

# Avenços recents en el seguiment de variables ambientals per a l'anàlisi de la resiliència dels agroecosistemes i la gestió sostenible dels recursos naturals

Nunzio Romano,<sup>1</sup> Rita Deiana,<sup>2</sup> Chiara Romano,<sup>3</sup> Paolo Nasta<sup>1</sup>

1. Departament d'Agricultura, Universitat de Nàpols Federico II, Portici (Nàpols), Itàlia

2. Departament de Béns Culturals, Universitat de Pàdua, Pàdua, Itàlia

3. Facultat de Geografia i Història, Universitat de Barcelona, Barcelona, Espanya

REBUT: 8 DE GENER DE 2025 · ACCEPTAT: 17 DE FEBRER DE 2025

---

## RESUM

---

Tot i que la producció agrícola és un factor econòmic important per a les regions que són a la vora del mar Mediterrani, el canvi climàtic i la demanda creixent d'aigua per a usos múltiples (potable, reg, industrial) plantegen reptes importants que els organismes governamentals han d'abordar, especialment relacionats amb la disponibilitat d'aigua i la seguretat alimentària. A més, els canvis de vegades massa ràpids en l'ús del sòl també estan donant lloc a alguns problemes de sostenibilitat en el desenvolupament dels paisatges rurals, encara que només es pensí en un augment dels fenòmens d'erosió del sòl o en la degradació de les aigües subterrànies utilitzades per a regadiu i aigües

Correspondència: Nunzio Romano. Dipartimento di Agraria, Sez. di Ingegneria Agraria, Forestale e dei Biosistemi, Università degli Studi di Napoli Federico II. Piazza Carlo di Borbone. 80055 Portici (Nàpols), Itàlia.  
A/e: [nunzio.romano@unina.it](mailto:nunzio.romano@unina.it).

potables. Per tant, és important desenvolupar estratègies eficients de gestió dels recursos hídrics i terrestres per garantir una producció agrícola adequada tant a mitjà com a llarg termini.

Aquest article revisa els aspectes més moderns i avançats del seguiment ambiental aplicat als sistemes agrícoles i forestals i subratlla la importància d'implementar aquestes tècniques de manera integrada per aconseguir una gestió eficient i sostenible dels recursos hídrics i terrestres. Com a exemple, hi ha el cas de l'observatori agroambiental Alento, situat al sud d'Itàlia i representatiu de moltes situacions pedoclimàtiques que es troben a les conques fluvials mediterrànies. Aquesta ressenya es tanca discutint les aplicacions geofísiques en presència de jaciments arqueològics en zones rurals i proporcionant al lector algunes perspectives de futur per al desenvolupament d'aquests temes.

**PARAULES CLAU:** canvi global, serveis ecosistèmics, gestió de l'aigua, sostenibilitat, observatoris ambientals, monitoratge.

## Recent advances in the monitoring of environmental variables for analysis of agroecosystems' resilience and the sustainable management of natural resources

---

### ABSTRACT

---

Agricultural production is a critical economic factor for regions bordering the Mediterranean Sea. However, climate change and the increasing demand for water for multiple uses (drinking, irrigation, industry) pose major challenges to public authorities, particularly in terms of water availability and food security. In addition, the sometimes overly rapid changes in land use are also raising some sustainability issues in the development of rural landscapes, if only one considers increased soil erosion or degradation of groundwater used for irrigation and drinking purposes. Consequently, the development of effective water and land resource management strategies is imperative to ensure sufficient agricultural production in the medium and long term.

This article reviews the most modern and advanced aspects of environmental monitoring applied to agricultural and forestry systems, emphasizing the importance of implementing these techniques in an integrated manner to achieve efficient and sustainable

management of land and water resources. To illustrate this point, we present and discuss the case of the agro-environmental observatory Alento, which is located in southern Italy and is representative of many pedoclimatic situations found in Mediterranean catchments. This review concludes with a discussion of geophysical applications when archaeological sites are found in rural areas and provides the reader with some future perspectives for the development of these issues.

**KEYWORDS:** global change, ecosystem services, water resources management, sustainability, environmental observatories, monitoring.

## Avances recientes en el seguimiento de variables ambientales para el análisis de la resiliencia de los agroecosistemas y la gestión sostenible de los recursos naturales

---

### RESUMEN

---

A pesar de que la producción agrícola es un factor económico importante para las regiones ribereñas del mar Mediterráneo, el cambio climático y la creciente demanda de agua para múltiples usos (potable, riego, industrial) plantean importantes retos a los que deben hacer frente los organismos gubernamentales, especialmente en lo que respecta a la disponibilidad de agua y la seguridad alimentaria. Además, los cambios, a veces demasiado rápidos, en el uso de la tierra también están dando lugar a algunos problemas de sostenibilidad en el desarrollo de los paisajes rurales, aunque solo sea si pensamos en un aumento de la erosión del suelo o en la degradación de las aguas subterráneas utilizadas para el riego y el agua potable. Por lo tanto, es importante desarrollar estrategias eficientes para la gestión de los recursos hídricos y de tierras a fin de garantizar una producción agrícola adecuada tanto a mediano como a largo plazo.

En este artículo se revisan los aspectos más modernos y avanzados del monitoreo ambiental aplicado a los sistemas agrícolas y forestales y se subraya la importancia de implementar estas técnicas de manera integrada para lograr una gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos y terrestres. Como ejemplo, está el caso del observatorio agroambiental Alento, ubicado en el sur de Italia y representativo de muchas situaciones edafoclimáticas encontradas en las cuencas fluviales mediterráneas. Esta revisión se cierra discutiendo las aplicaciones geofísicas en presencia de sitios arqueológicos en

áreas rurales y brindando al lector algunas perspectivas futuras para el desarrollo de estos temas.

**PALABRAS CLAVE:** cambio global, servicios ecosistémicos, gestión del agua, sostenibilidad, observatorios ambientales, monitoreo.

## 1. Introducció

Des dels anys setanta, diverses zones de la Terra han patit una important pèrdua de biodiversitat i hàbitats naturals (IPBES, 2019), mentre que alguns països del sud d'Europa o pertanyents a l'àrea mediterrània estan classificats com a zones sotmeses a condicions d'«estrès hídric». Durant el Dia Mundial de l'Aigua 2024, celebrat a Barcelona el 22 de març, la Unió pel Mediterrani (UpM) va destacar la importància de la cooperació per a la gestió sostenible dels recursos hídrics a la regió euromediterrània afectada per la sequera. Les projeccions de les condicions climàtiques futures, incloent-hi l'augment dels extrems hidrològics i la reorganització de les estructures d'ús del sòl, amb una major difusió de pràctiques agronòmiques intensives, estan generant preocupacions sobre els seus efectes probables sobre els ecosistemes agroforestals, especialment pel que fa a la disponibilitat i la qualitat dels recursos hídrics per a diferents usos (Seneviratne i Zhang, coord., 2021). Les pertorbacions naturals i antròpiques, la urbanització i l'expansió de les zones industrials exerceixen fortes pressions que també poden alterar significativament l'equilibri dels ecosistemes agrícoles (OECD, 2017). En general, aquestes situacions indueixen una disminució potencial dels serveis ecosistèmics (SE) proporcionats pel sector agroforestal (Brauman, 2015; Guswa *et al.*, 2014). En particular, els recursos hídrics subterranis, especialment els aqüífers més superficials situats en relació amb zones agrícoles, podrien veure's més afectats per pressions antròpiques, com els canvis ràpids en l'ús del sòl, i per les tensions climàtiques, com l'augment de la temperatura mitjana de l'aire.

Per tant, la correcta gestió del territori i una acurada explotació dels recursos hídrics representen les principals eines per a la protecció del medi ambient i la promoció del desenvolupament sostenible d'una determinada zona (Le Maitre *et al.*, 2007). A les zones planes, l'expansió de les zones urbanitzades i l'augment de l'agricultura intensiva han provocat pressions importants sobre els recursos hídrics que s'estan esgotant progressivament tant en termes quantitatius com qualitatius. L'aigua s'ha convertit, avui més que mai, en un bé de gran valor i la seva gestió és ara un dels problemes més urgents a abordar. La disponibilitat d'aigua en un lloc determinat i en un moment determinat i la seva demanda per part dels usuaris estan cada vegada menys en estat d'equilibri; això provo-

ca una explotació incontrolada d'aquest recurs amb el consegüent deteriorament i augment dels conflictes entre els diferents usuaris (OECD, 2017).

D'altra banda, el sòl es considera un reactor biogeoquímic, per tant un recurs natural vital però no renovable, que proporciona al voltant del 90 % de les necessitats d'aliments, farratge, fibra i combustible del planeta, i té un paper crucial en el cicle hidrològic pel seu contacte amb l'atmosfera, la presència de vegetació i la seva peculiar posició entre aigües superficials i subterrànies.

