

QANAT, UNA TECNOLOGIA DEL PASSATO, UNA RISORSA PER IL FUTURO: RIFERIMENTI STORICI, ASPETTI SOCIO-ECONOMICI E REPERTORIO TIPOLOGICO

1. INTRODUZIONE

Il sistema idraulico sotterraneo dei *qanat* è un esempio di conoscenza dell'ambiente naturale e di sviluppo tecnologico finalizzato allo sfruttamento e alla gestione delle risorse idriche. Un patrimonio materiale e immateriale tramandato nel tempo attraverso le tradizioni e la collaborazione sociale ed economica delle popolazioni che ne hanno usufruito. La realizzazione dei sistemi di *qanat*, oltre a favorire insediamenti e agricoltura in territori aridi e semi-aridi del pianeta, ha ispirato la creazione di uno stile architettonico e paesaggistico specifico delle aree desertiche, che riguarda non solo la costruzione e manutenzione degli stessi *qanat*, ma anche delle strutture ad essi associate come serbatoi d'acqua, pozzi, mulini, sistemi di irrigazione e giardini (e.g. CHARBONNIER, HOPPER 2018).

La prima parte del lavoro illustra le caratteristiche dei *qanat* e il loro significato nel contesto culturale e socio-economico delle popolazioni che nel corso dei secoli hanno utilizzato questo sistema di estrazione delle acque sotterranee per il loro sviluppo e sostentamento. Definire in quante nazioni nel mondo il sistema dei *qanat*, di probabile origine persiana (VI-IV sec. BCE), sia rimasto attivo fino agli ultimi decenni, è operazione complessa proprio in ragione della sua vasta diffusione in molte aree del pianeta: ABDIN (2007), HOFMAN (2007) e BOUSTANI (2008) hanno valutato un numero di 34 o 35 paesi nei quali i *qanat* sarebbero in funzione ancora in epoca moderna.

Più recentemente, REMINI *et al.* (2014), analizzando criticamente oltre 50 articoli scientifici, hanno identificato 52 paesi dove i *qanat* sarebbero stati utilizzati nel corso di molti secoli, per un numero originale di circa 60.000 *qanat* esistenti al mondo, di cui solo il 50% ancora in funzione. Gli stessi Autori sostengono che a metà degli anni '10 del nuovo secolo in moltissime di quelle nazioni l'uso dei *qanat* era in realtà ormai abbandonato, rimanendo preservato esclusivamente in 11 paesi ovvero: Afghanistan, Algeria, Arabia Saudita, Cina, Giordania, Iran, Marocco, Oman, Siria, Tunisia e Yemen.

Confrontando i vari studi riguardo il censimento e lo stato di preservazione dei sistemi di *qanat*, si notano macroscopiche differenze nei numeri e nelle metodologie adottate. La realizzazione di un inventario completo e omogeneo di tutti i *qanat* esistenti al mondo risulterebbe, quindi, un'impresa ardua, se non impossibile. Compatibilmente, dunque, con i limiti propri di un censimento, questo articolo presenta i risultati di uno studio a carattere sia

regionale che locale. Viene descritto nella seconda parte del lavoro, infatti, un repertorio tipologico di circa 7000 *qanat* riconosciuti in diverse nazioni del Medio Oriente, della Penisola Arabica e del Nord Africa, ricostruito attraverso l'analisi di immagini satellitari e lo studio di fonti storico-archeologiche. Il focus e la ricerca bibliografica si sono concentrati sulla regione iraniana così come le attività sul terreno che hanno riguardato alcuni sistemi di *qanat* individuati nel deserto del Kavir, nelle aree di Yazd e Shahrud (KAZEMI *et al.* 2001; BURRI 2009).

Il “Qanat Project” nasce nel 2009 tramite un accordo di collaborazione tra l'allora CNR-IMC (Istituto di Metodologie Chimiche), ora CNR-ISB (Istituto per i Sistemi Biologici), il MAE (Ministero per gli Affari Esteri), il Centro UNESCO per i *qanat* di Yazd (Iran) e l'Università Tecnologica di Shahrud (Iran). Le attività di ricerca sono durate per circa dieci anni prima che, a partire dal 2020, a causa delle limitazioni imposte dalla pandemia da Covid-19, si verificasse un sostanziale rallentamento delle attività (ma non un'interruzione del progetto).

Il database è in continuo stato di aggiornamento, attraverso l'integrazione dei dati raccolti da A. Ferrari negli anni passati, di evidenze geografiche e topografiche desunte da immagini satellitari, dati cartografici e informazioni derivanti dallo studio delle fonti storiche. La struttura del database prevede diversi campi, che includono la localizzazione geografica, la denominazione topografica, la tipologia di *qanat*, lo stato di conservazione di quelli ancora in funzione e di quelli a rischio di abbandono, etc. Il repertorio tipologico dei *qanat*, sebbene in una condizione ancora prototipale, si configura come una banca dati aperta, implementabile e potenzialmente utile allo sviluppo di modelli predittivi per le analisi territoriali, la salvaguardia del patrimonio culturale e la gestione delle risorse idriche negli anni a venire. In quest'ultimo contesto, la presenza dei *qanat* in un territorio può essere considerata come un primo indicatore del potenziale idrico delle falde sotterranee. Un database utile, quindi, anche agli studiosi che sviluppano modelli di soft computing per la scoperta e sfruttamento delle risorse idriche presenti nel sottosuolo (NAGHIBI *et al.* 2018).

2. I QANAT, UN INGEGNOSO SISTEMA IDRAULICO ATTRAVERSO I SECOLI

L'utilizzo dei *qanat* si è tramandato nel tempo raggiungendo l'epoca moderna unitamente a un corredo di usi e tradizioni, e a diverse implicazioni di natura socio-economica. A partire da circa 2500 anni fa, la diffusione di questa tipologia di sistema idraulico su ampia scala ha permesso di affiancare ai sistemi di raccolta e adduzione delle acque, basati sullo sforzo umano o animale, poco efficienti, un nuovo metodo, più efficace e meno dispersivo, di captazione e trasferimento delle risorse idriche presenti nel sottosuolo, fino ad allora non sfruttate.



Fig. 1 – Allineamento di pozzi lungo il *qanat* esteso tra Mojen e Shahrud, Iran.

Il *qanat* consiste essenzialmente in un tunnel sotterraneo a debolissima pendenza (0.3-0.5%) che, partendo da un pozzo madre (“*madar chah*”) realizzato attraverso la perforazione di terreni detritico-alluvionali in regioni montuose o pedemontane, raccoglie per infiltrazione le acque delle falde sotterranee e ne permette, per mezzo della gravità, il trasporto verso i settori di fondovalle e pianura. Pozzi verticali disposti in serie a distanze regolari sul terreno (Fig. 1), inizialmente realizzati per la rimozione e il trasporto in superficie del materiale di scavo del tunnel, permettono di raggiungere il cunicolo per le necessarie ispezioni e garantiscono l’aerazione dell’intero sistema (CRESSEY 1958; GOBLOT 1979; PERRIER, SALKINI 1991). Considerati tra i prodotti più antichi dell’ingegneria idraulica umana, i *qanat* vennero costruiti su una scala spazio-temporale che rivaleggia con gli acquedotti romani e greci. Tuttavia, mentre questi altri tipi di strutture sono quasi ovunque ridotti a rovine, la tecnica dei canali sotterranei è ancora in uso nonostante il declino recente, iniziato a partire dalla seconda metà del secolo scorso.

La distribuzione territoriale dei *qanat* ha seguito l’alternarsi delle fortune e disgrazie degli imperi che si sono succeduti nell’area del Vicino e Medio Oriente, e poi in Africa e nell’Europa meridionale (e.g. ENGLISH 1968), simboleggiando nelle diverse epoche il grado di sviluppo tecnologico e l’organizzazione “industriale” dei governatori Persiani Achemenidi,

Romani, Seleucidi, Arabi, Spagnoli. La loro realizzazione e manutenzione erano assicurate solo presupponendo un controllo del territorio da parte di un potere politico forte e duraturo, garante di una complessa strutturazione dei rapporti sociali (LIGHTFOOT 2000; DAVARPANAH 2005). La funzionalità dei sistemi di *qanat*, infatti, è sempre dipesa dalla possibilità di preservare in buone condizioni i pozzi verticali e il cunicolo sub-orizzontale. Un compito che non poteva essere garantito, se non nelle epoche più remote, da singole famiglie o gruppi ristretti di individui ma esclusivamente da un'autorità temporale stabile, che fosse in grado di coinvolgere e organizzare un numero non trascurabile di persone nella programmazione e realizzazione delle opere di manutenzione.

