

STUDIO IDROGEOLOGICO DI WADI ASH SHATI, AL JUFRAH E JABAL FEZZAN (LIBIA)

ABSTRACT

The hydrogeological study has mainly concerned the regional Paleozoic aquifer system (Cambro-Ordovician, Devonian) and its relationship with the aquifers kept in the Mesozoic formations (Nubian and Triassic, Kikla and Mizda aquifers) of the Fezzan region.

The study was performed through the following stages:
 — hydrogeological synthesis including relationship between the Fezzan, the Hamada Al Hamra and the Sirte Basin, hydraulic role of Jabal Fezzan;
 — mathematical model including history of water exploitation, water development plan in Wadi Ash Shati and Al Jufrah, simulations of different alternatives of ground-water extraction.

The simulation gave the following main results with regard to 2000:

- the most important drawdown (15-65 m for different simulations starting from present situation in 1979) takes place in Ashkidah zone and it is due not only to the water extraction in the Brak-Ashkidah project but also to the interference of water extraction in Wadi Ash Shati and Wadi Aril;
- in Al Jufrah area the drawdown is 30 m and it is not only due to the water production in Ferjan and Haman projects, but also to the interference with the extractions in the East Fezzan and Wadi Ziman;
- between these two main producing areas (Wadi Ash Shati and Al Jufrah), there is only scarce interference;
- huge quantities of water can be extracted from the unconfined Paleozoic of the Jabal Fezzan ($6 \text{ m}^3/\text{sec}$) with reasonable drawdown (20 to 40 m);
- the feasibility of Wadi Aril project has been verified; the planned extraction of $3.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ will produce a drawdown of 35-40 m.

RIASSUNTO

Lo studio idrogeologico ha riguardato principalmente il sistema acquifero regionale Paleozoico (Cambro-Ordoviciano, Devoniano) e le sue relazioni con gli acquiferi delle formazioni Mesozoiche (Nubiano e Triassico, Formazioni del Kikla e del Mizda) della regione del Fezzan.

- Lo studio comprende lo sviluppo di:
- sintesi idrogeologica comprendente l'esame delle relazioni tra il Fezzan, Hamada Al Hamra ed il Bacino della Sirte ed il ruolo di Jabal Fezzan;
 - modello matematico comprendente la storia dei prelievi, il piano di sviluppo di estrazione d'acqua sotterranea in Wadi Ash Shati ed Al Jufrah e le simulazioni di differenti alternative di produzione idrica.

Le varie simulazioni hanno fornito i seguenti risultati per quanto riguarda il 2000:

- il più importante abbassamento piezometrico (15-65 m per diverse simulazioni rispetto alla situazione di riferimento del 1979) ha luogo in Ashkidah ed è dovuto non solo al-

l'omonimo progetto, ma anche all'interferenza tra l'estrazione in Wadi Ash Shati e Wadi Aril;

- l'abbassamento in Al Jufrah è di 30 metri e non è dovuto solo ai progetti di Ferjan ed Haman ma anche all'interferenza dell'estrazione nella parte orientale del Fezzan e Wadi Ziman;
- v'è poca interferenza tra Wadi Ash Shati ed Al Jufrah;
- grandi prelievi possono essere estratti in Jabal Fezzan ($6 \text{ m}^3/\text{s}$) con un abbassamento dai 20 ai 40 metri;
- il progetto di Wadi Aril è fattibile poiché con un'estrazione di $3.2 \text{ m}^3/\text{s}$, l'abbassamento è di 35-40 metri.

1. OBIETTIVI E DEFINIZIONE DEL PROGETTO

A scopo esemplificativo è stato analizzato il progetto di Wadi Ash Shati, poiché sito in zona arida, completo dal punto di vista metodologico e prossimo ai sistemi acquiferi algerino e tchadiano descritti dal Prof. E. Castany.

L'obiettivo del progetto era quello di ricostruire un modello idrogeologico dettagliato per predire gli abbassamenti piezometrici in funzione dei prelievi.

