

EDITORIAL MESSAGE

Artificial Intelligence in groundwater hydrology: advancing research and water resources managementRudy Rossetto - *Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italy*

Groundwater is likely the most important freshwater resource on earth supporting drinking water supply, irrigated agriculture, and several aquatic ecosystems. Yet, it remains one of the most complex components of the hydrological cycle to monitor, to model and to manage. Commonly, groundwater studies rely on sparse monitoring wells, or in some cases on limited and dedicated piezometers (for experimental hydrodynamic and hydrochemical monitoring), geophysical investigations, and time and computationally expensive numerical models. On the other hand, Artificial Intelligence (AI) recently emerged as a powerful tool potentially capable of transforming groundwater hydrology by improving prediction, data integration, and, in the end, decision-making in water resources management. A simple SCOPUS database search using as keywords "groundwater" AND "artificial intelligence" shows about 1000 papers published between 2015 (17 documents) and 2025 (129 documents) at an exponential growth rate.

Machine Learning (ML) techniques, such as Artificial Neural Network, Deep Learning, and more in general data-driven modelling, may allow hydrogeologists to analyse large and complex datasets based on different variables more efficiently than ever before (Boo et al., 2026). These datasets, including satellite observations, climate records, pumping data, and hydrogeological information, may lead to identify patterns and relationships difficult to capture with conventional physically-based models.

One of the most promising applications of AI in groundwater hydrology lies in predictive management. ML models have shown strong potential in predicting groundwater levels and quality, estimating recharge rates, supporting vulnerability assessment, and forecasting drought impacts. Water managers often need to make decisions under uncertainty, especially in regions facing climate variability or increasing water demand. AI models may support these decisions by providing near-real-time predictions of groundwater trends, helping authorities in planning sustainable withdrawal strategies and mitigating the risks of aquifer overexploitation.

Nevertheless, relying solely on AI also raises significant challenges. These models depend heavily on the quality and availability of training data, which can be limited or unevenly distributed in the domain under investigation. Furthermore, AI models, generally functioning as "black boxes", do not provide an understanding of the physical processes behind their predictions (Boo et al., 2026). Then, posing the risk of producing results that appear accurate, but lack scientific interpretation and robustness.

The future of groundwater hydrology will likely depend on hybrid approaches that combine AI methods with state-of-the-art physically based models, giving high relevance to human expertise (Zhan et al., 2024). To this, Physics-Informed Neural Networks are a class of ML models that integrate physical laws (commonly expressed as differential equations), prescribing, i.e., conservation of energy or mass (Ma et

L'Intelligenza Artificiale nell'idrologia delle acque sotterranee: nuove prospettive per la ricerca e la gestione delle risorse idricheRudy Rossetto - *Scuola Superiore Sant'Anna, Pisa, Italia*

Le acque sotterranee rappresentano probabilmente la risorsa d'acqua dolce più importante sulla Terra. Sostengono l'approvvigionamento idropotabile, l'agricoltura irrigua e numerosi ecosistemi acquatici. Tuttavia, esse rimangono una delle componenti del ciclo idrologico più complesse da monitorare, modellare e gestire. Comunemente, gli studi idrogeologici si fondano su reti di monitoraggio basate su pochi punti (o in alcuni casi, su di un numero limitato di piezometri per il monitoraggio sperimentale idrodinamico e idrochimico), indagini geofisiche e modelli numerici onerosi in termini di tempo e risorse computazionali. D'altra parte, l'Intelligenza Artificiale (IA) emerge recentemente come uno strumento potente, in grado di trasformare l'idrogeologia migliorando le capacità predittive, l'integrazione dei dati e, infine, i processi decisionali nella gestione delle risorse idriche. Una semplice ricerca nel database SCOPUS utilizzando le parole chiave "groundwater" e "artificial intelligence" fornisce come risultato circa 1000 articoli pubblicati tra il 2015 (17 documenti) e il 2025 (129 documenti) ad un tasso di crescita esponenziale.

Le tecniche di *Machine Learning* (ML), come *Artificial Neural Network*, *Deep Learning* e, più in generale, la modellazione basata sui dati (*data-driven modelling*), possono consentire agli idrogeologi di analizzare numerosi e complessi set di dati che includono diverse variabili in modo più efficiente che mai (Boo et al., 2026). Questi dataset, che comprendono osservazioni satellitari, record climatici, dati di emungimento e informazioni idrogeologiche, possono portare all'identificazione di andamenti e relazioni difficili da identificare con i convenzionali modelli fisicamente-basati.

Una delle applicazioni più promettenti dell'IA nell'idrogeologia risiede nella gestione predittiva. I modelli di ML hanno mostrato un forte potenziale nel prevedere i livelli e la qualità delle acque sotterranee, stimare i tassi di ricarica, supportare le valutazioni della vulnerabilità e prevedere gli impatti della siccità. I gestori dei servizi idrici devono spesso prendere decisioni in condizioni di incertezza, specialmente in regioni che affrontano la variabilità climatica o una crescente domanda idrica. I modelli di IA possono supportare tali decisioni fornendo previsioni quasi in tempo reale degli andamenti delle acque sotterranee, aiutando le autorità nella pianificazione di strategie di prelievo sostenibili e nella mitigazione dei rischi di sovrasfruttamento degli acquiferi.

Tuttavia, affidarsi esclusivamente all'IA comporta sfide significative. Questi modelli dipendono fortemente dalla qualità e dalla disponibilità dei dati di addestramento, che possono essere limitati o distribuiti in modo non uniforme nel dominio oggetto di indagine. Inoltre, i modelli di IA, funzionando generalmente come "scatole nere" (*black boxes*), non forniscono una comprensione dei processi fisici alla base delle loro previsioni (Boo et al., 2026), ponendo quindi il rischio di produrre risultati apparentemente

al., 2026). Such integration can harness the predictive power of AI while maintaining the interpretability and scientific rigor required in environmental sciences and water resources management.