Viene comunemente accettato che la prima estesa diffusione dei sistemi di *qanat*, la cui origine risalirebbe al tardo VIII sec. BCE, avvenne durante il periodo dell'impero Achemenide (550-331 BCE), che dagli altopiani centrali iraniani aveva esteso i propri confini dall'Indo al Nilo; altre ipotesi sul periodo e territorio d'origine dei *qanat* sono ancora oggetto di discussione (e.g. TIKRITI 2002; MAGEE 2005; GHORBANI 2007; CHARBONNIER 2015). Nel 2016 il patrimonio culturale dei sistemi di *qanat* persiani è stato incluso nella World Heritage List dell'UNESCO (The Persian Qanat: <https://whc.unesco.org/en/list/1506/>).

I regnanti Achemenidi favorirono la realizzazione dei *qanat* permettendo ai costruttori, in alcune regioni, non solo di trarne profitto diretto ma anche di poter mantenere la struttura in eredità alla propria progenie per diverse generazioni (POTTS 1990). È quanto accadde, secondo Polibio (206-124 BCE), quando i Persiani, per indurre gli abitanti della Media a fertilizzare le terre desertiche, le concessero in proprietà a coloro che avessero saputo condurvi acqua (*Hist.*, X, 28). Queste politiche di fatto incentivarono anche le prime opere di manutenzione necessarie al mantenimento della produttività del sistema, determinando le fortune di individui e famiglie locali.

Congiuntamente alle forme di sostegno, il perfezionamento nel tempo delle tecniche costruttive favorì la moltiplicazione dei *qanat* e di numerosi insediamenti lungo le loro tracce, in aree altrimenti inabitabili dell'impero persiano. L'esportazione di tale tecnica avvenne successivamente sia verso O, dalla Mesopotamia alle rive orientali del Mediterraneo, che verso le province persiane più orientali dell'attuale Afghanistan e della Cina occidentale (PEARSE 1973; GOBLOT 1979; PAZWASH 1983).

Nelle epoche successive, una seconda e ampia fase di espansione dei sistemi dei *qanat* verso O si ebbe con le conquiste arabe di Cipro, del Nord Africa e della Spagna. Dalla penisola Iberica, contestualmente alla colonizzazione del continente americano nel XVI e XVII secolo, il sistema dei *qanat* venne esportato anche in Messico, Perù e Cile (GOBLOT 1979; PAPOLI YAZDI 2000).



Fig. 2 – *Muqanni* con gli strumenti di lavoro nel deserto del Kavir, nella regione di Semnan, Iran.

3. TRADIZIONI CULTURALI E ASPETTI SOCIO-ECONOMICI

Oggi giorno i *qanat* sono in uso in molte aree della fascia climatica semi-arida, caratterizzata da alte temperature e basse precipitazioni¹. La maggior diffusione si registra nei paesi del Medio Oriente dove le bocche dei canali sotterranei (*mazhar*) sono spesso situate nelle piazze centrali dei villaggi, nei *suq* (mercati coperti) o nelle moschee, a riprova della centralità di queste opere nella vita sociale. Dalle aree di emergenza l'acqua viene poi distribuita nei villaggi attraverso una rete di canalizzazioni (REMINI *et al.* 2014).

I costruttori di *qanat* in Iran sono chiamati “*muqanni*” (Fig. 2), in Afghanistan “*karezkan*”. Si tratta di figure che godono di grande rispetto e considerazione sociale dal momento che svolgono un lavoro tanto prezioso alla prosperità della comunità quanto pericoloso, considerando i possibili incidenti, anche fatali. I *muqanni* più anziani sono ritenuti benedetti e si recitano preghiere quando scendono nei pozzi a lavorare (HOSSEINI 1997; AFKAMI 1998; LEBLING, STEINMETZ 2014).

In alcuni villaggi iraniani sussistono ancora tradizioni e costumi associati all'economia dei *qanat*, come ad esempio il rito nuziale del “*qanat*

¹ A testimonianza della loro vasta diffusione geografica rimangono i diversi termini con i quali i canali sotterranei vengono indicati nelle diverse regioni del mondo (ABDIN 2007). L'originale termine persiano “*karez*” o “*kariz*”, ancora oggi utilizzato in Iran, Afghanistan e anche in Cina, è stato tramandato nel mondo arabo divenendo “*qanat*” in Paesi come la Siria, la Giordania, l'Iraq e l'Arabia Saudita. In Oman e negli Emirati Arabi Uniti il vocabolo utilizzato è “*falaj*”, o “*aflaj*” al plurale. Nei paesi del Maghreb come la Libia, la Tunisia e l'Algeria il nome comune dei canali sotterranei diventa “*foggara*” mentre in Marocco si declina in “*khettara*”. In Spagna e in alcuni paesi dell'America Latina viene utilizzato il termine “*galaria*”. Altri nomi meno comuni sono “*ain*”, “*auyounes*” in Egitto, “*kanerjing*” in Cina, “*felledj*” in Turchia e Turkmenistan, “*pukios*” in Perù (REMINI *et al.* 2014).

prosciugato”. Un vero matrimonio, una strategia rituale finalizzata a risolvere il problema del depauperamento della risorsa idrica attraverso un intervento di adattamento socio-economico. La donna destinata a “sposare il *qanat*” viene designata tra le vedove bisognose della comunità. Al momento della celebrazione del rito alla sposa viene donata una somma a titolo di dote. Non potendo questa dote provenire dal nuovo consorte gli abitanti del villaggio raccolgono i fondi attraverso un’autotassazione. Poiché la somma di denaro necessaria al mantenimento della sposa è limitata, la quota eccedente viene messa a disposizione per la manutenzione e pulizia del *qanat* (YAZDI, KHANEIKI 2017).

Dal momento che i *qanat* sono essenziali alla prosperità delle popolazioni, sin dal IX secolo CE vennero promulgate molte leggi per regolarne la costruzione (CRESSEY 1958), ispirate alle tradizioni culturali e a comportamenti di buon senso praticati ancora oggi. Ad esempio, la distanza tra un *qanat* in esercizio e uno da costruire deve essere almeno di 12 yards per non compromettere la funzionalità del primo; inoltre, attorno ad ogni entrata di un *qanat* viene stabilito un perimetro ad accesso riservato onde evitare incidenti pericolosi o episodi criminali di inquinamento.

Passando a considerazioni di carattere sociale, si può affermare che il sistema dei *qanat* ha favorito nei secoli i processi di integrazione nei villaggi agricoli e nelle grandi oasi e, più in generale, l’adattamento delle comunità all’ambiente in una maniera ecologicamente sostenibile. In effetti si può parlare di una “cultura sociale” dei *qanat*, che ha regolato per millenni i modelli di comportamento, il modo di vivere e l’organizzazione di intere popolazioni (GHORBANI *et al.* 2021).

Un tema rilevante di natura socio-economica riguarda gli aspetti legati alla gestione dei *qanat*, la cui proprietà esclusiva ha rappresentato nelle diverse epoche un elemento di distinzione sociale. HUMLUM (1950), ad esempio, descrive le differenze nell’Afghanistan moderno tra proprietari terrieri ricchi e poveri in termini di numero di ore a settimana nelle quali essi potevano utilizzare l’acqua distribuita dai *qanat*, distinguendo come agricoltori agiati coloro che godevano di tale privilegio per 24-36 ore e poveri gli altri che invece ne disponevano per sole 1 o 2 ore.

Tuttavia, il bisogno costante di riparazioni lungo l’intero corso dell’opera ha portato sovente a una suddivisione e frammentazione del diritto di proprietà e degli obblighi di cura, facendo prevalere col tempo un modello alternativo di proprietà condivisa. L’origine di tale sistema di frazionamento sembrerebbe risalire a centinaia di anni fa. Un caso significativo proviene dalla città di Ardestan (Iran centrale) dove, nel XII secolo, Hulaku Khan, nipote di Gengis Khan, decise che la proprietà del sistema dei *qanat* venisse ripartita in 21 quote, ciascuna assegnata a un quartiere della città (NAJB, MOHAMMADI 2002).