Lo schema è costituito da tre acquiferi e due acquitardi. Gli acquiferi sono:

- Cretaceo superiore
- Mesozoico (Nubiano e Kikla)
- Paleozoico (Cambro-Ordoviciano e Devoniano)

Gli acquitardi sono:

- Formazione impermeabile di Jefren
- Formazione di M'rar e Ash Shati.

Il sistema acquifero della Libia Occidentale si estende per una superficie di 800.000 Km^2 tra il sistema di faglie di Amguid El Biod (Ovest), la fessura dell'Atlante e la faglia Gafsa Medenine - Homs (Nord), il Bu Nghem - Hun Graben (Est) ed il basamento (Sud).

Il sistema acquifero è diviso in due bacini dall'asse dell'uplift del Qarqaf. Nella parte settentrionale a tale asse compaiono i bacini di Ghadames, Fort Polignac del Grande Erg Orientale (Tunisia, Algeria) e di Hamada Al Hamra (Libia). Nella parte meridionale a tale asse vi sono il bacino di Murzuq (Libia, Algeria) ed il bacino del Tchad.

Nella parte superiore al basamento cristallino impermeabile sono state distinte:

- L' "Unità acquifera superiore", ubicata in Hamada Al Hamra, costituita da calcari marini del Cretaceo Superiore e del Paleocene, che in Tunisia-Algeria passano lateralmente a facies continentali di arenarie ed argille con depositi di sale del Mio-Pliocene. Questa unità include il Continentale Terminale e l'acquifero Carbonatico Superiore.
- Questa unità comprende l'acquifero "Continentale Intercalare" (DE. MARSILY ed altri, 1978) e l'acquifero delle "Sabbie Inferiori".
- L' "Unità acquifera media" è costituita da una potente serie Paleo-Mesozoica di depositi continenta-

(*) Aquater (Gruppo ENI), San Lorenzo in Campo (PS).

le (dal Permiano al Cretaceo Inferiore): nel bacino di Murzuq questi livelli sono chiamati post-Tassili, mentre nel bacino di Ghadames assumono i nomi di formazione di Tiguenturine, Zarzaitine, Touratine, Cabao e Kikla.

— L' "Unità acquifera inferiore", che interessa gran parte della Libia Occidentale, consiste in una potente serie paleozoica di arenarie continentali, confinata dal Carbonifero Inferiore formazione di M'rar, eccetto che in Jabal Hassouna, dove il Cambro-Ordoviciano affiora. L'acquifero è di età Cambro-Ordoviciano e Devoniana, poiché il Siluriano (Fm. di Tanezzuft) presenta caratteristiche di permeabilità bassa.

La ricostruzione stratigrafica e tettonica dell'area è stata eseguita sulla scorta della geofisica e dei logs dei pozzi petroliferi, integrandola con rilievi diretti di campagna.

Nelle figg. 1 e 2 è riportata la successione stratigrafica. Nelle figg. 3-4-5-6 compaiono le mappe ed alcune sezioni schematiche illustranti il modello fisico.

2. IDROGEOLOGIA

L'indagine idrogeologica ha riguardato principalmente il sistema acquifero Paleozoico (Cambro-Ordoviciano, Devoniano) e le sue relazioni con gli acquiferi contenuti nelle Formazioni Mesozoiche (Trias, Arenarie Nubiane, acquiferi del Mizda e Kikla).

Sono state ricostruite le piezometrie dei seguenti acquiferi:

- arenarie Cambro-Ordoviciane e Devoniane, che a livello regionale possono considerarsi idraulicamente collegate, quindi costituire un unico acquifero;
- acquifero Triassico e Nubiano a Nord Est di Sebha;