Aquests desequilibris en els recursos naturals de què disposa l'home poden amplificar certs aspectes negatius, especialment en el cas de les zones mediterrànies, caracteritzades per sòls sovint molt vulnerables i per condicions climàtiques estacionals particulars tant pel que fa a temperatures com a precipitacions. En les últimes dècades, la producció agrícola ha continuat creixent i expandint-se per tota la regió mediterrània, amb una demanda cada cop més gran d'aigua per al regadiu i la ramaderia. En algunes zones del Mediterrani, l'impacte d'aquesta situació ha estat important, sobretot amb un descens dels nivells freàtics, també per l'efecte de períodes de sequera cada cop més freqüents, així com una menor qualitat de l'aigua per l'ús, de vegades indiscriminat, de productes químics en l'agricultura i la intrusió d'aigua de mar en sòls i aigües subterrànies en el cas de les zones costaneres. Òbviament, les conseqüències del canvi climàtic contribueixen a empitjorar la situació. En els darrers anys, s'han produït amb més freqüència sequeres prolongades i episodis de fortes pluges, que han provocat un augment del risc d'inundacions i esllavissades de terra a bona part de la regió mediterrània.

Tenint en compte tot el que s'ha exposat anteriorment, la implementació d'accions per limitar la degradació del sòl i els recursos hídrics (per exemple, per sequera, inundacions, erosió excessiva del sòl, rebaixa dels nivells d'aigua subterrània, etc.), així com la planificació per a la gestió sostenible d'aquests recursos, s'haurien de fer almenys a partir de dues fases principals (Grizzetti *et al.*, 2016). En primer lloc, cal elaborar mapes d'indicadors de resiliència dels ecosistemes agrícoles. El terme *resiliència* s'utilitza cada cop més avui en els estudis ambientals, en què es conceptualitza com la capacitat d'un ecosistema no només per fer front a esdeveniments naturals extrems o activitats induïdes per l'home (és a dir, estressants), sinó també per recuperar-se de les seves funcions amb més o menys facilitat. El pas següent, en canvi, és la implementació de mesures d'adaptació als canvis globals i de mitigació d'aquests canvis per gestionar eficaçment els riscos derivats de les pertorbacions naturals i antròpiques.

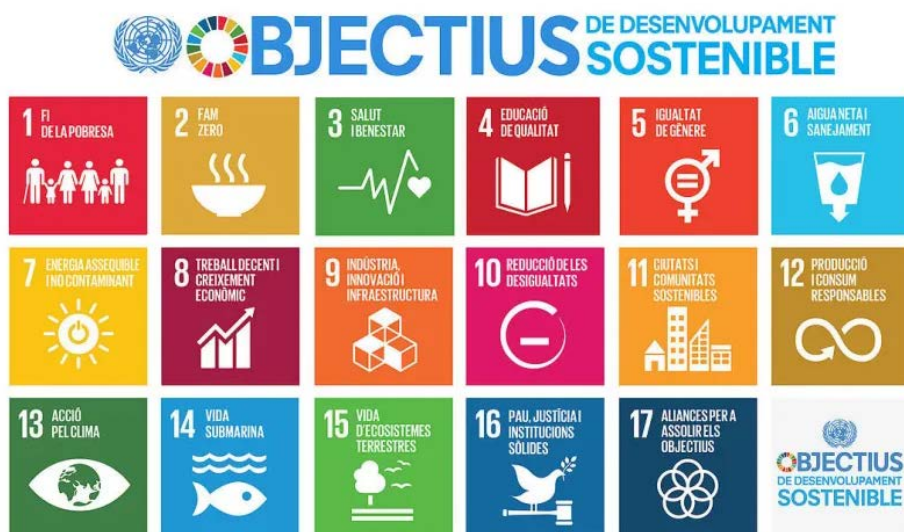
Recentment, les solucions basades en la natura (*Nature-based Solution*, NbS), com l'ús del biocarbó, la bioenginyeria i la gestió forestal, estan sorgint cada cop més com a enfocaments rendibles no només per preservar la biodiversitat, sinó també, de manera més general, per crear contextos urbans o rurals més resilents, alhora que garanteixen una multiplicitat de beneficis ambientals, socials i econòmics (WWAP, 2018). Gràcies al seu

potencial per operar els conceptes *capital natural* i *serveis ecosistèmics*, les NbS es troben constantment al centre de les accions ambientals formulades per la Comissió Europea (Faivre *et al.*, 2017).

Per tant, cal fer un pas important cap a la sostenibilitat ambiental i la resiliència dels ecosistemes agroforestals. Els objectius de desenvolupament sostenible (ODS; *sustainable development goals*, SDGs; vegeu la figura 1) identificats per les Nacions Unides aborden aspectes amplis del desenvolupament sostenible, i la majoria dels disset ODS inclouen elements relacionats amb el medi ambient, l'ús dels recursos naturals i el canvi climàtic. Tanmateix, aquests objectius s'haurien d'assolir l'any 2030, però ja és clar que serà difícil complir aquest termini.

FIGURA 1

Il·lustració gràfica dels disset objectius de desenvolupament sostenible de l'ONU



FONT: UNIVERSITAT DE BARCELONA, *Objectius de desenvolupament sostenible: Agenda 2030 de la UB* (en línia), <<https://www.ub.edu/ods/ca>>.

En aquest context, els observatoris agroambientals ofereixen un valuós suport no només per a la consecució efectiva dels ODS, sinó també per intentar complir el termini del 2030 de la millor manera possible (Reijneveld *et al.*, 2024). La contribució que els observatoris agroambientals poden fer efectivament als ODS és essencialment doble:

a) en primer lloc, proporcionar una gran quantitat de dades sobre les funcions i serveis que ofereix un determinat ecosistema agroforestal;

b) ajudar els organismes de gestió del territori i les parts interessades a identificar indicadors de rendiment adequats d'un ecosistema agrícola i forestal, especialment per definir la vulnerabilitat i la resiliència d'un determinat entorn respecte als canvis globals (Romano, Mazzitelli i Nasta, 2025).

Aquest article de revisió (*review article*) té com a objectiu principal proporcionar informació actualitzada sobre el seguiment de les variables agroambientals i mostrar com aquestes activitats s'integren en els anomenats *observatoris terrestres*. Aquests conceptes es fan més explícits en un paràgraf posterior que presenta les activitats de recerca en curs a l'observatori agroambiental Alento situat a la Campània, una regió del sud d'Itàlia. A continuació, es presenten als lectors algunes aplicacions innovadores del monitoratge geofísic en dos camps relacionats, l'arqueològic i el mediambiental. Finalment, conclouem aquest article identificant algunes àrees de desenvolupament futur i possibles perspectives de recerca.

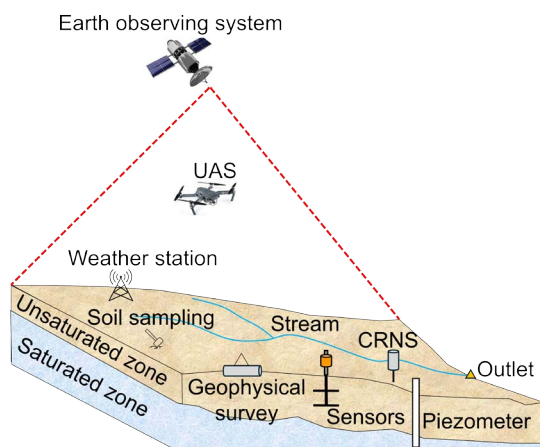
## 2. Monitoratge i observatoris agroambientals

Els esdeveniments naturals extrems i les pertorbacions antropogèniques també poden produir impactes significatius en els sistemes naturals i l'organització social d'una determinada àrea, pel fet d'estar relacionats amb els «béns» i «serveis» que un ecosistema és capaç de produir (serveis ecosistèmics; *ecosystem services*, ESs).

Per donar solucions adequades a aquests problemes, una contribució efectiva està representada pels avenços i els desenvolupaments tecnològics ràpids en la producció d'equips i de sensors que realitzen mesures amb cada vegada menys incertesa i a costos cada vegada més sostenibles. Les xarxes de sensors sense fils (*wireless sensor network*, WSN), és a dir, el conjunt de dispositius electrònics autònoms, distribuïts en una zona determinada, capaços d'adquirir dades ambientals i comunicar-se entre ells, s'han convertit en una realitat. Una novetat també és la integració entre xarxes de sensors sense fils amb altres sistemes d'adquisició de dades per tal de fer més eficient tota la fase de monitoratge ambiental. Un exemple d'aquesta integració és l'ús de xarxes sense fils de sensors capacitius (*capacitance sensor*, CS) que mesuren la humitat del sòl a escala de punts, amb un altre sensor que mesura la humitat del sòl a escala d'àrea i amb l'addició d'altres sensors muntats en drons (sistema d'aire no tripulat; *unmanned aerial system*, UAS) per mesurar l'estrès hídric en la vegetació. Precisament en aquest sector, la indústria dels sensors i les empreses que creen maquinari i programari de telecomunicacions estan desenvolupant xarxes de monitoratge, fins i tot complexes, però, sens dubte, a costos acceptables en comparació amb la gran quantitat d'informació que són capaces d'adquirir.

**FIGURA 2**

**Exemple de monitoratge integrat en una conca hidrogràfica**



FONT: Elaboració pròpia.

