

EDITORIAL MESSAGE

Extending managed aquifer recharge in rural areas in the European Union and Mediterranean countries

Rudy Rossetto - Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy

Catalin Stefan - Technische Universität Dresden, Dresden, Germany

Water scarcity has historically been associated mainly with southern European regions, but is now affecting the rest of EU as well, with pressures expected to intensify under climate change. Agriculture is particularly exposed to this transition with groundwater over-abstraction being a major pressure on aquifers in intensively cultivated regions.

The consequences extend well beyond impacts on agricultural production. Declining groundwater levels may affect wetlands, river connectivity and groundwater-dependent ecosystems, intensifying competition among agricultural, environmental, and societal water needs. Addressing these pressures requires a shift from conventional water-supply approaches towards integrated strategies capable of retaining water within catchments, increasing storage and redistributing availability across seasons. In this context, Natural Water Retention Measures and landscape-scale “sponge” approaches are receiving increasing attention. Measures such as soil-water conservation practices, restoration of wetlands and floodplains, retention areas, and other nature-based solutions can enhance infiltration, slow runoff, reduce erosion and support water storage across rural landscapes. Their combination with subsurface storage may further strengthen the capacity of agricultural land to buffer both droughts and intense rainfall events.

When water resources of adequate quality are available, Managed Aquifer Recharge (MAR) provides an additional means of addressing the temporal mismatch between water availability and demand by storing water underground for subsequent use or environmental benefits. Agricultural MAR (Ag-MAR) extends this concept into productive rural landscapes by integrating aquifer recharge with agricultural land, practices and infrastructures (Levintal et al., 2023). Unlike conventional MAR, Ag-MAR introduces recharge as a complementary function of agricultural land and may therefore mobilise substantially larger areas and volumes for groundwater storage. It offers a potentially scalable adaptation strategy linking seasonal water surpluses and non-conventional water sources (such treated waste-water) with aquifer recovery, irrigation security and ecosystem resilience. Flood-MAR and Forested Infiltration Areas (FIA) constitute relevant examples of Ag-MAR. In the first, during high-flow events, excess water from rainfall/snowmelt is diverted through existing irrigation canals onto well-delimited farmland and orchards, where it infiltrates and recharges the underlying aquifer. This lowers peaks downstream and stores water for dry-season irrigation (DWR, 2023), while the same land is then used for setting cropping systems. In FIA, land is used to grow woody crops and to favour infiltration at the same by increasing the number of ditches in a field and delivering irrigation water off-season (Mezzalana et al., 2014).

However, Ag-MAR remains scientifically and operationally immature, particularly in Europe. Important research gaps concern

not only adapted recharge schemes, but also how water quality evolves through soils and the vadose zone in areas with high use of agrochemicals. Also, we should explore the impact of repeated inundation on soil structure/microbiology, nutrient cycling and crop productivity. Further research is also needed to determine where Ag-MAR is technically and economically suitable, how it performs under future climate conditions, what governance structures and institutional arrangements are needed, and how it can be integrated with agricultural practices and other sponge strategies at catchment scale.

Finally, Ag-MAR successful implementation requires appropriate regulatory conditions, viable business models, and effective coordination among farmers, water managers, and decision makers to determine when, where and under which conditions Ag-MAR can become a safe, sustainable and scalable climate-adaptation strategy for European rural areas.

In this issue ...

We present four studies highlighting groundwater-quality deterioration in arid/coastal settings, driven by salinity/seawater intrusion, geogenic processes and anthropic pollution. Improved (digital) assessment and management approaches are proposed. Zitouni et al. (2026) assesses groundwater quality in Algeria's Mitidja Plain using GWQI and an AHP-GIS health-risk index (HR-GWQI). Conventional GWQI may underestimate nitrate-related health risks, whereas the AHP-based HR-GWQI provides a more realistic and health-protective assessment of groundwater quality, helping identify vulnerable areas affected by agriculture and seawater intrusion. Mazouzi et al. (2026) documents a marked deterioration in irrigation groundwater quality in the Bay of Algiers aquifer (Algeria) from 2006–2025. Increasing salinity, seawater intrusion and anthropogenic pressures reduced irrigation suitability, with severe restrictions dominant by 2025, highlighting the need for sustainable groundwater management. Zabid et al. (2026) evaluates seasonal groundwater quality in Karachi's Landbi-Korangi industrial area (Pakistan). Groundwater is predominantly saline Na–Cl/SO₄ type, controlled mainly by water–rock interaction and evaporation. Monsoonal recharge causes temporary dilution but substantial salinity persists, highlighting the need for improved groundwater management. Groundwater in the Bechar–Kenadsa coal basin (Algeria) is highly mineralized and generally unsuitable for drinking or irrigation (Hadji et al., 2026). Hydrochemistry indicates dominant evaporite dissolution, water–rock interaction and localized anthropogenic nitrate pollution, showing salinity as the principal regional groundwater-quality constraint.