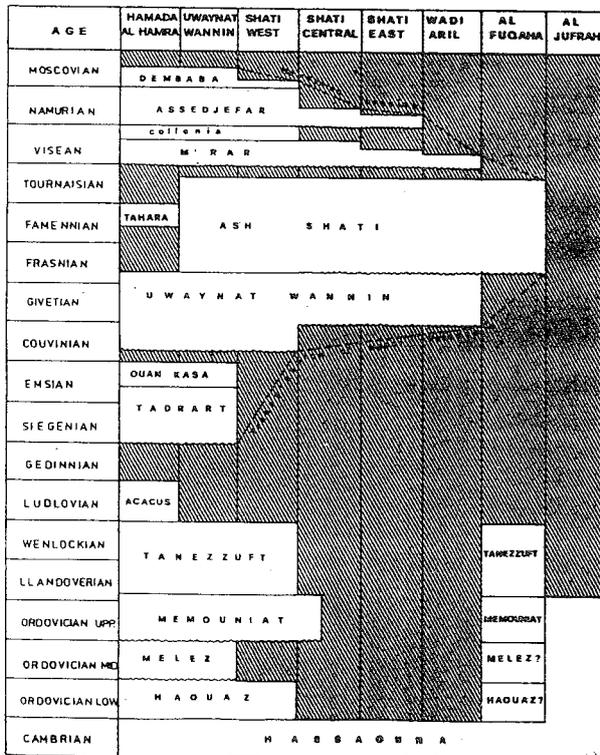


Fig. 1 - Schema della successione delle formazioni paleozoiche nell'area studiata

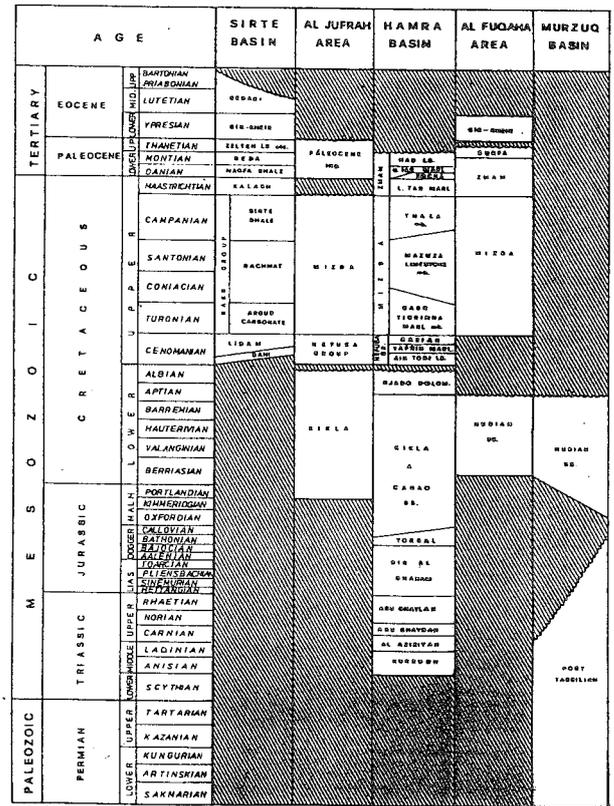


Fig. 2 - Schema della successione delle formazioni paleo-mesozoiche nell'area studiata

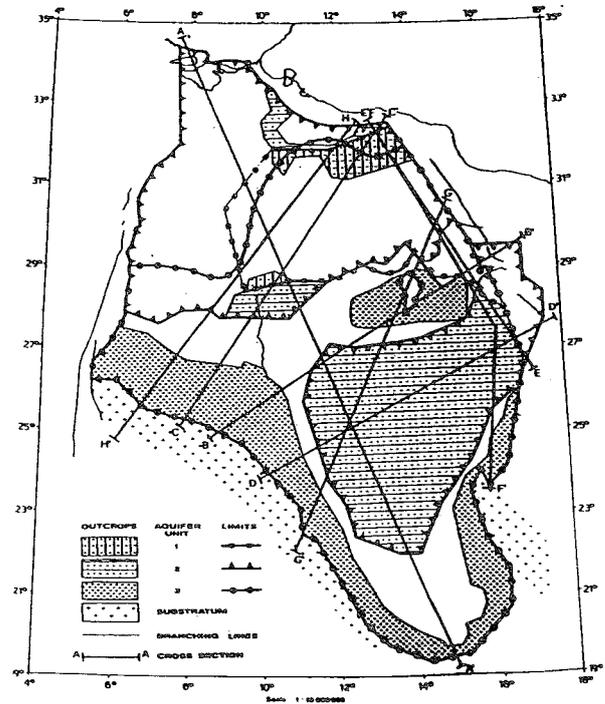


Fig. 3 - Schema del sistema acquifero regionale della Libia occidentale

— acquifero del Cretaceo Superiore sito in zona Nord e Nord-Est dell'area di studio.