Com es mostra a la figura 2, els sensors capacitius (CS) es col·loquen a diferents profunditats del sòl per mesurar contínuament algunes variables importants del sòl, com el contingut d'aigua, la temperatura i la conductivitat elèctrica del sòl, i tenen el gran avantatge de permetre un conreu agronòmic normal a la superfície del sòl. Aquest sistema monitora l'anomenada *escala puntual* i està convenientment acoblat a un sensor de neutrons passiu (*cosmic-ray neutron sensor*, CRNS) capaç de detectar neutrons que es veuen alentits per la presència d'aigua a la capa superior del sòl en comparació amb els neutrons ràpids transportats pels raigs còsmics incidents a la superfície. La novetat d'aquest sensor és que és capaç de detectar la humitat mitjana del sòl en una zona del sòl amb un diàmetre d'uns 600 m, és a dir, una superfície d'unes 20-25 ha. A més, les mesures realitzades a escala local amb sensors terrestres i les mesures remotes amb drons ara s'integren útilment amb les mesures obtingudes de sensors muntats en estacions en òrbita, com avions i satèl·lits.

Aquest desenvolupament tecnològic recent en el camp del monitoratge ambiental està trobant una aplicació efectiva en els anomenats *observatoris agroambientals*. El concepte *observatori dels processos que evolucionen en un determinat ecosistema* no és certament nou i, almenys en els sectors hidrològic i ambiental, es remunta a principis del segle xx, quan es va reconèixer la importància de recollir dades a llarg termini per a una millor comprensió dels processos hidrològics (McDonnell *et al.*, 2007). El 1903, l'escorrentia en cursos d'aigua i altres variables hidrològiques es van recollir per primera vegada



da als embassaments experimentals de Sperbelgraben i Rappengraben, a la regió de l'Emmental de Suïssa, que encara estan en funcionament i tenen una de les sèries temporals d'escorrentia fluvial més llargues del món (Stähli *et al.*, 2011). Als Estats Units, en canvi, les primeres conques experimentals van ser l'experiment Wagon Wheel Gap a Colorado (Bates i Henry, 1928), el Laboratori Hidrològic de Coweeta a Carolina del Nord (Neary *et al.*, 2012) i una xarxa de conques hidrogràfiques creada pel Servei d'Investigació Agrícola del Departament d'Agricultura dels Estats Units (USDA) (Goodrich *et al.*, 2021). Aquests llocs experimentals van ser dissenyats principalment per estudiar la influència de les activitats humanes en els sistemes hidrològics, amb un enfocament en la desforestació i la reforestació, el canvi d'ús de la terra i les pràctiques agrícoles (Whitehead i Robinson, 1993).

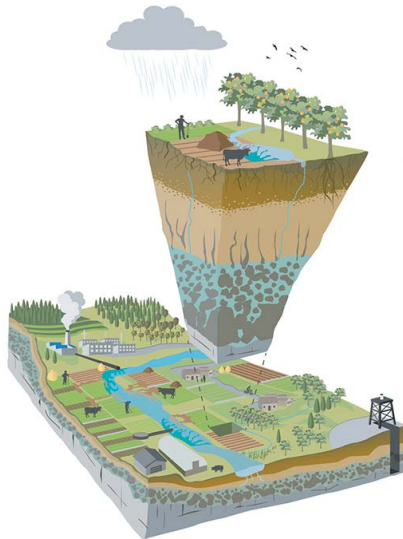
Des de la dècada de 1950, no només ha augmentat el nombre d'observatoris repartits per tot el món, sinó que, d'una banda, ha augmentat el nombre de variables monitorades i, de l'altra, s'han millorat molt les tècniques de monitoratge per seguir el progrés tecnològic dels sensors. De fet, avui dia gairebé no parlem d'observatoris només per monitorar els processos ambientals que tenen lloc en les aigües subterrànies o només en el sistema sòl-vegetació, sinó que cada vegada parlem més d'observatoris de la zona crítica terrestre (*critical zone*, CZ). La zona crítica de la Terra es representa esquemàticament a la figura 3 i inclou la part de la zona més superficial de la Terra des dels aquífers subterranis fins a la baixa atmosfera, passant pel sistema sòl-vegetació, i es considera «crítica» perquè té un paper fonamental en les funcions i els serveis que ofereix un ecosistema determinat. Un sistema integrat de monitoratge ambiental (vegeu la figura 2) aplicat a la «zona crítica» (vegeu la figura 3) ja està operatiu, encara únic per ara a Itàlia, a la conca del riu Alento a la Campània, una regió administrativa al sud d'Itàlia.

Amb especial referència als sistemes agroforestals, és útil assenyalar que recentment s'ha organitzat als Estats Units una xarxa anomenada *LTAR* (*Long-Term Agroecosystem Research*; <https://ltar.ars.usda.gov/>), que inclou divuit llocs de recerca consolidats i, a llarg termini, centrats en el desenvolupament d'estratègies nacionals per a una producció agrícola més eficient, alhora que millora la qualitat del medi ambient i el benestar de les comunitats agrícoles nord-americanes. La xarxa LTAR treballa en col·laboració amb organismes governamentals, altres xarxes de recerca, organitzacions no governamentals i també amb el sector privat per promoure enfocaments col·laboratius per a la recerca d'agroecosistemes, explotar interessos i necessitats comunes de recerca i aprofitar les capacitats i l'experiència de diferents socis.

Amb referència específica als països que voregen el mar Mediterrani, per tant, sotmesos a condicions climàtiques particulars, un exemple d'observatori agroambiental és el que s'implementa a la conca hidrogràfica del riu Alento a la Campània. Les característiques principals d'aquest observatori es descriuran en l'apartat següent.

**FIGURA 3**

**Diagrama de l'anomenada *zona crítica*, és a dir, l'entorn proper a la superfície terrestre on interactuen la roca, l'aigua, el sol, la vegetació, l'aire i la vida**



FONT: L. A. NAYLOR *et al.* (2023), «Achieving sustainable Earth futures in the Anthropocene by including local communities in critical zone science», *Earth's Future*, vol. 11, núm. 9, e2022EF003448, extret d'*Eos* (<https://eos.org/editors-vox/earths-critical-zone-remains-a-mystery-without-its-people>).

### 3. Principals problemes de l'àrea mediterrània i l'observatori agroambiental Alento

Tal com van comentar Banwart *et al.* (2013), un dels reptes socials més urgents del segle XXI és la previsió i gestió fiables de l'ús de l'aigua i l'avaluació adequada dels serveis ecosistèmics relacionats, mitgant els efectes del ràpid canvi climàtic i adaptant-se a la pèrdua progressiva de biodiversitat.

Aquestes qüestions són d'especial importància per als països que voregen el mar Mediterrani, ja que les activitats agrícoles d'aquesta regió no només depenen en gran mesura de l'estacionalitat climàtica local, sinó que també estan fortament influenciades per factors que no són directament climàtics, com les pràctiques de gestió del territori, el progrés tecnològic, els preus de mercat i les polítiques agrícoles europees, nacionals i locals (Bates *et al.*, 2008; Brisson *et al.*, 2010). Els factors esmentats anteriorment solen tenir impactes més immediats en el cicle de l'aigua que els induïts pel canvi climàtic. El fet és que, òbviament, durant els mesos secs d'estiu, augmenten els conflictes entre els diferents usuaris (agricultura, turisme, producció hidroelèctrica i sector de l'aigua potable) a

causa de la creixent demanda d'aigua. Segons l'últim informe del Grup Intergovernamental d'Experts sobre el Canvi Climàtic (IPCC, de l'anglès Intergovernmental Panel on Climate Change) (Ali *et al.*, 2022), la franja mediterrània estarà sotmesa a sequeres prolongades induïdes pel canvi climàtic, que, sens dubte, agreujaran l'escassetat d'aigua i provocaran possibles futures crisis hídriques. La gestió de l'aigua a l'àrea mediterrània depèn en gran mesura de la variabilitat intraanual i interanual de les precipitacions, que limita la regeneració natural anual de l'aigua dolça. A més, els canvis en l'ús del sòl i la cobertura del sòl també són forces impulsores importants. De fet, durant la segona meitat del segle xx, els sistemes agrícoles i ramaders de les zones de muntanya i de turons de l'Europa mediterrània es van abandonar progressivament i la coberta forestal es va expandir posteriorment, la qual cosa va provocar una disminució potencial de la disponibilitat d'aigua a causa de l'augment de la transpiració per la vegetació (Nasta *et al.*, 2017). No només la quantitat, sinó també la qualitat de l'aigua és especialment important perquè la contaminació de l'aigua també limita l'ús d'aquest recurs. Hi ha molts riscos a causa de la manca de consciència dels danys causats pels diferents tipus de contaminants en aigües superficials i subterrànies. Particularment nocius són els anomenats *disruptors endocrins*, vinculats a l'ús d'insecticides, fungicides i herbicides en cultius vegetals i estrògens en granges d'animals. Pel que fa a aquesta última categoria de contaminants, els riscos derivats de l'ús incontrolat d'antibiòtics semblen estar molt subestimats.