Ampliare l'applicazione della ricarica controllata degli acquiferi nelle aree rurali dell'Unione Europea e dei Paesi del Mediterraneo

Rudy Rossetto - *Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italia*

Catalin Stefan - *Technische Universität Dresden, Dresden, Germany*

La scarsità idrica è stata storicamente associata soprattutto alle regioni dell'Europa meridionale, ma oggi interessa anche il resto dell'UE, con pressioni destinate a intensificarsi a causa dei cambiamenti climatici. La produzione agricola è particolarmente esposta a questa transizione e il sovrasfruttamento delle acque sotterranee rappresenta una delle principali pressioni sugli acquiferi nelle regioni rurali.

Le conseguenze vanno ben oltre gli impatti sull'agricoltura. L'abbassamento dei livelli delle falde può interessare le zone umide, la connettività fluviale e gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee, intensificando la competizione tra fabbisogni idrici agricoli, ambientali e sociali. Affrontare queste pressioni richiede il passaggio dai tradizionali approcci per l'approvvigionamento idrico a strategie integrate capaci di trattenere l'acqua all'interno dei bacini idrografici, aumentare la capacità di accumulo e ridistribuirne la disponibilità tra le stagioni. In questo contesto, le *Natural Water Retention Measures* e gli approcci "spugna" a scala di paesaggio stanno ricevendo crescente attenzione. Misure quali le pratiche di conservazione dell'acqua nel suolo, il ripristino di zone umide e piane alluvionali, le aree di ritenzione e altre soluzioni basate sulla natura possono favorire l'infiltrazione, rallentare il deflusso superficiale, ridurre l'erosione e sostenere la disponibilità di acque nei territori rurali. La loro combinazione con l'immagazzinamento negli acquiferi può ulteriormente rafforzare la capacità dei territori agricoli di mitigare sia gli effetti della siccità sia quelli degli eventi pluviometrici intensi.

Quando sono disponibili risorse idriche di qualità adeguata, la ricarica in condizioni controllate degli acquiferi (in inglese *Managed Aquifer Recharge*, MAR) offre un ulteriore strumento per affrontare lo sfasamento temporale tra disponibilità e domanda idrica, immagazzinando acqua nel sottosuolo per un utilizzo successivo o per produrre benefici ambientali. I sistemi MAR in ambito agricolo (in inglese *Agricultural MAR*, Ag-MAR) estendono questo concetto ai territori rurali produttivi, integrando la ricarica degli acquiferi con i terreni, le pratiche agricole e le infrastrutture irrigue (Levintal et al., 2023). A differenza dei sistemi MAR convenzionali, l'Ag-MAR introduce la ricarica come funzione complementare e può quindi mobilitare superfici e volumi significativamente maggiori per l'accumulo di acqua nel sottosuolo. Essa rappresenta una strategia di adattamento potenzialmente applicabile su larga scala, capace di mettere in relazione i surplus idrici stagionali e le fonti idriche non convenzionali, come le acque reflue trattate, con il recupero degli acquiferi, l'approvvigionamento irriguo e la resilienza degli ecosistemi. Il *Flood-MAR* e le *Forested Infiltration Areas* (FIA, aree forestali di infiltrazione) costituiscono esempi significativi di Ag-MAR. Nel primo caso, durante gli eventi di piena, l'acqua in eccesso derivante dalle precipitazioni o dallo scioglimento nivale

viene deviata attraverso i canali irrigui esistenti verso terreni agricoli ben delimitati e frutteti, dove si infila ricaricando l'acquifero sottostante. Ciò consente di ridurre i picchi di portata a valle e di immagazzinare acqua per l'irrigazione durante la stagione secca (DWR, 2023), mentre gli stessi terreni vengono successivamente utilizzati per le coltivazioni. Nelle FIA, i terreni sono utilizzati per coltivare specie arboree e, contemporaneamente, favorire l'infiltrazione aumentando il numero di scoline nei campi e distribuendo acqua irrigua al di fuori della stagione irrigua (Mezzalana et al., 2014).

L'Ag-MAR rimane ancora scientificamente e operativamente poco matura, in particolare in Europa. Importanti lacune riguardano non soltanto lo sviluppo di schemi di ricarica adattati ai diversi contesti, ma anche l'evoluzione della qualità dell'acqua durante il passaggio attraverso il suolo e la zona insatura in aree caratterizzate da un uso intensivo di prodotti agrochimici. È inoltre necessario approfondire gli effetti delle inondazioni ripetute sulla struttura/microbiologia del suolo, sul ciclo dei nutrienti e sulla produttività delle colture. Ulteriori ricerche sono necessarie per determinare dove l'Ag-MAR sia tecnicamente ed economicamente applicabile, quali prestazioni possa garantire nelle future condizioni climatiche, quali strutture di governance e assetti istituzionali siano necessari e come possa essere integrata con le pratiche agricole e con altre strategie "spugna" a scala di bacino.