Tornando all'epoca moderna, la sopravvivenza dei *qanat* è stata seriamente minacciata dalle grandi trasformazioni socio-economiche e demografiche avvenute negli ultimi decenni. Sotto la pressione della crescita e del concentramento della popolazione nelle città a discapito delle aree periferiche e rurali, avvenuto a partire dagli anni '60, si è registrato un forte aumento della richiesta di acqua per uso domestico oltreché agricolo. In quel momento, il sistema dei *qanat* ha evidenziato i suoi limiti nel tenere il passo con lo sviluppo della società e dei suoi fabbisogni, subendo per diverse ragioni un costante declino.

4. IL RECENTE DECLINO DEL SISTEMA DEI QANAT

Accanto alle considerazioni di natura socio-economica e culturale va ricordato che il mantenimento, fino all'epoca moderna, della funzionalità dei sistemi di *qanat* è stato favorito da ragioni di carattere tecnologico. Ad esempio, rispetto a un canale di superficie, la frazione di acqua che si disperde per evaporazione in un *qanat* è sensibilmente inferiore e, inoltre, il sistema non richiede fonti di energia meccanica perché la migrazione delle acque avviene per sola gravità.

Tuttavia, a partire dalla metà del XX secolo lo sviluppo della meccanizzazione in agricoltura in Iran e nel resto dell'area medio-orientale ha prodotto nuovi scenari (e.g. YAZDANPANAH *et al.* 2013), rendendo palesi alcuni inconvenienti che nel complesso hanno contribuito alla progressiva crisi del sistema. È vero che ancora oggi in Iran senza queste strutture centinaia di villaggi non avrebbero accesso alla risorsa idrica (ABDIN 2007), ma il declino dei *qanat* è evidente anche nel paese che maggiormente ne ha conservato l'uso, come testimoniato dai numeri. Secondo diversi Autori, circa 40.000-50.000 *qanat* erano censiti in Iran nel 1958, ma solo poco più di 38.000 erano ancora attivi nel 1966 (CRESSEY 1958; WULFF 1968; GOBLOT 1979; LEBLING, STEINMETZ 2014). Nel 1998-1999 il numero dei *qanat* era diminuito a 20.000-27.000 e agli inizi del nuovo millennio se ne stimavano tra i 18.000 e i 22.000 ancora in funzione (GHAYOUR 2000; POURAGHNAEI, MALEKIAN 2001; GHORBANI 2007; BOUSTANI 2008; LEBLING, STEINMETZ 2014). Altre fonti (GOLDSMITH, HILDYARD 1984; CASTELLANI 2001) riferiscono di 18.000-22.000 *qanat* censiti nel 1981, suggerendo quindi una diminuzione ancora più rapida.

Tra i principali inconvenienti alla radice del declino vanno menzionati gli elevati costi e tempi necessari alla manutenzione e pulizia dei canali, i costi altrettanto elevati per la realizzazione di nuove strutture, la difficoltà di variare la portata a secondo della variazione del fabbisogno e, infine, il verificarsi di eventi calamitosi come gli smottamenti dei terreni sedimentari in cui i *qanat* vengono costruiti (POURAGHNAEI, MALEKIAN 2001; NAJB, MOHAMMADI 2002).

I moderni pozzi di emungimento, protagonisti della rivoluzione tecnologica nell'agricoltura medio-orientale negli ultimi 50-70 anni, richiedono risorse minori per la realizzazione e garantiscono una migliore produttività, vista la capacità di sfruttare l'intero spessore della falda acquifera senza che la portata di estrazione venga eccessivamente influenzata dalle variazioni stagionali del livello freatico (NAJB, MOHAMMADI 2002). CRESSEY (1958) riporta che nell'area di Yazd, nell'Iran centrale, venne costruito nel 1956 un nuovo *qanat* di grandi dimensioni a un costo di circa 10 milioni di rials (1 rial allora corrispondeva a 0,135\$). Vicino ad esso, un pozzo di emungimento da 8 inches equipaggiato da un motore diesel veniva a costare 1,5 milioni di rials.

Ma altre considerazioni farebbero pensare che l'utilizzo dei *qanat* resti favorevole sotto il profilo economico ragionando nel medio e lungo termine. Ancora CRESSEY (1958) propone un interessante confronto. Considerando che un *qanat* di grandezza media ha una lunghezza di 4 km, un pozzo-madre con una profondità di circa 30 m e una portata alla bocca di circa 30 l/sec., realizzare tale struttura costerebbe circa 1 milione di rials, mentre la manutenzione ordinaria annua ne richiederebbe 26.000. Al confronto, un pozzo idraulico a pompa di 6 inches di diametro che realizzi la stessa portata costerebbe inizialmente solo 0,5 milioni di rials, ma la sua manutenzione e il rifornimento energetico richiederebbero circa 82.000 rials/annui; il recupero della maggiore spesa iniziale per il *qanat* si realizzerebbe quindi in circa dieci anni di esercizio.

Va poi considerata la sostenibilità ambientale. I *qanat* estraggono acqua che proviene dalla parte sommitale della falda freatica dove è corrente e fresca, mentre i pozzi nelle aree di pianura estraggono acqua quasi stagnante e/o mineralizzata. Inoltre, l'eccessivo emungimento dei privati, senza un controllo stretto dell'autorità pubblica, può causare un abbassamento significativo della falda freatica e il susseguente depauperamento della portata, sia dei pozzi che dei *qanat*, fino al loro inaridimento.

5. INDICAZIONI PER UN REPERTORIO TIPOLOGICO DEI QANAT

5.1 *Dati di telerilevamento, cartografici e bibliografici*

La prima fase di lavoro per la documentazione dei sistemi di *qanat* a una scala regionale, sub-continentale, è stata avviata procedendo a una fotointerpretazione delle immagini satellitari acquisite dal satellite Landsat (panchromatic di 15 m) e disponibili su Google Earth (Image Origin-ME, CNES, Maxar Technologies, 2019). A differenza delle tracce archeologiche di siti sepolti che necessitano l'elaborazione di immagini multispettrali o iperspettrali ad altissima risoluzione, l'estremità in superficie dei pozzi dei *qanat*, e anche la loro traccia planimetrica, possono essere osservate direttamente attraverso immagini VHR telerilevate, con una risoluzione spaziale di

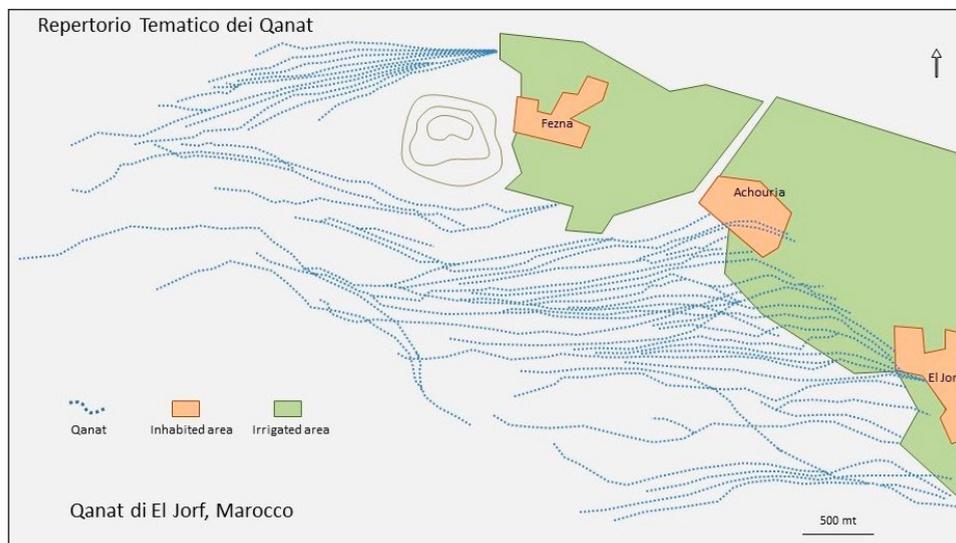


Fig. 3 – Esempio di distinzione e mappatura dei percorsi di un sistema di *qanat*.