Per afrontar aquests reptes en el context específic de l'àrea mediterrània, s'ha creat un observatori agroambiental a la conca hidrogràfica del riu Alento que, per les seves condicions ambientals i socioeconòmiques particulars, és sens dubte molt representatiu d'aquesta zona (Romano *et al.*, 2018). Tota la conca del riu Alento cobreix una superfície d'uns 400 km<sup>2</sup>, es troba a la regió de la Campània (sud d'Itàlia; província de Salern; latitud 40N18, longitud 15E6) i està inclosa com a lloc representatiu dins del programa UNESCO-HELP. «HELP: Hidrology for environment, life and policy» ('hidrologia per al medi ambient, la vida i la política') és un programa transversal del Programa Hidrològic Internacional (PHI) de la UNESCO. En aquesta conca hi ha diverses preses (la més gran és la presa de terra de Piano della Rocca), que emmagatzemen aigua per a usos hidroelèctrics, de regadiu i potable, i, per tant, la fan molt important per als organismes públics i els usuaris privats (com, per exemple, el Parc Nacional del Cilento i Vallo di Diano, l'Oficina de Recuperació Velia, la Comunitat de Muntanya Alento - Monte Stella, etc.). La conca de l'Alento és un sistema agrícola i forestal ben organitzat, en el qual la presa principal Piano della Rocca es pot considerar adequadament com una frontissa que no només connecta físicament la part més muntanyosa i la més plana, sinó que manté unides les diverses investigacions de seguiment i modelització dels processos hidrològics. El diagrama de la figura 4 mostra els principals blocs que conformen l'arquitectura general de les activitats que s'estan duent a terme a l'observatori Alento. En particular, aquest esquema posa de manifest

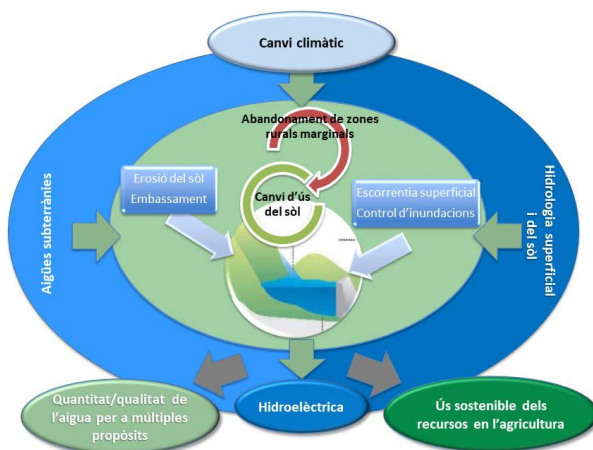
com la presa de Piano della Rocca i el seu embassament representen un punt d'unió entre les diverses qüestions que es desenvolupen aigües amunt i aigües avall d'aquest punt.

La conca del riu Alento té característiques pedològiques, geològiques, vegetals i hidrogeològiques que permeten realitzar investigacions científiques detallades sobre la temàtica general de l'avaluació dels serveis ecosistèmics i, en particular, sobre els efectes que exerceixen sobre el medi agroforestal el canvi climàtic i l'ús del sòl (*land use and land cover*, LULC, *change*) i incendis forestals (Romano, 2014; Vereecken *et al.*, 2016). L'observatori Alento no només és adequat per aprofundir en les dinàmiques dels processos hidrològics i agronòmics que evolucionen en zones mediterrànies típiques, sinó que també contribueix a desenvolupar escenaris sostenibles i plausibles per a la gestió del sòl i els recursos hídrics, que requereixen un compromís entre les necessitats ambientals i l'impacte socioeconòmic dels diferents usos del sòl.

Les activitats de recerca tenen objectius lleugerament diferents segons la zona muntanyosa alta (Alt Alerio) o la zona més plana (Baix Alerio) de la conca en què es duen a terme. Per exemple, a l'Alt Alerio (una àrea d'uns 100 km<sup>2</sup>) són més importants les qüestions relacionades amb la disponibilitat d'aigua per a usos múltiples i l'erosió del sòl, mentre que al Baix Alerio són més importants les qüestions relacionades amb l'ús sostenible de l'aigua de reg i la qualitat de les aigües subterrànies.

**FIGURA 4**

Representació esquemàtica de les principals qüestions agroambientals que caracteritzen la conca del riu Alento a la Campània (sud d'Itàlia). Aigües avall de la presa de Piano della Rocca, es representen esquemàticament els principals serveis públics: reg, aigua potable/industrial i hidroelèctrica



FONT: Elaboració pròpia.

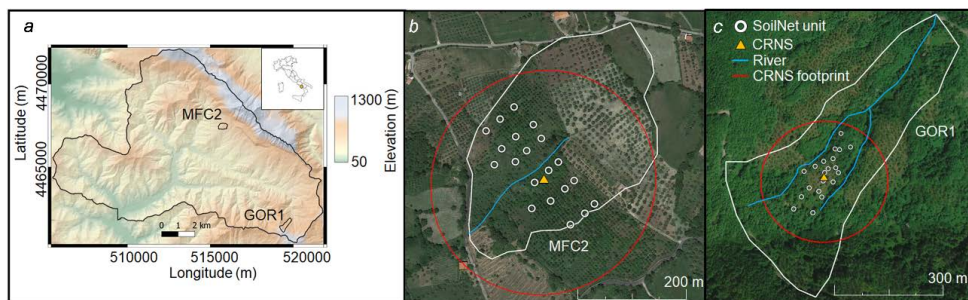
A l'Alt Alento s'han identificat dues petites conques experimentals per al seguiment espaciotemporal dels cabals hidrològics (figura 5a). La conca MFC2 (figura 5b), d'unes 8 ha, es troba a prop del poble de Monteforte Cilento i representa una àrea subjecta a usos típics agrícoles. La conca GOR1 (figura 5c), en canvi, d'unes 23 ha, es troba a prop del poble de Gorga i és una zona boscosa típica dominada per castanyers i roures.

**FIGURA 5a, b i c**

**5a) Conca de l'Alt Alento amb la posició geogràfica de les subconques MFC2 i GOR1**

**5b) Sensors instal·lats a MFC2**

**5c) Sensors instal·lats a GOR1**



FONT: Elaboració pròpia.

Es van instal·lar dispositius de monitoratge similars en les dues petites conques fluvials, descrits de la manera següent:

- una xarxa de sensors sense fils instal·lats en vint posicions on cada sensor detecta el contingut d'aigua, la temperatura, la succió de la matriu i la conductivitat elèctrica a dues profunditats del sòl (15 cm i 30 cm);
- un instrument que mesura el contingut mitjà d'aigua del sòl a partir de la reflexió dels neutrons presents en els raigs còsmics en una àrea aproximadament circular d'unes 12 ha;
- un sensor de nivell d'aigua per controlar el cabal d'aigua a la secció de tancament;
- una estació meteorològica per al seguiment de les precipitacions i l'evapotranspiració potencial de referència ( $ET_0$ ) estimada amb la velocitat i la direcció del vent, la temperatura i la humitat de l'aire, així com la radiació solar;
- piezòmetres en deu posicions MFC2 per monitorar l'aquífer superficial.

A més, es realitzen campanyes periòdiques per mesurar el contingut d'aigua superficial del sòl mitjançant la tècnica de reflectometria en el domini del temps (*time domain reflectometry*, TDR).

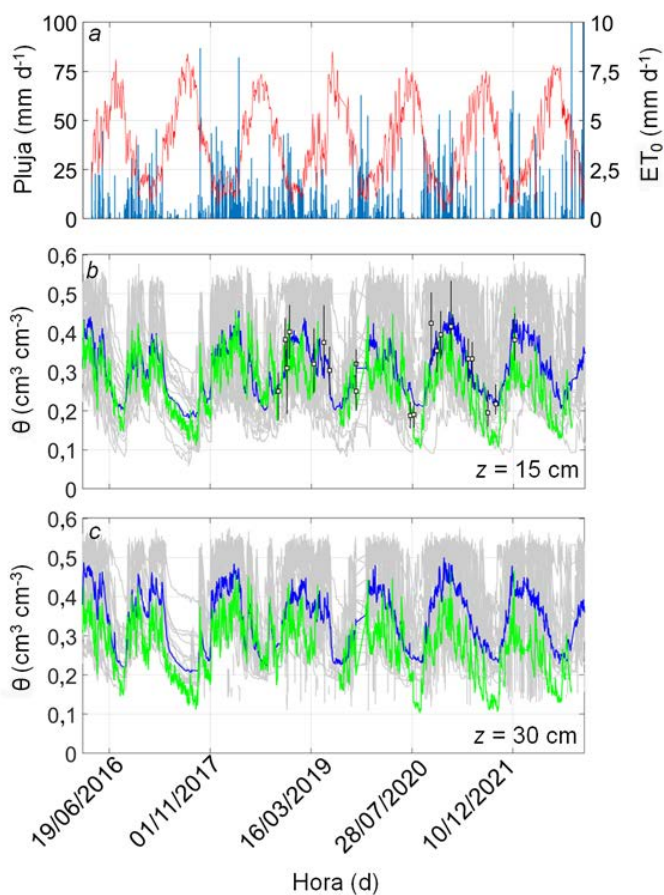
**FIGURA 6a, b i c**

**Variables monitorades a MFC2 del 2016 al 2022**

**a) Precipitació (línia blava) i evapotranspiració potencial de referència,  $ET_0$  (línia vermella)**

**b) Contingut d'aigua del sòl,  $\theta$ , monitorat a una profunditat del sòl de 15 cm pels 20 sensors capacitius (línies grises), amb la línia blava que indica la seva mitjana espacial, pel sensor de neutrons de raigs còsmics, CRNS (línia verda), i per la reflectometria en el domini del temps, TDR (barres negres verticals amb quadrats blancs que indiquen mitjanes espacials)**

**c) Contingut d'aigua del sòl,  $\theta$ , monitorat a una profunditat del sòl de 30 cm pels 20 sensors capacitius (línies grises), amb la línia blava que indica la seva mitjana espacial, pel sensor de neutrons de raigs còsmics, CRNS (línia verda)**



FONT: Elaboració pròpia.