In this issue ...

In this issue, we mainly dive into groundwater chemistry and aquifer vulnerability. Ghaffar et al. (2026) investigated groundwater contamination from Acid Mine Drainage (AMD) in the Pail-Padhrar coal mining area (Pakistan) using hydrogeochemical and isotopic analyses. Results show AMD-affected waters have low pH, high TDS, and SO_4^{2-} chemistry linked to sulfide oxidation. Isotopic evidences indicate rainfall as the main recharge source and identify pyrite oxidation and gypsum dissolution as key contributors to sulfate in groundwater. Ibuot et al. (2026) assessed aquifer vulnerability in Ishielu (Nigeria) by means of geoelectrical surveys, hydraulics, and hydrochemical analyses. Results show moderately permeable aquifers with high vulnerability to contamination, particularly due to shallow water table. Once again, the study recommends land-use control and continuous groundwater quality monitoring to safeguard public health. Finally, Taber et al. (2026) assessed groundwater quality in the Boudinar Basin (Morocco). Results show predominantly Ca-HCO_3 type water, with generally good drinking quality, but localized high salinity issues. On the other hand, irrigation suitability is limited in many areas, highlighting the need for agricultural water management in order to control salinity.

accurati, ma spesso privi di significato e robustezza scientifica.

Il futuro dell'idrologia sotterranea dipenderà probabilmente da approcci ibridi che combinano i metodi di IA con lo stato dell'arte dei modelli fisicamente basati, conferendo grande rilevanza alla capacità interpretativa umana (Zhan et al., 2024). A tal proposito, modelli come *Physics-Informed Neural Networks* rappresentano una classe di modelli di ML che integrano leggi fisiche (comunemente espresse come equazioni differenziali), prescrivendo, ad esempio, la conservazione dell'energia o della massa (Ma et al., 2026). Tale integrazione può sfruttare il potere predittivo dell'IA mantenendo l'interpretabilità e il rigore scientifico richiesti nelle scienze ambientali e nella gestione delle risorse idriche.

In questo numero ...

In questo numero ci concentriamo principalmente sulla chimica delle acque sotterranee e sulla vulnerabilità degli acquiferi. Ghaffar et al. (2026) hanno studiato la contaminazione delle acque sotterranee nei drenaggi acidi di miniera (*Acid Mine Drainage* - AMD) nell'area mineraria di Pail-Padhrar (Pakistan) attraverso analisi idrogeochimiche e isotopiche. I risultati mostrano che le acque influenzate dall'AMD presentano bassi valori di pH, elevati TDS e una composizione chimica dominata da SO_4^{2-} legata all'ossidazione dei solfuri. Le evidenze isotopiche indicano le precipitazioni come principale fonte di ricarica e identificano l'ossidazione della pirite e la dissoluzione del gesso come i principali fattori che contribuiscono al solfato nelle acque sotterranee. Ibuot et al. (2026) hanno valutato la vulnerabilità dell'acquifero a Ishielu (Nigeria) mediante indagini geoelettriche, idrauliche e analisi idrochimiche. I risultati mostrano acquiferi moderatamente permeabili con un'elevata vulnerabilità alla contaminazione, dovuta in particolare alla scarsa profondità della tavola d'acqua. Ancora una volta, lo studio raccomanda il controllo della destinazione d'uso del suolo e un monitoraggio continuo della qualità delle acque sotterranee per salvaguardare la salute pubblica. Infine, Taher et al. (2026) hanno valutato la qualità delle acque sotterranee nel bacino di Boudinar (Marocco). I risultati mostrano acque prevalentemente di tipo Ca-HCO_3 , con una qualità potabile generalmente buona, ma con problemi localizzati di elevata salinità. D'altra parte, l'idoneità all'irrigazione è limitata in molte aree, evidenziando la necessità di una gestione delle acque in agricoltura volta al controllo della salinità.

BIBLIOGRAFIA/REFERENCES

Boo, K.B.W., El-Shafie, A., Othman, F., Khan, M.M.H., Birima, A.H., Ahmed, A.N. Groundwater level forecasting with machine learning models: a review. *Water Res.* (2024), Article 121249. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121249>

Ghaffar, A. (2026). Isotope and geochemical tracing for acid mine drainage impacts in coal mines areas of Pakistan. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(1), 25 - 38. <https://doi.org/10.7343/as-2026-966>

Ibuot, J.C., Obidike, J.S., Obiora, D.N., Obasi, O.C. (2026). An integrated geophysical and hydrogeological approach to aquifer vulnerability mapping: a case study from Ishielu, Ebonyi State. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(1), 09 - 22. <https://doi.org/10.7343/as-2026-928>

Ma, Q., Gong, Q., Ge, W. et al. Physics-informed neural networks for groundwater: evidence, limits, and a roadmap. *Environ Earth Sci* 85, 123 (2026). <https://doi.org/10.1007/s12665-026-12866-9>

Taher, M., Cherkaoui Dekkaki, H., Etebaai, I., Zaki, N., Bourjila, A., Ahari, M.A., Errahmouni, A., Mazzourh, A. (2026). Groundwater quality assessment of the Boudinar Basin (Morocco) for drinking and irrigation purpose. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 15(1), 41 - 52. <https://doi.org/10.7343/as-2026-855>

Zhan C., Dai Z., Yin S., Carroll K. C. & Soltanian M. R. (2024) Conceptualizing future groundwater models through a ternary framework of multisource data, human expertise, and machine intelligence, *Water Research*, 257, 121679. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121679>