1 m, come quelle disponibili appunto su Google Earth. L'utilizzo di Google Earth ha consentito di procedere allo studio di vaste regioni senza affrontare la costosa estrazione di tematismi multispettrali (LUO *et al.* 2014). L'analisi delle immagini telerilevate, supportata da informazioni storiografiche e archeologiche, ha permesso di identificare un considerevole numero di strutture, circa 7000 allo stato attuale delle ricerche (Tab. 1), in diverse nazioni comprese tra Nord Africa, Medio Oriente, Penisola Arabica e Cina, riuscendo a discriminare strutture lineari che procedono parallelamente anche a distanza di poche decine di metri (Fig. 3).

Sebbene le immagini Landsat non forniscano informazioni radiometriche, in alcuni casi hanno reso possibile rilevare anomalie circolari nel colore del suolo intorno ai pozzi. Evidenze riconducibili, in via interpretativa, a una condizione di abbandono del *qanat* (SOROUSH *et al.* 2020). Non è stato possibile invece, nella maggioranza delle strutture analizzate, distinguere dal telerilevamento gli interventi di ripristino o di restauro, anche laddove se ne aveva notizia.

Per quanto concerne l'analisi di maggior dettaglio del territorio iraniano di Yazd e Shahrud, all'analisi delle immagini satellitari si sono affiancate: i) un'attività di fotointerpretazione di immagini aeree fornite dall'Università Tecnologica di Shahrud; ii) la lettura della Carta Topografica NJ 40-13 in scala 1:250.000 pubblicata dall'AMECO (Army Map service Corps of Engineers, USA), Serie K502 (edizione 3), del 1961; iii) i rilievi GPS sul terreno, effettuati



Fig. 4 – Rilievi del *qanat* di Bear Jomand, Iran. Misurazione della quota e della profondità di un pozzo.

in un intervallo temporale esteso dal 2009 al 2014 tramite strumentazione GARMIN eTrex serie HC.

Inoltre, va sottolineata l'importanza delle informazioni desunte da rapporti relativi a ricognizioni archeologiche e storiche, o estraibili da contributi scientifici, nella implementazione dei record del database. Attraverso tali fonti sono stati inventariati alcuni *qanat* le cui tracce sul terreno erano oramai scomparse o non più identificabili attraverso il telerilevamento. Un esempio viene dalle zone aride confinanti con l'insediamento di Petra, in Giordania, ove dei molti *qanat* segnalati nei pressi di Udhruh e di Ma'an, è stato possibile riscontrare tramite immagini telerilevate solo labili evidenze delle strutture associate (BURRI *et al.* 2021).

5.2 L'analisi tipologica e la struttura della banca dati

La seconda fase del lavoro ha riguardato la definizione delle caratteristiche tipologiche dei *qanat* (elementi geografici, topografici, geometrici, condizioni di servizio, stato d'esercizio, etc.), corrispondenti ai contenuti del database, e la caratterizzazione delle singole strutture. Questa fase si è rivelata non priva di criticità per la presenza di alcuni casi di difficile catalogazione in quanto molto spesso, lungo uno stesso sistema di condotte sotterranee, coesistono sia tipologie diverse di *qanat* (per lunghezza, profondità dei pozzi, portata d'acqua, etc.) che scelte conservative di vario tipo (da basse porzioni murarie a protezione dell'ingresso del pozzo a semplici coperchi in cemento).

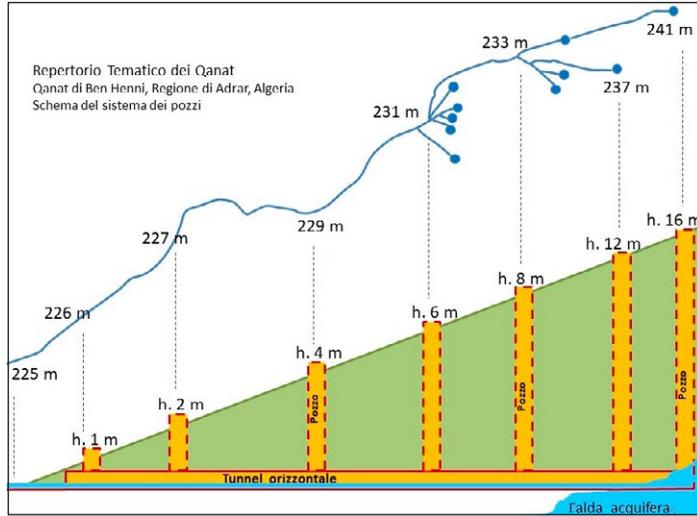


Fig. 5 – Schema planimetrico (in alto) e ricostruzione grafica in sezione del sistema di *qanat* di Ben Henni, Algeria.

Molti dei dati geografici relativi ai *qanat*, come l'altitudine, la latitudine e la longitudine, sono stati dedotti dalle immagini satellitari. Assieme ai dati topografici rilevati sul terreno (Fig. 4), queste informazioni hanno permesso di delineare, per ogni singola struttura, uno schema esemplificativo della lunghezza planimetrica del *qanat* e della profondità dei pozzi verticali (Fig. 5). Infatti, tramite le immagini di Google Earth si calcola l'altitudine del pozzo considerato (ad es. 1000 m) e a questa si sottrae l'altitudine della bocca del *qanat* (ad es. 900 m): considerando la debolissima pendenza del tunnel sotterraneo, la profondità del pozzo risulterà quindi di 100 m circa.

La banca dati progettata appositamente per questa ricerca è un database relazionale locale realizzato con Microsoft Access. Esteriormente l'interfaccia del database si presenta con l'apertura in Autorun di un menù in cui sono inseriti pulsanti di comando che permettono di accedere ad alcune funzioni della banca dati, quali l'implementazione del censimento dei *qanat*, la consultazione dei *qanat* schedati, la generazione di report e la loro esportazione in formato .pdf.

Dalla schermata principale si accede alle maschere di compilazione o consultazione dei dati (Fig. 6). Le maschere, nella versione attuale della banca dati, sono divise in due parti. La prima parte riporta le notizie relative al "sistema" di *qanat* censito (intendendo per "sistema" il *qanat* principale e tutti i suoi bracci secondari), con le relative informazioni riguardo la fonte del censimento e la localizzazione geografica del "sistema" analizzato. La

Qanat aggiorna ESCI

ID_atq_QS: 1 ID qs: AF.02.002 Compiler: Angelo Ferrari, CNR - Rome, Italy

Nation: Algeria Region/Area: Adrar Municipality: Akabli People: 10100

Latitude: 26°42'41.45"N Longitude: 1°22'14.02"E Altitude: 231 Length: 54.180,00

| q_s ID qs | ID q | Length | MW Lat | MW Lon | MW Alt | MW Dep | Condition | Use |
|-------------|------------|----------|---------------|--------------|--------|--------|-----------|------------|
| 1 AF.02.002 | AF.02.002a | 3.824,00 | 26°44'15.85"N | 1°21'9.71"E | 236 | 21 | Working | Social |
| 2 AF.02.002 | AF.02.002b | 2.893,00 | 26°43'33.24"N | 1°21'7.07"E | 231 | 20 | Working | Mix |
| 3 AF.02.002 | AF.02.002c | 2.686,00 | 26°43'21.39"N | 1°21'21.81"E | 228 | 17 | Working | Mix |
| 4 AF.02.002 | AF.02.002d | 2.811,00 | 26°43'13.18"N | 1°21'40.60"E | 230 | 27 | Working | Irrigation |
| 5 AF.02.002 | AF.02.002e | 3.658,00 | 26°44'31.20"N | 1°22'29.04"E | 245 | 17 | Working | Mix |
| 6 AF.02.002 | AF.02.002f | 3.821,00 | 26°44'55.11"N | 1°22'43.05"E | 250 | 18 | Working | Mix |
| 7 AF.02.002 | AF.02.002g | 3.923,00 | 26°44'46.97"N | 1°23'14.44"E | 252 | 20 | Working | Mix |
| 8 AF.02.002 | AF.02.002h | 1.842,00 | 26°43'40.87"N | 1°22'50.33"E | 241 | 10 | Working | Mix |
| 9 AF.02.002 | AF.02.002i | 3.507,00 | 26°44'26.92"N | 1°23'16.11"E | 249 | 20 | Working | Mix |

Records: 14 di 16

Fig. 6 – Database dei *qanat*: maschera di inserimento dati.

seconda parte della maschera contiene i dati di tutti i singoli *qanat* appartenenti al “sistema” considerato e riporta i dati di geolocalizzazione, quelli relativi all’altitudine e alla lunghezza di ogni singolo tunnel, il suo attuale stato e l’uso a cui è adibito. Sia il “sistema” di *qanat* che il singolo *qanat* sono catalogati con un codice alfanumerico che ne fornisce l’identità e la fonte.