A la figura 6 es mostra un exemple de monitoratge integrat entre sensors puntuals (és a dir, sensors capacitius inserits a dues profunditats diferents en el sòl) i el sensor d'àrea (és a dir, CRNS). En aquesta figura, el gràfic superior (figura 6a) mostra la tendència de les variables climàtiques de precipitació  $P$  (les barres blaves) i l'evapotranspiració potencial  $ET_0$  (la línia vermella).

Els gràfics del mig i l'inferior, d'altra banda, mostren les sèries temporals del contingut d'aigua del sòl monitorades per sondes capacitives (representades per línies grises contínues), inserides a les dues profunditats del sòl de 15 cm (figura 6b) i 30 cm (figura 6c), durant un període d'uns 1.400 dies.

Com es pot veure, les línies grises estan una mica disperses entre elles i indiquen la presència d'una evident variabilitat espacial del terreny en les vint posicions de mesura diferents. En aquests dos gràfics, els cercles vermells representen les mitjanes espacials del contingut d'aigua del sòl mesurat i es comparen amb les línies negres que indiquen els valors de contingut d'aigua estimats pel model ecohidrològic HYDRUS-1D (Šimůnek *et al.*, 2024).

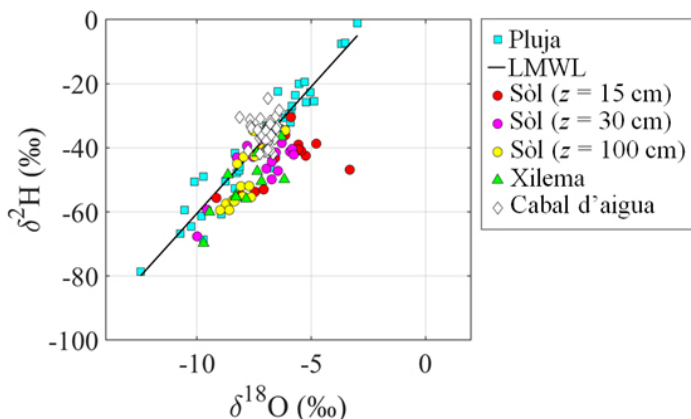
Altres investigacions es van centrar a quantificar les connexions entre l'absorció d'aigua del sòl pel sistema radicular de la vegetació i els fluxos d'aigua als cursos d'aigua i les aigües subterrànies. Per a això, les tècniques d'investigació són principalment les següents: a) traçadors ambientals (principalment isòtops d'hidrogen i oxigen); b) ús de tècniques geofísiques innovadores, no invasives i espacialment extenses.

Un dels objectius principals de la investigació experimental amb traçadors ambientals va ser comprovar, i especialment per a situacions mediterrànies, la hipòtesi dels anomenats *dos mons d'aigua* (*two water world*, 2WW), desenvolupada pel grup de J. J. McDonnell (2014). Els isòtops estables d'hidrogen i oxigen ( $\delta^2H$  i  $\delta^{18}O$ ) són traçadors ambientals útils per estudiar la generació d'escorrentia a escala de talús i conca petita i l'origen dels fluxos d'aigua en el sistema sòl-planta-atmosfera. La composició isotòpica de la precipitació, l'escorrentia d'aigua, l'aqüífer, l'aigua extreta criogènicament de mostres de sòl a diferents profunditats i les mostres de vegetació (castanyer) es van monitorar dues vegades per setmana en el període 2020-2022 a la conca experimental GOR1 (figura 7). L'aigua del sòl (a profunditats de 15 cm, 30 cm i 100 cm) i la continguda en el teixit xilema dels teixits vegetals del castanyer va ser extreta mitjançant el mètode de destil·lació criogènica (Koeniger *et al.*, 2011) al laboratori de la Universitat de Campània Luigi Vanvitelli.

A l'àrea d'estudi, es va determinar la *línia d'aigua meteòrica local* (*local meteoric water line*, LMWL), que representa la relació lineal entre els dos traçadors  $\delta^2H$  i  $\delta^{18}O$  en l'aigua de precipitació. L'LMWL proporciona informació útil per a l'estudi de l'origen de les masses de vapor d'aigua que generen precipitacions. Les dades isotòpiques d'escorrentia d'aigua, sòl i aigua del xilema es van comparar en el diagrama de dispersió entre  $\delta^2H$

**FIGURA 7**

Gràfic de dispersió  $\delta^2\text{H}$  i  $\delta^{18}\text{O}$  per a l'escorrentia d'aigua (diamants blancs), sòl a profunditats de 15 cm (cercles vermells), 30 cm (cercles magenta) i 100 cm (cercles grocs) i xilema (triangles verds) mostrejat a Gorga. La línia negra indica la línia meteorica local (LMWL) obtinguda per anàlisi de regressió lineal aplicada a dades d'isòtops de precipitació (quadrats celestes)



FONT: Elaboració pròpia.

i  $\delta^{18}\text{O}$  en relació amb els LMWL per identificar la presència de qualsevol fraccionament isotòpic (interpretat com una desviació de les mostres a la dreta dels LMWL) de les mostres de sòl i vegetació.

Les investigacions geofísiques realitzades fins ara en els dos jaciments experimentals MFC2 i GOR1 han estat les següents (Nasta *et al.*, 2019):

- estudi electromagnètic en MFC2 amb l'instrument GEM-2 i caracterització del lloc amb la tècnica de tomografia de resistivitat elèctrica bidimensional (*electrical resistivity tomography 2D,T-2D*);

- estudi electromagnètic en GOR1 amb l'instrument GEM-2 i caracterització del lloc amb la tècnica de tomografia de resistivitat elèctrica bidimensional (ERT-2D).

La tècnica de prospecció electromagnètica permet mesurar les propietats elèctriques del sòl mitjançant l'anàlisi del senyal electromagnètic generat pels cossos conductors presents al subsol. Aquesta resposta és induïda per un senyal primari enviat a través d'una antena font. La resposta electromagnètica registrada per una antena receptora estarà condicionada per les propietats elèctriques del medi investigat, mentre que l'anàlisi dels components del senyal gravat permet obtenir informació relativa a la variació de la conductivitat elèctrica en el subsol.



L'instrument utilitzat per a l'adquisició de dades geolèctriques és el Geophex GEM-2, un sensor multifreqüència, el funcionament del qual es basa en el principi segons el qual la profunditat d'exploració és una funció de la freqüència del senyal utilitzat. Analitzar un senyal compost per múltiples freqüències equival a mesurar la resposta d'un senyal a diferents profunditats. Per tant, és possible utilitzar aquest tipus d'instrumentació per obtenir una distribució 3D de la conductivitat elèctrica del subsol a la zona investigada.

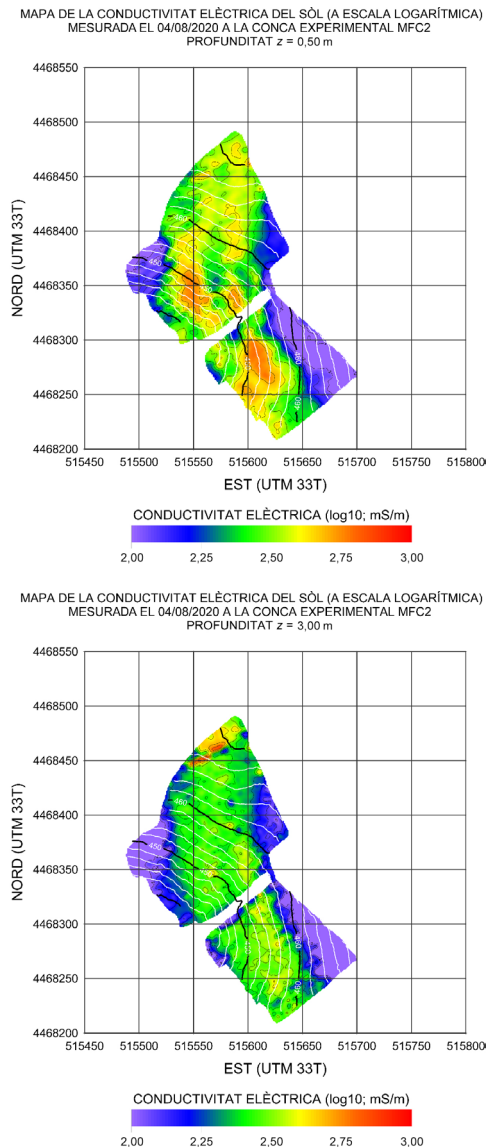
La tècnica de tomografia de resistivitat elèctrica bidimensional (ERT-2D) consisteix a determinar la resistència elèctrica específica (resistivitat) del sòl mitjançant dispositius especials d'adquisició. En aquest cas concret, es van realitzar mesures de resistivitat amb la tècnica de perfils dipol-dipolar multielèctrode amb processament tomogràfic bidimensional (2D) dels resultats, que permeten obtenir una imatge de la distribució de les propietats elèctriques del subsol al llarg d'una secció. Per realitzar mesures de resistivitat, es poden utilitzar diferents dispositius, tots amb 4 elèctrodes fixats a terra: a través de 2 d'aquests, fixats en posicions conegudes, s'envia un corrent elèctric sota terra, mentre que els altres 2 mesuren el gradient de potencial, que s'estableix entre 2 punts, en tantes posicions conegudes durant la circulació del corrent a terra. A partir de la posició dels elèctrodes és possible derivar un factor geomètric que, utilitzat en el càlcul de la resistència, permet arribar a la resistència específica per unitat de longitud, més coneguda com a *resistivitat*.