Infine, il successo dell'implementazione dell'Ag-MAR richiede condizioni normative adeguate, modelli di business sostenibili e un efficace coordinamento tra agricoltori, gestori delle risorse idriche e decisori, al fine di stabilire quando, dove e in quali condizioni l'Ag-MAR possa diventare una strategia di adattamento climatico sicura, sostenibile e applicabile su larga scala nelle aree rurali europee.

In questo numero ...

Presentiamo quattro studi che evidenziano il deterioramento della qualità delle acque sotterranee in contesti aridi e costieri, determinato da salinità e intrusione marina, processi geogenici e inquinamento antropico. Vengono inoltre proposti approcci innovativi, anche digitali, per migliorare la valutazione e la gestione delle risorse. Zitouni et al. (2026) valutano la qualità delle acque sotterranee nella Piana della Mitidja (Algeria), utilizzando il GWQI e un indice di rischio sanitario basato su AHP-GIS (HR-GWQI). Il GWQI convenzionale può sottostimare i rischi sanitari associati ai nitrati, mentre l'HR-GWQI basato sull'AHP fornisce una valutazione più realistica e maggiormente cautelativa per la salute, contribuendo a identificare le aree vulnerabili interessate dalle attività agricole e dall'intrusione marina. Mazouzi et al. (2026) documentano

un marcato deterioramento della qualità delle acque sotterranee destinate all'irrigazione, tra il 2006 e il 2025, nell'acquifero della Baia di Algeri (Algeria). L'aumento della salinità, l'intrusione marina e le pressioni antropiche hanno ridotto l'idoneità delle acque all'irrigazione, con condizioni di severa restrizione divenute predominanti nel 2025, evidenziando la necessità di una gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee. Zahid et al. (2026) valutano la variazione stagionale della qualità delle acque sotterranee nell'area industriale di Landhi-Korangi a Karachi (Pakistan). Le acque sotterranee sono prevalentemente saline, con facies di tipo Na-Cl/SO₄, controllate principalmente dall'interazione acqua-roccia e dall'evaporazione. La ricarica

monsonica determina una temporanea diluizione, ma permane una salinità significativa, evidenziando la necessità di migliorare la gestione delle risorse idriche sotterranee. Le acque sotterranee del bacino carbonifero di Bechar-Kenadsa (Algeria), risultano fortemente mineralizzate e generalmente non idonee all'uso potabile o irriguo (Hadjj et al., 2026). L'idrochimica indica come processi dominanti la dissoluzione di evaporiti e l'interazione acqua-roccia, accompagnati da un inquinamento localizzato da nitrati di origine antropica, identificando nella salinità il principale fattore limitante per la qualità delle acque sotterranee a scala regionale.

BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

- DWR (2024). Merced River Watershed Flood-MAR Reconnaissance Study. California Department of Water Resources, Sacramento, USA
- Hadjj, A., Mekkaoui, A., Habbi, M., Belkendil, A., Ameri, S. (2026). Hydrochemical Characterization and Assessment of Groundwater in the Bechar-Kenadsa Coal Basin (Southwestern Algeria). *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(3), 63 - 76. <https://doi.org/10.7343/as-2026-983>
- Levintal, E., Kniffin, M. L., Ganot, Y., Marwaha, N., Murphy, N. P., and Dahlke, H. E. (2023) Agricultural managed aquifer recharge (Ag-MAR)-a method for sustainable groundwater management: A review, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, 53, 291–314. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2050160>
- Mazouzi, S., Zekari, M., Aziez, O., (2026). Hydrochemical evolution and spatio-temporal dynamics of irrigation water quality in the Bay of Algiers aquifer (Algeria). *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(3), 23 - 36. <https://doi.org/10.7343/as-2026-1031>
- Mezzalana, G., Niceforo, U., Gusmaroli, G. 2014. Forested infiltration areas (FIA); principles, experiences, perspectives. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 2014, Vol. 3, AS10049: 055 – 060. <https://doi.org/10.7343/AS-087-14-0114>
- Zahid, E., Imran, H., Khan, A., Hassan, I., Ahmed, T., Ul Huda, N. (2026). Integrated statistical, hydrogeochemical and geospatial assessment of seasonal monsoon variations in groundwater quality of Landhi-Korangi Area, Karachi, Sindh, Pakistan. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(3), 39 - 60. <https://doi.org/10.7343/as-2026-999>
- Zitouni, Z.B., Hartani, T., Aidaoui, A., Bouras-Chekired, F.Z. (2026). Assessment of groundwater quality and human health risks using GWQI and a novel AHP-Developed HR-GWQI: evidence from the Mitidja Plain (Algeria). *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(3), 09 - 21. <https://doi.org/10.7343/as-2026-1018>