Per ottenere questo sistema di consultazione, i dati raccolti sono stati atomizzati in unità minime al fine di poter usufruire di eventuali ricorrenze e ampliare il ventaglio di possibili future interazioni fra i dati stessi e nuove prospettive di ricerca. L’atomizzazione delle informazioni è stata ottenuta attraverso l’uso di tabelle con chiave identificativa univoca, e non duplicabile, in modo da gestire i necessari collegamenti attraverso la creazione di apposite query di aggiornamento delle tabelle tra loro relazionate. In questa maniera si è evitato di compilare i dati seguendo uno schema simile a quello di un foglio di calcolo, per poter permettere future interrogazioni gestite direttamente dal software ed evitare errori nella compilazione di quei dati che risultano ricorrenti e parametrizzabili, come lo stato del *qanat* o il suo utilizzo.

L’implementazione dei dati è affidata a una maschera di immissione che consente all’utente di inserire un nuovo sistema di *qanat* o implementarne uno già in parte censito. La presenza di caselle combinate permette, grazie all’uso di appositi menù a tendina, di inserire i dati ricorrenti già parametrizzati o di inserire un nuovo parametro. L’incremento numerico dei dati attraverso apposita maschera dà la possibilità all’utente di inserire, attraverso un’unica schermata, i dati su tabelle differenti e quindi di mantenere il dato nuovo all’interno di una struttura frammentata e relazionale (Fig. 7). I report di

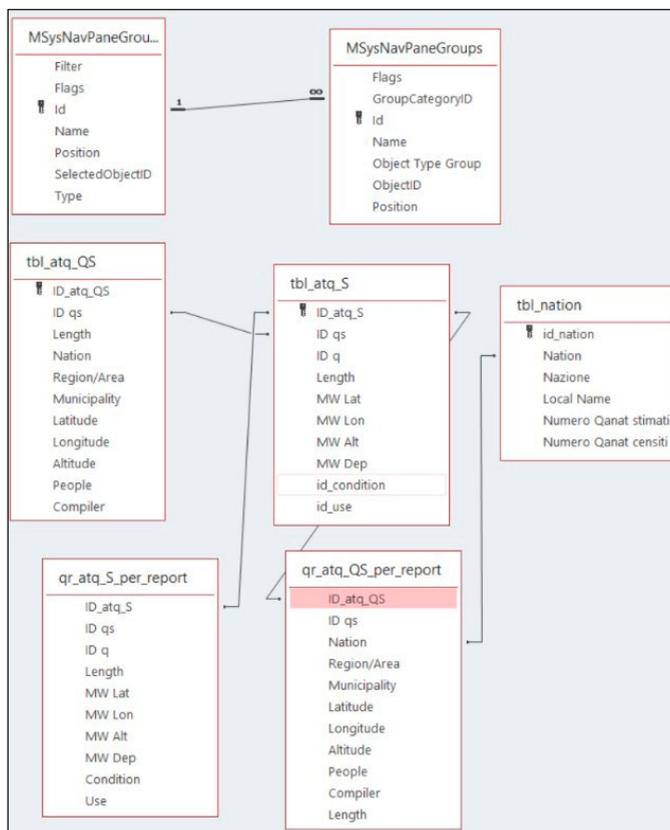


Fig. 7 – Database dei *qanat*: relazioni principali.

ricerca sono visualizzabili attraverso un'apposita maschera oppure esportabili in formato .pdf; attualmente sono organizzati unicamente per “sistema” di *qanat* con una rappresentazione grafica di tipo piramidale, che vede all'apice il “sistema” e alla base i singoli *qanat* che lo compongono con tutte le informazioni correlate (Fig. 8).

La banca dati è in continuo aggiornamento e ciò si riflette anche sulla sua composizione e sulle *query* di ricerca: questa struttura relazionale è stata volutamente progettata per poter ampliare le possibilità di interrogazione del software, evitando la compilazione di comandi attraverso macro, ma gestendo le ricerche attraverso stringhe in SQL. La prospettiva futura dell'uso di questa banca dati è quella di permettere la possibilità di ricercare informazioni sui *qanat* censiti non solo attraverso i sistemi a cui appartengono, ma anche partendo da diverse tipologie, come l'area geografica di appartenenza oppure

| | |
|-------------------|-----------------------------------|
| ID Qanat System | AF.02.002 |
| Nation | Algeria |
| Region/Area | Adrar |
| Municipality | Akabli |
| People | 10100 |
| Latitude | 26°42'41.45"N |
| Longitude | 1°22'14.02"E |
| Elevation mt | 231 |
| Overall Length mt | 54.180,00 |
| Comoller | Angelo Ferrari, CNR - Rome, Italy |

| | | | | | |
|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| ID Qanat | AF.02.002a | ID Qanat | AF.02.002b | ID Qanat | AF.02.002c |
| Overall Length mt | 3.824,00 | Overall Length mt | 2.893,00 | Overall Length mt | 2.686,00 |
| Main Well: lat. | 26°44'15.85"N | Main Well: lat. | 26°43'33.24"N | Main Well: lat. | 26°43'21.39"N |
| Main Well: lon. | 1°21'9.71"E | Main Well: lon. | 1°21'7.07"E | Main Well: lon. | 1°21'21.81"E |
| Main Well: Alt. mt | 236 | Main Well: Alt. mt | 231 | Main Well: Alt. mt | 228 |
| Main Well: dep. mt | 21 | Main Well: dep. mt | 20 | Main Well: dep. mt | 17 |
| Condition (w./not w.) | Working | Condition (w./not w.) | Working | Condition (w./not w.) | Working |
| Use (irrig., social, mix) | Social | Use (irrig., social, mix) | Mix | Use (irrig., social, mix) | Mix |

| | | | | | |
|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|---------------------------|---------------|
| ID Qanat | AF.02.002d | ID Qanat | AF.02.002e | ID Qanat | AF.02.002f |
| Overall Length mt | 2.811,00 | Overall Length mt | 3.658,00 | Overall Length mt | 3.821,00 |
| Main Well: lat. | 26°43'13.18"N | Main Well: lat. | 26°44'31.20"N | Main Well: lat. | 26°44'55.11"N |
| Main Well: lon. | 1°21'40.60"E | Main Well: lon. | 1°22'29.04"E | Main Well: lon. | 1°22'43.05"E |
| Main Well: Alt. mt | 230 | Main Well: Alt. mt | 245 | Main Well: Alt. mt | 250 |
| Main Well: dep. mt | 27 | Main Well: dep. mt | 17 | Main Well: dep. mt | 18 |
| Condition (w./not w.) | Working | Condition (w./not w.) | Working | Condition (w./not w.) | Working |
| Use (irrig., social, mix) | Irrigation | Use (irrig., social, mix) | Mix | Use (irrig., social, mix) | Mix |

Fig. 8 – Esempio scheda dati del repertorio tipologico dei *qanat*.

l'uso o lo stato di conservazione o le dimensioni e profondità, evitando una ricerca full text, ma usando le potenzialità offerte dalle relazioni e quindi dalla parametrizzazione dei dati.

In allegato al database del repertorio tipologico dei *qanat* è stata prevista come output del database una schedatura per ogni singolo *qanat* in grado di riassumerne le connotazioni principali (Fig. 9). Tale schedatura trae origine da quella utilizzata da decenni nella formulazione del catasto delle cavità artificiali in Italia e che ha visto numerose applicazioni (DI LABIO 2004; <https://catastoartificiali.speleo.it/cholos/cavelogin.php>). La struttura della scheda prevede i seguenti campi:

- 1) Numero di inventario; assegnato alla singola opera idraulica, è suddiviso in due parti: il numero progressivo proprio e quello dell'area, ovvero della maglia topografica di riferimento;
- 2) Nazione di appartenenza;
- 3) Regione oppure area geografica di riferimento;

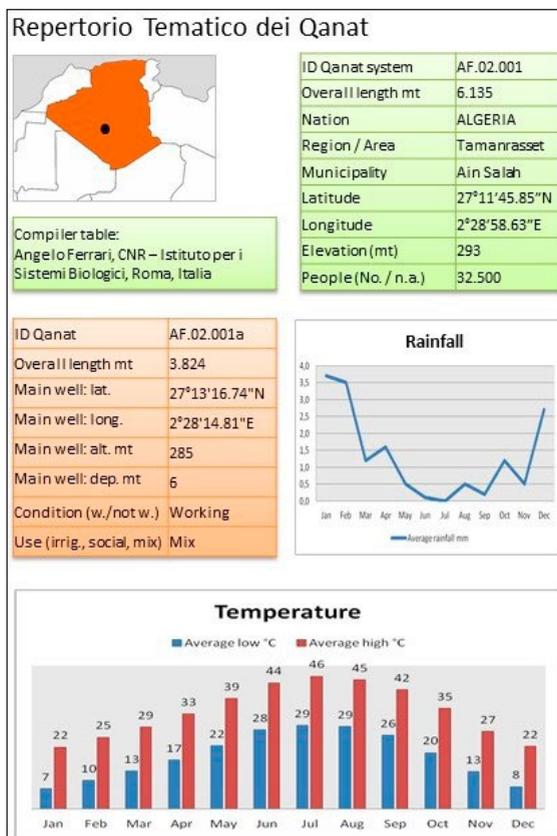


Fig. 9 – Esempio scheda dati del repertorio tipologico dei qanat.