La figura 8 mostra dos mapes de conductivitat elèctrica del sòl detectats a la conca MFC2 el 4 d'agost de 2020, a les dues profunditats del sòl de 0,50 m i 4,0 m. Les mesures es van dur a terme a l'agost i, per tant, en un període amb temperatures de l'aire bastant altes i gairebé sense precipitacions: el mapa de la figura 8a (a l'esquerra) mostra valors bastant modestos de conductivitat elèctrica a l'àrea d'estudi (d'1 mS/m a uns 2 mS/m), per tant, indicatiu d'un sòl més superficial (a una profunditat de 0,5 m) bastant sec especialment per a fenòmens d'evapotranspiració intensa; la figura 8b (a la dreta), en canvi, presenta majors valors de conductivitat elèctrica a una profunditat de 4 m, la qual cosa indica un major nivell d'humitat del sòl a aquesta profunditat malgrat les condicions climàtiques decididament estiuenques.

Atès que l'àrea mediterrània es caracteritza per una estacionalitat evident en temperatura i precipitació, es van realitzar estudis geolèctrics a la conca MFC2 amb l'instrument Geophex GEM-2 fins i tot en el període hivernal. La figura 9 mostra els mapes de conductivitat elèctrica en MFC2 mesurats, de nou a les dues profunditats de 0,5 m i 4,0 m, el 15 de desembre de 2020. Els mapes de la figura 9 mostren clarament el règim d'humitat del sòl al desembre en comparació amb el trobat a l'agost.

FIGURA 8

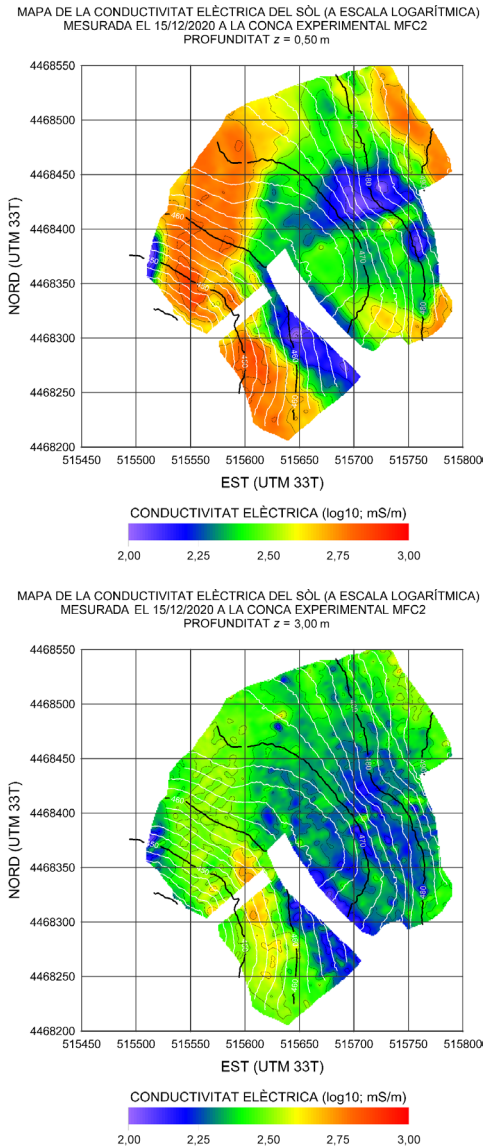
Mapa de la conductivitat elèctrica del sòl (a escala logarítmica) mesurada el 4 d'agost de 2020 a la conca experimental MFC2: profunditat  $z = 0,50$  m (a dalt), profunditat  $z = 3,0$  m (a baix)



FONT: Elaboració pròpia.

**FIGURA 9**

**Mapa de la conductivitat elèctrica del sòl (a escala logarítmica) mesurada el 15 de desembre de 2020 a la conca experimental MFC2: profunditat  $z = 0,50$  m (a dalt), profunditat  $z = 3,0$  m (a baix)**



FONT: Elaboració pròpia.

#### **4. Altres usos de les tècniques de seguiment integrat: investigacions arqueològiques en jaciments rurals**

L'anàlisi i l'avaluació de les qüestions ambientals requereixen enfocaments típicament multidisciplinaris i fomenten les connexions entre diferents aspectes, incloent-hi en particular els fluxos d'informació i les xarxes. La informació sobre dades ambientals representa una poderosa eina per governar el territori; per tant, es construeixen xarxes per recollir-les, processar-les i difondre-les. Pel que fa a les xarxes, una referència pot ser la dels anomenats *laboratoris vius* (*living-labs*), que es poden definir com a «entorns d'innovació oberta, en situacions reals, en els quals la implicació activa dels usuaris finals permet crear camins de cocreació de nous serveis, productes i infraestructures socials» (ENoLL).

En aquest context, una característica de la conca hidrogràfica del riu Alento, que fa especialment significativa l'elecció d'haver creat un observatori agroambiental en aquesta zona, és la sinergia entre les dades ambientals i les dades historicoculturals. La xarxa d'infraestructures de carrils bici-vianants permet fomentar i desenvolupar el turisme lent (*slow tourism*), capaç de potenciar i promoure la relació entre el medi ambient, el paisatge rural i els itineraris naturals, i representa un important model de desenvolupament i un motor eficaç per a una economia local.

Per tant, l'anàlisi tecnocientífica de les dades ambientals s'acompanya d'estudis històrics dels recursos naturals que troben en el jaciment arqueològic de Velia un lloc de considerable interès. Aquesta sinergia, sempre que és possible, és certament fructífera per a noves interpretacions de les troballes arqueològiques vinculant-les als sistemes agroambientals muntanyosos que les envolten. En el desenvolupament d'anàlisis arqueològiques rurals, els estudis geofísics no invasius ofereixen un enorme potencial.

En les últimes dècades s'han desenvolupat molts camps d'aplicació de la prospecció geofísica per a investigacions no invasives del subsol superficial, gràcies en part al desenvolupament de nova instrumentació capaç d'assegurar una resolució espacial cada vegada més gran. Aplicacions en arqueologia (Cuenca-García, Asàndulese i Lowe, 2024; Deiana, Leucci i Martorana, 2018; Martorana *et al.*, 2023) i l'agricultura (Allred *et al.*, 2010; Garré *et al.*, 2021) han trobat un espai cada vegada més ampli. Encara que de maneres diferents, de fet, aquestes dues àrees de recerca sovint requereixen informació preliminar, no invasiva i detallada sobre la presència d'heterogeneïtats en els primers metres del subsol. En el cas de l'arqueologia representen la distribució de restes enterrades, mentre que en el cas de l'agricultura l'objectiu és la identificació de diferents tipus de sòl o l'anàlisi de la dinàmica de l'aigua del sòl relacionada també amb l'activitat radicular, ja sigui en cultius sencers o en plantes individuals (Cassiani *et al.*, 2015; Mary *et al.*, 2018). L'elecció dels mètodes geofísics es basa generalment en les característiques i propietats

del sistema considerat, particularment en relació amb els contrastos d'un o més paràmetres físics mesurables en el context específic.

En arqueologia, els mètodes geofísics més utilitzats són el mètode magnètic, el radar de penetració de terra (*ground-penetrating radar*, GPR), la tomografia de resistivitat elèctrica (*electrical resistivity tomography*, ERT) i, més recentment, els mètodes d'inducció electromagnètica de baixa freqüència (*frequency domain electromagnetic*, FDEM, o *electromagnetic induction*, EMI). L'ús de mètodes sísmics per a la prospecció arqueològica és molt més esporàdic, però és possible si s'adopten mètodes adequats i una cobertura espacial suficient (Barone *et al.*, 2022). En agricultura, la prospecció i el seguiment requereixen sens dubte mètodes influïts per la presència i variació de l'aigua, inclosa la salinitat, que afecten el comportament elèctric del sòl, com ara ERT, GPR, FDEM o EMI.

Les tècniques aplicades en els dos contextos diferents varien segons el tipus de dianes, la seva mida i el contrast esperat amb el sistema hoste. Un problema típic està relacionat amb la resolució espacial: una resolució decimètrica mitjana és suficient per a l'arqueologia, mentre que per als estudis agrícoles l'escala espacial pot ser més gran (de metres a desenes de metres) per a la caracterització espacial del sòl a gran escala. Per descomptat, aquestes diferències depenen dels diferents objectius de les disciplines. D'una banda, en arqueologia, cal obtenir informació ràpida i oportuna que permeti a l'arqueòleg planificar prèviament i ràpidament la campanya d'excavació. La resolució espacial és essencial, mentre que la resolució de profunditat és molt menys crítica. En canvi, en l'agricultura, els estudis geofísics s'utilitzen sovint per cartografiar grans àrees per als canvis del sòl, o per observar la dinàmica dels sòls al llarg del temps, amb mesures repetides en diferents èpoques de l'any, també durant diversos anys, o per monitorar processos ràpids com experiments d'infiltració o d'absorció d'aigua de les arrels.

