «Vineyard irrigation scheduling based on airborne thermal imagery and water potential thresholds». *Australian Journal of Grape and Wine Research*, vol. 22, p. 307-315. DOI: 10.1111/ajgw.12173.
- BITELLI, M. (2011). «Measuring soil water content: A review». *HortTechnology*, vol. 21 (3), p. 293-300.
- CASADESÚS, J.; MATA, M.; MARSAL, J.; GIRONA, J. (2012). «A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops». *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 83, p. 11-20.
- (2014). «Spontaneous accommodation of irrigation scheduling to groundwater through feedback from soil water sensors in drip irrigated peach». *Acta Horticulturae*, núm. 1.038, p. 207-213.
- DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J. (2020a). «Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors». *Agricultural Water Management*, vol. 228, p. 105880.
- DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; OLIVER-MANERA, J.; ARBAT, G.; GIRONA, J.; CASADESÚS, J. (2020b). «Analysis of the variability in soil moisture measurements by capacitance sensors in a drip-irrigated orchard». *Sensors*, vol. 20, p. 2526.
- DUKES, M. D.; SCHOLBERG, J. M. (2005). «Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils». *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 21, p. 89-101.
- FERERES, E.; SORIANO M. A. (2007). «Deficit irrigation for reducing agricultural water use». *Journal of Experimental Botany*, vol. 58, p. 147-159.

- FRAMPTON, W. J.; DASH, J.; WATMOUGH, G.; MILTON, E. J. (2013). «Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 82, p. 83-92. ISSN 0924-2716.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR PRECISION AGRICULTURE (ISPA) (2020). «Precision Ag Definition» [en línia]. <<https://www.ispag.org/about/definition>> [Consulta: 14 desembre 2020].
- JABRO, J. D.; STEVENS, W. B.; IVERSEN, W. M.; ALLEN, B. L.; SAINJU, U. M. (2020). «Irrigation scheduling based on wireless sensors output and soil-water characteristic curve in two soils». *Sensors*, vol. 20 (5), p. 1336.
- KILIC, M. (2020). «A new analytical method for estimating the 3D volumetric wetting pattern under drip irrigation system». *Agricultural Water Management*, vol. 228, p. 105898.
- LIN, H.; WHEELER, D.; BELL, J.; WILDING, L. (2005). «Assessment of soil spatial variability at multiple scales». *Ecological Modelling*, vol. 182 (3-4), p. 271-290.
- MARTÍN-VERTEDOR, A. I.; PÉREZ-RODRIGUEZ, J. M.; PRIETO LOSADA, M. H.; FERERES CASTIEL, E. (2011). «Interactive responses to water deficits and crop load in olive (*Olea europaea* L. cv. *Morisca*) II-Water use, fruit and oil yield». *Agricultural Water Management*, vol. 98, p. 950-958.
- MILLÁN, S.; CAMPILLO, C.; CASADESÚS, J.; PÉREZ-RODRÍGUEZ, J. M.; PRIETO, M. H. (2020). «Automatic irrigation scheduling on a hedgerow olive orchard using an algorithm of water balance readjusted with soil moisture sensors». *Sensors*, vol. 20, p. 2526.
- MILLÁN, S.; CASADESÚS, J.; CAMPILLO, C.; MOÑINO, M. J.; PRIETO, M. H. (2019). «Using soil moisture sensors for automated irrigation scheduling in a plum crop». *Water*, vol. 11, p. 2061.
- NORMAN, J. M.; KUSTAS, W. P.; HUMES, K. S. (1995). «Source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes in observations of directional radiometric surface temperature». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 77, p. 263-293.
- PÔÇAS, I.; PAÇO, T. A.; PAREDES, P.; CUNHA, M.; PEREIRA, L. S. (2005). «Estimation of actual crop coefficients using remotely sensed vegetation indices and soil water balance modelled data». *Remote Sensing*, vol. 7, p. 2373-2400.
- RUIZ-SÁNCHEZ, M. C.; DOMINGO, R.; CASTEL, J. R. (2010). «Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain». *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 8 (S2), p. S5-S20.
- SMAJSTRLA, A. G.; LOCASCIO, S. J. (1996). «Tensiometer-controlled drip irrigation scheduling of tomato». *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 12 (3), p. 315-319.
- SOULIS, K. X.; ELMALOGLOU, S.; DERCAS, N. (2015). «Investigating the effects of soil moisture sensors positioning and accuracy on soil moisture based drip irrigation scheduling systems». *Agricultural Water Management*, vol. 148, p. 258-268.

- STEDUTO, P.; RAES, D.; HSIAO, T. C.; FERERES, E.; HENG, L. K.; HOWELL, T. A.; EVETT, S. R.; ROJAS-LARA, B. A.; FARAHANI, H. J.; IZZI, G.; OWEIS, T. Y.; WANI, S. P.; HOOGEVEEN, J.; GEERTS, S. (2009). «Concepts and applications of AquaCrop: The FAO Crop Water Productivity Model». A: CAO, W.; WHITE, J. W.; WANG, E. (ed.). *Crop modeling and decision support*. Berlín: Heidelberg: Springer.
- STIRZAKER, R.; MBAKWE, I.; MZIRAY, N. R. (2017). «A soil water and solute learning system for small-scale irrigators in Africa». *International Journal of Water Resources Development*, vol. 33 (5), p. 788-803.
- VISCONTI, F.; PAZ, J. M. de; MARTÍNEZ, D.; MOLINA, M. J. (2014). «Laboratory and field assessment of the capacitance sensors Decagon 10HS and 5TE for estimating the water content of irrigated soils». *Agricultural Water Management*, vol. 132, p. 111-119.
- WEISS, M.; BARET, F. (2016). «S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER. Version 1.1. Sentin. ToolBox Level2 Prod. 2016, 53» [en línia]. <https://step.esa.int/docs/extra/ATBD_S2ToolBox_L2B_V1.1.pdf> [Consulta: 14 maig 2020].