- 4) Denominazione della struttura. Come accennato in precedenza (cfr. § 3), il termine *qanat* è diffuso solo in alcune aree e altrove è presente con la stessa tipologia morfologica ma differente denominazione. In questo caso viene utilizzata quella specifica dell'area con la traslitterazione in alfabeto latino;
- 5) Localizzazione topografica. Vengono indicate le coordinate topografiche espresse in latitudine, longitudine e altezza s.l.m. Il punto di riferimento è quello dello sbocco del canale all'aperto. Se l'ingresso è franato, ostruito e non più evidenziabile, viene utilizzato quello dell'ultimo pozzo posto più a valle;
- 6) Lunghezza. Viene considerata quella totale, ovvero comprensiva di diramazioni a partire dal pozzo principale o pozzo madre;
- 7) Presenza di bracci o derivazioni. Vengono indicati quelli che si dipartono o si congiungono al tracciato principale;

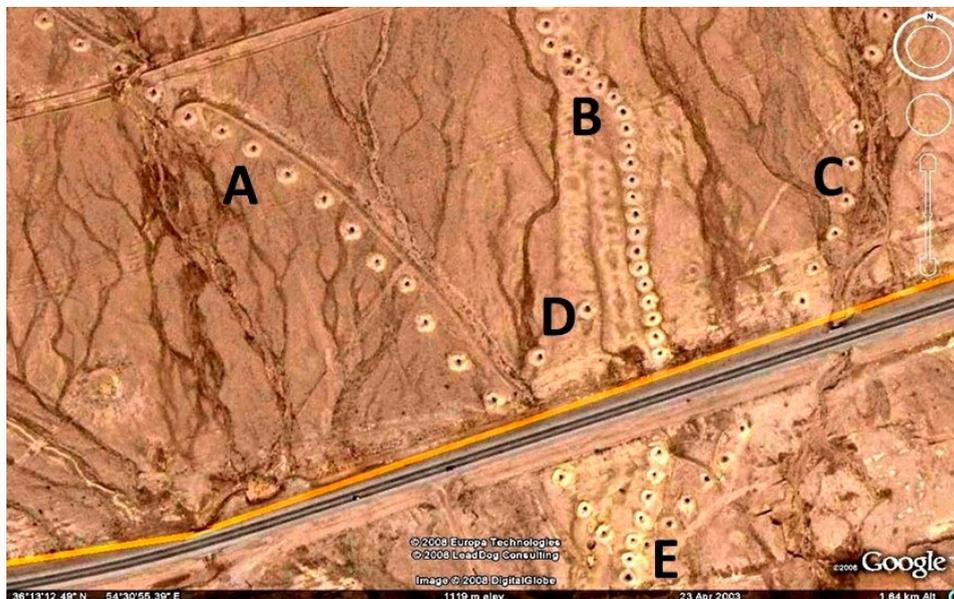


Fig. 10 – Immagine satellitare dei *qanat* di Damghan, Iran.

- 8) Numero dei pozzi. Possibilmente distinti tra quelli pervi e quelli occlusi;
- 9) Profondità del pozzo principale o pozzo madre;
- 10) Stato di conservazione: ottimo, buono, mediocre, pessimo, distrutto;
- 11) Stato funzionale: continuativo, saltuario (stagionale), abbandonato;
- 12) Utilizzo: irrigazione, usi sociali, misto;
- 13) Dati di complemento: portata, parametri chimico/fisici delle acque, presenza di gas radon, etc.;
- 14) Note aggiuntive;
- 15) Documentazione fotografica di riferimento;
- 16) Bibliografia di riferimento;
- 17) Compilatore e struttura di riferimento.

Un esempio di “sistema” di *qanat* incluso nel database è rappresentato da alcuni rami del *qanat* di Damghan (Fig. 10), nell’Iran settentrionale (SAJJADI 1982; YAZDI, KHANEIKI 2010). Il ramo A del sistema presenta i pozzi a una distanza regolare, evidenza che suggerisce una certa compattezza del suolo. Diversamente il ramo B è caratterizzato da una sequenza estremamente ravvicinata dei pozzi, indice di una relativa facilità di scavo in un terreno poco compatto e, infatti, sia a destra che a sinistra del ramo B si notano le tracce di precedenti rami in disuso in seguito a crolli. Ancora,

| Nazione | N° <i>qanat</i> |
|---------------------|-----------------|
| Afghanistan | 1172 |
| Algeria | 527 |
| Arabia Saudita | 0 |
| Azerbaijan | 14 |
| Cina | 403 |
| Emirati Arabi Uniti | 2 |
| Egitto | 17 |
| Giordania | 9 |
| Iran | 3813 |
| Iraq | 28 |
| Israele | 5 |
| Kazakistan | 16 |
| Libia | 124 |
| Marocco | 527 |
| Oman | 149 |
| Pakistan | 112 |
| Siria | 23 |
| Tunisia | 124 |
| Turkmenistan | 44 |
| Uzbekistan | 27 |
| Yemen | 1 |

Tab. 1 – Numero dei *qanat* riconosciuti nei diversi paesi e inclusi nell'inventario.

| Nazione | Località | Pozzo madre | | Lunghezza (m) | Uso | Anno di studio |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| | | Latitudine | Longitudine | | | |
| Iran | Yazd | 31°50'11.94"N | 54°33'2.83"E | 10.662 | Sociale | 2017 |
| Iran | Mojen | 36°29'0.25"N | 54°52'19.21"E | 9.754 | Irrigazione | 2009 |
| Iran | Amirabad | 35°59'57.18"N | 54°6'45.25"E | 5.985 | Irrigazione | 2009 |
| Iran | Bearjomand | 36°6'57.37"N | 55°45'33.17"E | 5.123 | Misto | 2008 |
| Iran | Shahrud | 36°27'49.25"N | 54°57'44.87"E | 4.181 | Sociale | 2018 |
| Iran | Torud | 35°26'20.70"N | 55°0'45.22"E | 2.914 | Misto | 2008 |

Tab. 2 – Sintesi di una query del database che raggruppa alcuni *qanat* dell'Iran centro-settentrionale, in ordine di lunghezza. Nella penultima colonna viene indicato l'utilizzo prevalente del *qanat* e nell'ultima colonna è inserito l'anno di studio del *qanat* da parte del team CNR (Italia) - Università Tecnologica di Shahrud (Iran) - Centro UNESCO di Yazd (Iran).

il ramo C presenta i crateri costituiti dal materiale di scavo di dimensioni relativamente piccole, segnalando che i pozzi sono poco profondi (considerato che questo ramo si estende lungo il percorso di un piccolo *wadi*). Il ramo D, infine, rappresenta un collettore di collegamento tra i rami A e B, con lo scopo di regolare eventuali differenze di portata delle acque sotterranee. Il punto E, situato oltre la superstrada che conduce a Teheran, indica la confluenza dei tre rami A, B e C.

6. DISCUSSIONI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nelle zone aree aride e semi-aride del pianeta, le acque sotterranee costituiscono un'importante risorsa per le attività agricole, domestiche e industriali. Tuttavia, il continuo incremento della domanda di acqua a causa della crescita della popolazione, soprattutto nelle aree del Medio Oriente, ha provocato negli ultimi decenni una fase di forte squilibrio nella gestione della risorsa idrica. I mutamenti demografici e socio-economici hanno prodotto, come prima risposta, la proliferazione dei pozzi profondi per l'emungimento delle falde sotterranee, proprio nelle aree prima interessate dalla presenza dei sistemi di *qanat*.