La geofísica ofereix un punt de convergència en els interessos de l'arqueologia i l'agricultura investigant de manera no invasiva les traces d'estructures enterrades, naturals o artificials, relacionades amb la relació entre l'home i la terra en un moment històric determinat. Aquesta informació es pot associar, per exemple, a l'ús i l'explotació del sistema natural hidrogràfic i geomorfològic pel que fa a assentaments i a la possibilitat d'identificar rastres d'infraestructures vinculades a operacions de millora del sòl. Un primer exemple interessant és la prospecció geofísica en els assentaments «Terramare» de l'època protohistòrica (Deiana *et al.*, 2020) on, a més de les dades arqueològiques sobre l'extensió de l'assentament, s'ha aportat informació interessant sobre l'antiga xarxa hidrogràfica i la successió estratigràfica dels sistemes hidrogràfics, amb valuosos coneixements i nous elements per a l'estudi de la dinàmica de l'assentament i el seu abandonament.

El segon exemple està representat per la possibilitat d'utilitzar la prospecció geofísica de manera integrada amb dades de teledetecció com a comprovació no invasiva per verificar la presència i profunditat real de possibles estructures vinculades a la recuperació de

territoris en l'antiguitat, amb la possibilitat de recollir controls directes i específics mitjançant excavacions o nuclis (Deiana *et al.*, 2020; Vacilotto, Deiana i Mozzi, 2020). El futur d'aquestes aplicacions cada vegada més interdisciplinàries rau en la seva capacitat de vincular la informació de les dades de satèl·lit i la fotografia aèria amb controls terrestres mitjançant tècniques geofísiques. En aquest context concret, s'esperen molts desenvolupaments en els propers anys també per als estudis arqueològics i agrícoles, obtinguts gràcies a l'ús de drons i al desenvolupament de programari per interpretar dades multisensor obtingudes a diferents escales, sobre les quals serà útil començar a pensar ja a partir d'ara.

## 5. Conclusions i perspectives de desenvolupament futur

Si bé és evidentment més efectiu comprometre recursos per centrar-se en el compliment d'un nombre limitat d'ODS més estretament lligats a la funcionalitat dels agroecosistemes, encara no és tan clar si els recursos humans i econòmics disponibles s'han d'invertir en un nombre limitat d'observatoris altament instrumentats o en un major nombre d'observatoris molt ben distribuïts en un continent o en tot el planeta, però menys instrumentats. Aquesta qüestió espinosa es va abordar durant els treballs de la VIII Galileo Conference, celebrada a Nàpols el juny de 2023, i és el tema de l'article de Nasta *et al.* (2025). Aquest article, més que inclinar-se cap a una solució alternativa a l'altra, reprèn la famosa dita llatina dels antics romans «in medio stat virtus» (que, però, deriva de l'*Ètica a Nicòmac*, d'Aristòtil) i proposa al lector una solució intermèdia que destaca els avantatges i les limitacions d'aquestes dues solucions, només parcialment oposades.

A part del fet que, per resoldre problemes ambientals complexos, sempre és necessari identificar les eines més efectives i eficients en relació amb la disponibilitat econòmica, en aquest article hem intentat cridar l'atenció dels lectors sobre el fet que, quan és possible, s'obté una comprensió adequada dels processos que evolucionen en un ecosistema agrícola mitjançant la implementació d'un sistema integrat de monitoratge. Aquest sistema es pot aconseguir gràcies al progrés tecnològic que proporciona sensors cada vegada més precisos a costos cada vegada més assequibles, amb disposicions capaces de satisfer les necessitats específiques, fins i tot, de diferents usuaris.

## Agraïments

Pel que fa a la recerca experimental a l'observatori Alento, els autors agraeixen a Benedetto Sica el suport proporcionat en les mesures de laboratori i de camp per determinar

les propietats físiques i hidràuliques dels sòls, i a Matteo Censini, la col·laboració en les mesures geofísiques.

## Bibliografia

- ALI, E.; CRAMER, W.; CARNICER, J.; GEORGOPOULOU, E.; HILMI, N. J. M.; LE COZANNET, G.; LIONELLO, P. (2022). «Cross-chapter paper 4: Mediterranean region». A: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; TIGNOR, M.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHLE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A.; RAMA, B. (ed.). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge; Nova York: Cambridge University Press, p. 2233-2272. DOI 10.1017/9781009325844.021.
- ALLRED, B.; FREELAND, R. S.; FARAHANI, H. J.; COLLINS, M. E. (2010). «Agricultural geophysics: Past, present, and future». A: *23rd Symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems 2010 (SAGEEP 2010)*. Keystone, Colorado: Environmental and Engineering Geophysical Society, p. 190-202. DOI 10.4133/1.3445432.
- BANWART, S.; CHOROVER, J.; GAILLARDET, J.; SPARKS, D.; WHITE, T.; ANDERSON, S.; AUFDENKAMPE, A.; BERNASCONI, S.; BRANTLEY, S. L.; CHADWICK, O.; DIETRICH, W. E.; DUFFY, C.; GOLDBERGER, M.; LEHNERT, K.; NIKOLAIDIS, N. P.; RAGNARSDOTTIR, K. V. (2013). *Sustaining Earth's critical zone: Basic science and interdisciplinary solutions for global challenges*. Sheffield: University of Sheffield. ISBN 978-0-9576890-0-8.
- BARONE, I.; CASSIANI, G.; OURABAH, A.; BOAGA, J.; PAVONI, M.; DEIANA, R. (2022). «Surface wave tomography using dense 3D data around the Scrovegni Chapel in Padua, Italy». *Scientific Reports*, núm. 12 (1), 11806. DOI 10.1038/s41598-022-16061-1.
- BATES, C. G.; HENRY, A. J. (1928). «Second phase of streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colo». *Monthly Weather Review*, núm. 56, p. 79-97. DOI 10.1175/1520-0493(1928)56<79:SPOSEA>2.0.CO;2.
- BATES, B. C.; KUNDZEWICZ, Z. W.; WU, S.; PALUTIKOF, J. P. (ed.) (2008). *Climate change and water: Technical paper of the IPCC*. Ginebra: IPCC Secretariat, 210 p. ISBN 978-92-9169-123-4.
- BRAUMAN, K. A. (2015). «Hydrologic ecosystem services: Linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management». *WIREs Water*, vol. 2, p. 345-358. DOI 10.1002/wat2.1081.
- BRISSE, N.; GATE, P.; GOUACHE, D.; CHARMET, G.; OURY, F. X.; HUARD, F. (2010). «Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France». *Field Crops Research*, vol. 119, p. 201-212. DOI 10.1016/j.fcr.2010.07.012.



- BRONDÍZIO, E. S.; SETTELE, J.; DÍAZ, S.; NGO, H. T. (ed.) (2019). *Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn: IPBES secretariat. ISBN 978-3-947851-20-1.
- CASSIANI, G.; BOAGA, J.; VANELLA, D.; PERRI, M. T.; CONSOLI, S. (2015). «Monitoring and modelling of soil-plant interactions: The joint use of ERT, sap flow and eddy covariance data to characterize the volume of an orange tree root zone». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 19, p. 2213-2225. DOI 10.5194/hess-19-2213-2015.
- CUENCA-GARCIA, C.; ASĂNDULESEI, A.; LOWE, K. M. (ed.) (2024). *World archaeo-geophysics: Integrated minimally invasive approaches using country-based examples*. Cham: Springer Nature. També disponible en línia a: <[link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-57900-4](https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-57900-4)> [Consulta: 11 juliol 2025].
- DEIANA, R.; LEUCCI, G.; MARTORANA, R. (2018). «New perspectives on geophysics for archaeology: A special issue». *Surveys in Geophysics*, vol. 39, p. 1035-1038. DOI 10.1007/s10712-018-9500-4.
- DEIANA, R.; VICENZUTTO, D.; DEIDDA, G. P.; BOAGA, J.; CUPITÒ, M. (2020). «Remote sensing, archaeological, and geophysical data to study the terramare settlements: The case study of Fondo Paviani (Northern Italy)». *Remote Sensing*, vol. 12 (16), 2617. DOI 10.3390/rs12162617.
- ENOLL = EUROPEAN NETWORK OF LIVING LABS. *Living labs* [en línia]. <<https://enoll.org/living-labs/#living-labs>>.
- FAIVRE, N.; FRITZ, M.; TIAGO FREITAS, T.; DE BOISSEZON, B.; VANDEWOESTIJNE, S. (2017). «Nature-based solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges». *Environmental Research*, vol. 159, p. 509-518. DOI 10.1016/j.envres.2017.08.032.
- GARRÉ, S.; HYNDMAN, D.; MARY, B.; WERBAN, U. (2021). «Geophysics conquering new territories: The rise of agrogeophysics». *Vadose Zone Journal*, vol. 20, núm. 4, e20115. DOI 10.1002/vzj2.20115.
- GOODRICH, D. C.; HEILMAN, P.; ANDERSON, M.; BAFFAUT, C.; BONTA, J.; BOSCH, D.; BRYANT, R.; COSH, M.; ENDALE, D.; VEITH, T. L.; HAVENS, S. C.; HEDRICK, A.; KLEINMAN, P. J.; LANGENDOEN, E. J.; MCCARTY, G.; MOORMAN, T.; MARKS, D.; PIERSON, F.; RIGBY, J. R.; SCHOMBERG, H.; STARKS, P.; STEINER, J.; STRICKLAND, T.; TSEGAYE, T. (2021). «The USDA-ARS Experimental Watershed Network: Evolution, lessons learned, societal benefits, and moving forward». *Water Resources Research*, vol. 57, 26473. DOI 10.1029/2019WR026473.
- GRIZZETTI, B.; LANZANOVA, D.; LIQUETE, C.; REYNAUD, A.; CARDOSO, A. C. (2016). «Assessing water ecosystem services for water resource management». *Environmental Science & Policy*, vol. 61, p. 194-203. DOI 10.1016/j.envsci.2016.04.008.
- GUSWA, A. J.; BRAUMAN, K. A.; BROWN, C.; HAMEL, P.; KEELER, B. L.; SAYRE, S. S. (2014). «Ecosystem services: Challenges and opportunities for hydrologic modeling to sup-