I processi di cambiamento climatico in atto anche in Medio Oriente rafforzano l'esigenza di sviluppare una governance adattiva alla crisi idrologiche legata all'aumento della siccità e delle improvvise inondazioni (MADANI, 2014; MAHMOUD, ALAZABA 2016). Negli ultimi anni, in diversi ambiti, sono stati promossi e attuati progetti di Flood Water System Management con l'obiettivo di sperimentare nuove soluzioni (e.g. PAHL-WOSTL *et al.* 2011) o rivalutare antichi sistemi per mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici sullo sviluppo della regione. A dispetto del declino attraversato negli ultimi decenni, il sistema dei *qanat* è tornato allora all'attenzione di studiosi e autorità locali (EBRAHIMI *et al.* 2021; MAHAQI 2021) configurandosi come un modello ecologicamente sostenibile, che favorisce il giusto rapporto tra le mutate esigenze antropiche e una gestione equilibrata della risorsa idrica.

In tale scenario, uno strumento informatico come il database dei *qanat* presentato in questo lavoro può offrire un contributo significativo. Infatti, i dati inseriti nell'inventario tipologico consentono di selezionare le strutture idrauliche in riferimento alla loro ubicazione territoriale, partendo dalla nazione per poi scendere nel dettaglio, attraverso la regione e la località, fino alle coordinate geografiche del singolo pozzo madre. Inoltre, i *qanat* possono essere raggruppati in relazione alla latitudine, alla lunghezza del percorso, all'altitudine del pozzo madre o alla profondità di questo. Ulteriori dati utili e deducibili dal database sono lo stato di conservazione attuale in cui si trova la struttura idraulica e la tipologia di utilizzo della risorsa idrica, cioè per scopi irrigui, domestici (sociali) oppure entrambi. Nel corso delle campagne svolte in Iran, nel territorio circostante le aree di Yazd e Shahrud, sono stati rilevati ulteriori parametri relativi alla presenza del gas radon nei pozzi, alla portata delle acque e ad altri valori chimico-fisici, oltre a quelli climatici, come la temperatura, la piovosità, l'umidità, etc.; questi ultimi non sono stati ancora inseriti nel database perché i dati disponibili erano esigui.

Infine, l'implementazione di dati climatici, rilevati nel periodo invernale nelle aree montane dei pozzi madre, consentirà di delineare un modello per

prevedere, con buona approssimazione, la portata d'acqua dei vari *qanat* nel periodo estivo. Questo aspetto particolare della funzionalità del database rientra nell'accordo siglato tra il CNR-ISB e il ICQHS (International Center on Qanats and Historic Hydraulic Structure) di Yazd in Iran nell'aprile del 2017.

In conclusione, sarebbe auspicabile per il futuro la realizzazione di una piattaforma internazionale, un Hub Center, nel quale ricercatori e studiosi dei singoli paesi possano inserire i propri dati, in modo da costituire una unica banca dati relazionale, di tipo Open Space, al servizio dei soggetti interessati, in maniera da favorire l'incremento delle conoscenze e la cooperazione nelle strategie per la salvaguardia e l'utilizzo dei sistemi di *qanat*. Un repertorio in grado di fornire le informazioni necessarie per l'attuazione di diverse misure di governance, riguardanti la rimessa in efficienza delle strutture deteriorate, il supporto alla coltivazione delle piante indigene, il sostegno economico per i periodi di siccità, il mantenimento delle strutture e, infine, la sensibilizzazione dell'opinione pubblica nei confronti di una gestione delle acque oculata e rispettosa dell'ambiente. La rivitalizzazione dei *qanat*, infatti, non dovrà essere confinata a un romantico "ritorno al passato"; al contrario, per rispondere ai moderni bisogni socio-economici diventa necessario partire da una pianificazione territoriale basata su un sistematico censimento dei *qanat*, aperto alla comunità scientifica e alle istituzioni.

SIMONA BOCCUTI*, ANGELO FERRARI, GIANNI PINGUE

Istituto per i Sistemi Biologici (ISB) - CNR

simona.boccuti@cnr.it, angelo ferrari54@gmail.com, giannipingue@gmail.com

EMILIANO DI LUZIO

Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria (IGAG) - CNR

emiliano.diluzio@igag.cnr.it

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato finanziato dal CNR-ISB (Istituto per i Sistemi Biologici), Università Tecnologica di Shahrud (accordo del 2009-2019), UNESCO-ICQHHS, International Center on Qanats and Historic Hydraulic Structure, Office in Yazd (accordo del 2017) e il MAE Ministero Affari Esteri (accordi 2008, 2009, 2010). Diverse Università, Istituzioni e Società hanno collaborato a vario titolo alla ricerca: i) Università dell'Aquila, Dip. di Scienze Ambientali; ii) Università di Milano Bicocca, Dip. Scienze dei Materiali; iii) Università di Firenze, Dip. Archeologia Medioevale; iv) Università del Molise, Laboratori di Scienze e tecnologie agrarie e alimentari, Sapienza Università di Roma, Dip. Scienze della Terra; v) Società Speleologica Italiana; vi) Istituto Tecnico Agrario "E. Sereni" di Roma; vii) AGAT, Associazione Geografica Ambiente e Territorio.

* Corresponding Author.

BIBLIOGRAFIA

- ABDIN S. 2007, *Qanat a unique groundwater management tool in arid regions: The case of Bam region in Iran*, in *The Global Importance of Groundwater in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability (ISGWAS) (Alicante 2006)*, Westerville, US, NGWA Press, 79-87.
- AFKHAMI A. 1998, *Disease and water supply: The case of cholera in 19th century Iran*, «Yale School of Forestry and Environmental Studies Bulletin Series», 103, 205-220.
- BOUSTANI F. 2008, *Sustainable water utilization in arid region of Iran by qanats*, «World Academy of Science Engineering and Technology», 43, 213-216.
- BURRI E. 2009, *Underground water transport systems for land management in the ancient work: From the Mediterranean regions to the near and middle east*, *Proceedings of International Conference on Water Resources (ICWR): Emphasis on Regional Development (Shahrud, Iran, 2009)*, Shahrud University of Technology, 10-23.
- BURRI E., DEL BON A., FERRARI A., RAGNI P. 2021, *Qanat dimenticati: Ma'An, Udhrub, Uweinid*, Roma, Ed. Valmar.
- CASTELLANI V. 2001, *Acqua, acquedotti e qanāt*, «Opera Ipogea», 3, 2, 25-32.
- CHARBONNIER J. 2015, *Groundwater management in Southeast Arabia from the Bronze Age to the Iron Age: A critical reassessment*, «Water History» 7, 39-71 (<https://doi.org/10.1007/s12685-014-0110-x>).
- CHARBONNIER J., HOPPER K. 2018, *The Qanat: A multidisciplinary and diachronic approach to the study of groundwater catchment systems in archaeology*, «Water History», 10, 3-11 (<https://doi.org/10.1007/s12685-018-0214-9>).
- CRESSEY G.B. 1958, *Qanats, karez and foggaras*, «Geographical Review», 48, 1, 27-44.
- DAVARPANAH G. 2005, *Comparable survey of benefits and disadvantages from ground water to the method of wells and qanats*, *Proceedings of the 2nd International Conference on Qanat (Kerman, Iran)*, Iranian academic center for education, culture and research.
- DI LABIO E. 2004, *Il catasto nazionale delle cavità artificiali*, «Opera Ipogea», 2, 3, 1-80.
- EBRAHIMI A., MEHRABAN Y., OMI DVARBORNA H., VAKILINEJAD A., RAZAK S., AL-SAYIGH A. 2021, *Kariz (Ancient Aqueduct) system: A review on geoengineering and environmental studies*, «Environmental Earth Science», 80, 236 (<https://doi.org/10.1007/s12665-021-09545-2>).
- ENGLISH P. 1968, *The origin and spread of qanats in the Old World*, «American Philosophical Society», 112, 170-181.
- GHAYOUR H. 2000, *A new review on geographical distribution of qanats in different regions of Iran*, in *Proceedings of the First International Conference on Qanat (Yazd, Iran)*, 23-34.
- GHOORBANI B. 2007, *A glance at historical Qanats in Iran with an emphasis on Vazvan Qanat in Isfahan*, in *Proceedings of International History Seminar on Irrigation and Drainage, Teheran, Iran*, International Commission on Irrigation and Drainage (ICID), 165-172.
- GHOORBANI M., ESKANDARI-DAMANEH H., COTTON M., GHOOSHANI O.M., BORJI M. 2021, *Harnessing indigenous knowledge for climate change-resilient water management – lessons from an ethnographic case study in Iran*, «Climate and Development», 13(9), 766-779 (<https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1841601>).
- GOBLOT H. 1979, *Les Qanats. Une technique d'acquisition de L'Eau*, Paris, Mouton.
- GOLDSMITH E., HILDYARD N. 1984, *The Qanat of Iran, The Social and Environmental Effects of Large Dams*, 1, Camelford (UK), Wadebridge Ecological Centre.
- HOFMAN A. 2007, *Traditional water management by qanat in Iran is compatible with the concept of IWRM?*, Technical synthesis, Engref center of Montpellier, France.
- HOSSEINI S.A. 1997, *Storage and conservation of rainwater in the underground natural resources*, in B. AMINIPOURI (ed.), *Proceedings of the 8th International Conference on Rainwater Catchment Systems: Rainwater Catchment for Survival (Tehran 1997)*, International Rainwater Catchment Systems Association.