- port decision making». *Water Resources Research*, vol. 50, p. 4535-4544. DOI 10.1002/2014WR015497.
- KOENIGER, P.; MARSHALL, J. D.; LINK, T.; MULCH, A. (2011). «An inexpensive, fast, and reliable method for vacuum extraction of soil and plant water for stable isotope analyses by mass spectrometry». *Rapid Communication in Mass Spectrometry*, vol. 25, p. 3041-3048. DOI 10.1002/rcm.5198.
- LE MAITRE, D. C.; MILTON, S. J.; JARMAIN, C.; COLVIN, C. A.; SAAYMAN, I.; VLOK, J. H. J. (2007). «Linking ecosystem services and water resources: Landscape-scale hydrology of the Little Karoo». *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, p. 261-270. DOI 10.1890/1540-9295(2007)5[261:LESAWR]2.0.CO;2.
- MARTORANA, R.; CAPIZZI, P.; PISCIOTTA, A.; SCUDERO, S.; BOTTARI, C. (2023). «An overview of geophysical techniques and their potential suitability for archaeological studies». *Heritage*, vol. 6, núm. 3, p. 2886-2927. DOI 10.3390/heritage6030154.
- MARY, B.; PERUZZO, L.; BOAGA, J.; SCHMUTZ, M.; WU, Y.; HUBBARD, S. S.; CASSIANI, G. (2018). «Small scale characterization of vine plant root water uptake via 3D electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, p. 5427-5444. DOI 10.5194/hess-22-5427-2018.
- MCDONNELL, J. J. (2014). «The two water worlds hypothesis: Ecohydrological separation of water between streams and trees?». *WIREs Water* [en línia], vol. 1, p. 323-329. <<https://doi.org/10.1002/wat2.1027>>.
- MCDONNELL, J. J.; SIVAPALAN, M.; VACHÉ, K.; DUNN, S.; GRANT, G.; HAGGERTY, R.; HINZ, C.; HOOPER, R.; KIRCHNER, J.; RODERICK, M. L.; SELKER, J.; WEILER, M. (2007). «Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology». *Water Resources Research*, vol. 43, 7301. DOI 10.1029/2006WR005467.
- NASTA, P.; BLÖSCHL, G.; BOGENA, H. R.; ZACHARIAS, S.; BAATZ, R.; DE LANNOY, G.; JENSEN, K. H.; MANFREDI, S.; PFISTER, L.; TARQUIS, A. M.; VAN MEERVELD, I.; VOLTZ, M.; ZENG, Y.; KUSTAS, W.; LI, X.; VERECKEN, H.; ROMANO, N. (2025). «HESS opinion: Towards a common vision for the future of hydrological observatories». *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 29, p. 465-483. DOI 10.5194/hess-29-465-2025.
- NASTA, P.; BOAGA, J.; DEIANA, R.; CASSIANI, G.; ROMANO, N. (2019). «Comparing ERT- and scaling-based approaches to parameterize soil hydraulic properties for spatially distributed model applications». *Advances in Water Resources*, vol. 126, p. 155-167. DOI 10.1016/j.advwatres.2019.02.014
- NASTA, P.; PALLADINO, M.; URSINO, N.; SARACINO, A.; SOMMELLA, A.; ROMANO, N. (2017). «Assessing long-term impact of land-use change on hydrological ecosystem functions in a Mediterranean upland agro-forestry catchment». *Science of the Total Environment*, vol. 605-606, p. 1070-1082. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.06.008.
- NEARY, D.; HAYES, D.; RUSTAD, L.; VOSE, J.; GOTTFRIED, G.; SEBESTEYN, S.; JOHNSON, S.;

- SWANSON, F.; ADAMS, M. (2012). «US Forest Service Experimental Forests and Ranges Network: A continental research platform for catchment-scale research». A: WEBB, A. [et al.]. *Revisiting experimental catchment studies in forest hydrology*. Wallingford: IAHS Press, p. 49-57. (IAHS publication; 353) ISBN 978-1-907199-48-7. [Actes de la XXV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics a Melbourne, juny-juliol de 2011]
- OECD = ORGANISATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT (2017). *Water risk hotspots for agriculture*. París: OECD Publishing. (OECD Studies on Water). DOI 10.1787/9789264279551-en.
- REIJNEVELD, J. A.; GELING, M.; GELING, E.; BOUMA, J. (2024). «Transforming agricultural living labs into lighthouses contributing to sustainable development as defined by the UN-SDGs». *Soil Systems*, vol. 8, núm. 3, 79. DOI 10.3390/soilsystems8030079.
- ROMANO, N. (2014). «Soil moisture at local scale: Measurements and simulations». *Journal of Hydrology*, vol. 516, p. 6-20. DOI 10.1016/j.jhydrol.2014.01.026.
- ROMANO, N.; MAZZITELLI, C.; NASTA, P. (2025). «Root-zone water-storage capacity and uncertainty: An intrinsic factor affecting agroecosystem resilience to drought». *Water Resources Research*, vol. 61, e2024WR037719.
- ROMANO, N.; NASTA, P.; BOGENA, H. R.; DE VITA, P.; STELLATO, L.; VEREECKEN, H. (2018). «Monitoring hydrological processes for land and water resources management in a Mediterranean ecosystem: The Alento River catchment observatory». *Vadose Zone Journal*, vol. 17, 0042. DOI 10.2136/vzj2018.03.0042.
- SENEVIRATNE, S. I.; ZHANG, X. (coord.) (2021). «Weather and climate extreme events in a changing climate». Capítol 11. A: MASSON-DELMOTTE, V. [et al.]. *Climate change 2021: The physical science basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; Nova York: Cambridge University Press, p. 1513-1766. DOI 10.1017/9781009157896.013.
- ŠIMŮNEK, J.; BRUNETTI, G.; JACQUES, D.; VAN GENUCHTEN, M. T.; ŠEJNA, M. (2024). «Developments and applications of the HYDRUS computer software packages since 2016». *Vadose Zone Journal*, vol. 23, 20310. DOI 10.1002/vzj2.20310.
- STÄHLI, M.; BADOUX, A.; LUDWIG, A.; STEINER, K.; ZAPPA, M.; HEGG, C. (2011). «One century of hydrological monitoring in two small catchments with different forest coverage». *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 174, p. 91-106. DOI 10.1007/s10661-010-1757-0.
- VACILOTTO, A.; DEIANA, R.; MOZZI, P. (2020). «Understanding ancient landscapes in the venetian plain through an integrated geoarchaeological and geophysical approach». *Remote Sensing*, vol. 12, núm. 18, 2973. DOI 10.3390/rs12182973.
- VEREECKEN, H.; SCHNEPF, A.; HOPMANS, J. W.; JAVAUX, M.; OR, D.; ROOSE, T.; VANDERBORGHT, J.; YOUNG, M. H.; AMELUNG, W.; AITKENHEAD, M.; ALLISON, S. D.; ASSOULINE, S.; BAVEYE,

P.; BERLI, M.; BRÜGGEMANN, N.; FINKE, P.; FLURY, M.; GAISER, T.; GOVERS, G.; GHEZZEHEI, T.; HALLETT, P.; HENDRICKS FRANSSEN, H. J.; HEPELL, J.; HORN, R.; HUISMAN, J. A.; JACQUES, D.; JONARD, F.; KOLLET, S.; LAFOLIE, F.; LAMORSKI, K.; LEITNER, D.; McBRATNEY, A.; MINASNY, B.; MONTZKA, C.; NOWAK, W.; PACHEPSKY, Y.; PADARIAN, J.; ROMANO, N.; ROTH, K.; ROTHFUSS, Y.; ROWE, E. C.; SCHWEN, A.; ŠIMŮNEK, J.; TIKTAK, A.; VAN DAM, J.; VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.; VOGEL, H. J.; VRUGT, J. A.; WÖHLING, T.; YOUNG, I. M. (2016). «Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives». *Vadose Zone Journal*, vol. 15. DOI 10.2136/vzj2015.09.0131.

WHITEHEAD, P. G.; ROBINSON, M. (1993). «Experimental basin studies: An international and historical perspective of forest impacts». *Journal of Hydrology*, vol. 145, núm. 3-4, p. 217-230. DOI 10.1016/0022-1694(93)90055-E.

WWAP = UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME; UN-WATER (2018). *The United Nations world water development report 2018: Nature-based solutions for water*. París: UNESCO.