- HUMLUM J. 1950, *L'agriculture par irrigation en Afghanistan*, in *Comptes rendus du Congrès International de Géographie (Lisbon 1949)*, Lisbonne, Union Geographique Internationale, 318-328.
- KAZEMI G.A., FARDOOST F., KARAMI G.H. 2001, *Hydrogeology and groundwater quality of Shahrood region, Iran*, in K.P. SEILER, S. WOHLINCH (eds.), *Proceedings of 31st IAH Congress on New Approaches Characterizing Groundwater Flow*, Lisse, Swets and Zeitlinger.
- LEBLING R.W., STEINMETZ G. 2014, *The water below*, «Saudi Aramco World», 65, 32-35.
- LIGHTFOOT D.R. 2000, *The origin and diffusion of qanats in Arabia: New evidence from the Northern and Southern Peninsula*, «The Geographical Journal», 166, 215-226.
- LUO L., WANG X., GUO H., LIU C., LIU J., LI L., DU X., QIAN G. 2014, *Automated extraction of the archaeological tops of qanat shafts from VHR imagery in Google Earth*, «Remote Sensing», 6, 11956-11976 (<https://doi.org/10.3390/rs61211956>).
- MADANI K. 2014, *Water management in Iran: What is causing the looming crisis?*, «Journal of Environmental Studies and Sciences», 4, 315-328 (<https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>).
- MAGEE P. 2005, *The chronology and environmental background of Iron Age settlement in Southeastern Iran and the question of the origin of the qanat irrigation system*, «Iranica Antiqua», 11, 217-231.
- MAHAQI A. 2021, *Traditional water management systems in Afghanistan: Lessons for the future*, «Arabian Journal of Geosciences», 14, 1465 (<https://doi.org/10.1007/s12517-021-07987-3>).
- MAHMOUD S.H., ALAZABA A.A. 2016, *Towards a sustainable capital city: An approach for flood management and artificial recharge in naturally water-scarce regions, central region of Saudi Arabia*, «Arabian Journal of Geosciences», 9, 92 (<https://doi.org/10.1007/s12517-015-2021-2>).
- NAGHIBI S.A., POURGHASEMI H.R., ABBASPOUR K. 2018, *A comparison between ten advanced and soft computing models for groundwater qanat potential assessment in Iran using R and GIS*, «Theoretical and Applied Climatology», 131, 967-984 (<https://doi.org/10.1007/s00704-016-2022-4>).
- NAJB H.R., MOHAMMADI K. 2002, *Decline of qanats in Iran: Reasons and potential solutions*, in V.P. SINGH, M. AL-RASHED, M.M. SHERIF (eds.), *Proceeding of the International Conference on Water Resources Management in Arid Regions (Dubai 2002)*, Kuwait, Balkema Press.
- PAHL-WOSTL C., JEFFREY P., ISENDAHL N., BRUGNAC M. 2011, *Maturing the New Water Management Paradigm: Progressing from Aspiration to Practice*, «Water Resources Management», 25, 837-856 (<https://doi.org/10.1007/s11269-010-9729-2>).
- PAPOLI YAZDI M.H. 2000, *Qanats and its economic value*, in *Proceedings of the First International Conference on Qanat (Yazd, Iran)*, 9-22.
- PAZWASH N. 1983, *Iran's mode of modernization: Greening the desert, deserting the greenery*, «Civil Engineering», 53, 48-51.
- PEARSE C.K. 1973, *Qanats in the Old World: Horizontal wells in the New*, «Journal of Range Management», 26, 320-321.
- PERRIER E., SALKINI A.B. 1991, *Supplemental irrigation in the Near East and North Africa, Proceedings of a Workshop on Regional Consultation on Supplemental Irrigation, ICARDA and FAO (Rabat, Morocco 1987)*, Springer, Netherlands.
- POTTS D.T. 1990, *The Arabian Gulf in antiquity, Prehistory to the fall of the Achaemenid empire*, 1, Oxford (UK), Clarendon Press.
- POURAGHNAEI M.J., MALEKIAN A. 2001, *Qanat in mountainous and plateau regions*, in *International Colloquium on Origin and History of Hydrology (Dijon 2001)*, Université de Bourgogne.

- REMINE B., KECHAD R., ACHOUR B. 2014, *The collecting of groundwater by the qanats: A millennium technique decaying*, «Larhyss Journal», 20, 259-277.
- SAJJADI S.M. 1982, *Qanat/ Kariz, storia, tecnica costruttiva ed evoluzione*, Teheran, Istituto Italiano di Cultura Sezione Archeologica.
- SOROUSH M., MEHRTASH A., KHAZRAEE E., UR J.A. 2020, *Deep learning in archaeological remote sensing: Automated qanat detection in the Kurdistan region of Iraq*, «Remote Sensing», 12, 3, 500 (<https://doi.org/10.3390/rs12030500>).
- TIKRITI W.Y.A. 2002, *The South-East Arabian Origin of the Falaj System*, *Proceedings of the 35th Seminar for Arabian Studies (Edinburgh 2001)*, Archaeopress, vol. 32, 117-138 (<http://www.jstor.org/stable/41223728>).
- YAZDANPANAH M., HAYATI D., ZAMANI G.H., KARBALAEI F., HOCHRAINER-STIGL S. 2013, *Water management from tradition to second modernity: An analysis of the water crisis in Iran*, «Environment, Development and Sustainability», 15, 1605-1621 (<https://doi.org/10.1007/s10668-013-9452-2>).
- YAZDI A.A.S., KHANEIKI M.L. 2010, *Veins of a Desert: A review on the technique of qanat, falaj, karez*, Teheran, Iran Water Resources Management Organization.
- YAZDI A.A.S., KHANEIKI M.L. 2017, *Qanat Knowledge. Construction and Maintenance*, Dordrecht, Springer-Verlag.
- WULFF H.E. 1968, *The Qanats of Iran*, «Scientific American», 218, 4, 94-105.

ABSTRACT

The lack of surface water and a high potential for evapotranspiration are the climatic and hydrological characteristics of the arid and semi-arid Middle East regions. In foothills regions the groundwater, often supplied by partially buried alluvial fan systems, has been intercepted and conveyed through the creation of a highly efficient supply system known as 'qanat', 'karez' or 'foggara'. This ancient hydraulic technology spread on a large scale since the 6th century BCE, during the rise and development of the Persian Empire. It consists in the excavation of a series of vertical tunnels, like large wells, which are connected by a gently sloping underground channel bringing water by gravity. Through the centuries, the *qanats* have been not only a sustainable system for exploitation of groundwater resources but also an important factor for the socio-economic and cultural development of local communities. In this paper the Authors illustrate the main aspects of *qanats* under historical, cultural and socio-economic perspective and the recent decline of the *qanat* system. An original and still updating database of these type of hydraulic operas, implemented through the collection and analysis of documentary sources, cartographic data, and on-site measurements is then presented. The database, including *qanats* detected on regional to local scales, might be regarded as a valuable support for the recovery of these structures and a more efficient governance of water resources.