L'interconnessione dell'acquifero del Mizda con il sistema acquifero sottostante avviene lungo il limite dell'acquifero dello Jefren: più precisamente nella parte occidentale dell'area lungo il 9° meridiano, l'acquifero

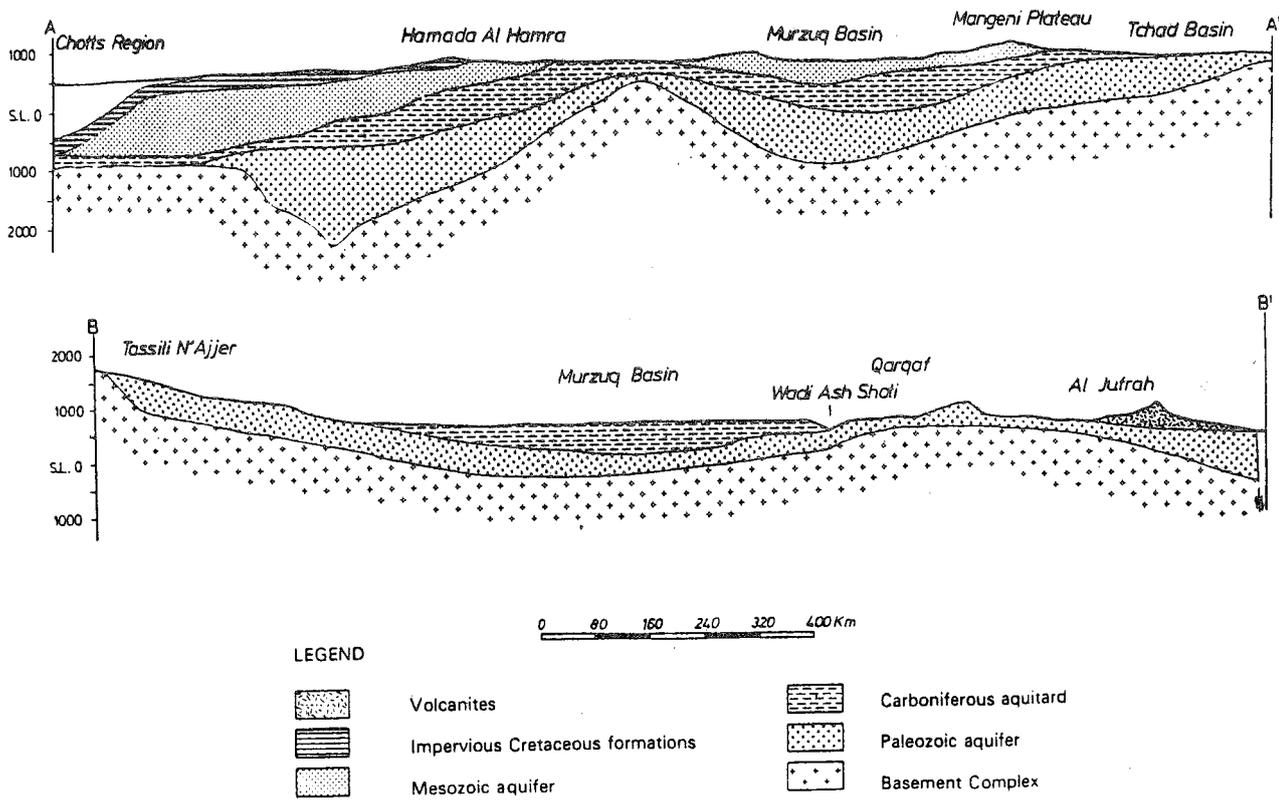


Fig. 4 - Sezioni idrogeologiche schematiche: schema due acquiferi - un aquitard

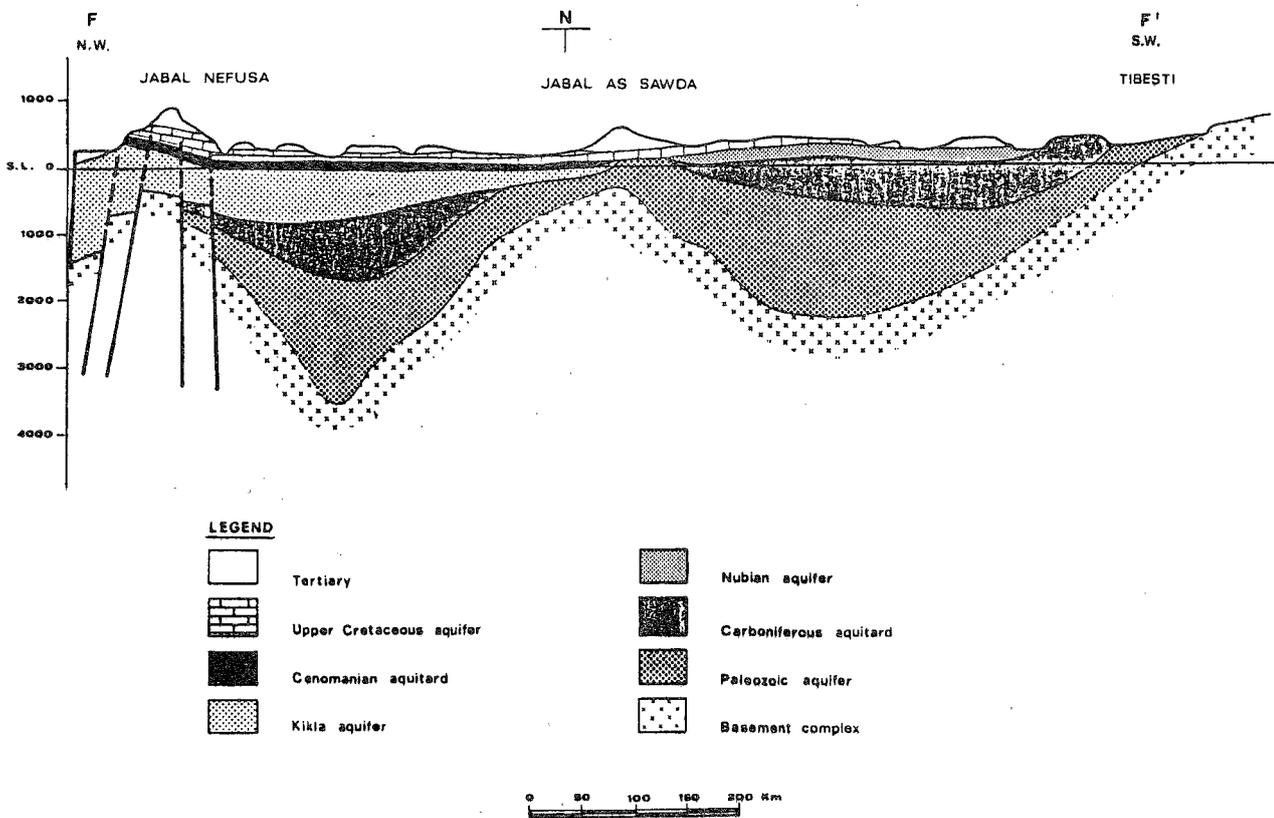


Fig. 5 - Sezione idrogeologica schematiche: schema tre acquiferi - un aquitard

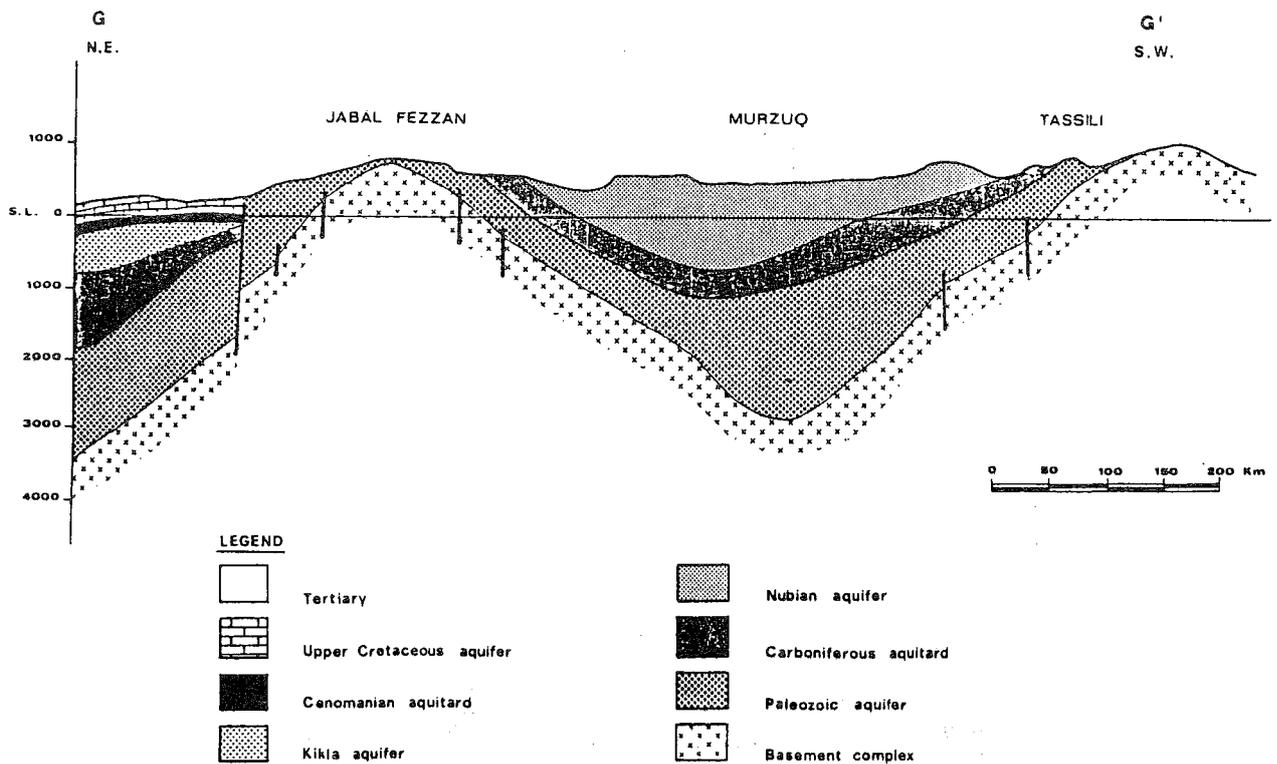


Fig. 6 - Sezione idrogeologica schematica: schema tre acquiferi - due aquitardi

fero del Mizda presenta una linea di interconnessione con l'acquifero del Kikla, nella regione del Fezzan si interconnette con gli acquiferi Paleozoici e del Kikla lungo la faglia nord-orientale, con l'acquifero Paleozoico a SW di Al Jufrah, con l'acquifero Nubiano nella zona di Al Fuqaha.

L'interconnessione tra gli acquiferi Nubiani e Triassici e l'acquifero Paleozoico avviene lungo il limite delle formazioni di Ash Shati e del Siluriano lungo la faglia di Al Jufrah-Al Fuqaha.

L'interconnessione tra gli acquiferi del Kikla e del Trias con l'acquifero Paleozoico avviene lungo il limite della formazione del M'rar (Nord di Al Jufrah).

Operativamente, per ricostruire il modello fisico idrogeologico si è agito nella seguente maniera.

Sui 414 pozzi inventariati sono state eseguite misure di livello statico, livello dinamico, portata, T, pH, conduttività elettrica specifica, contenuti in CO₂, O₂, H₂S, specie chimiche particolarmente interessanti per definire l'aggressività dell'acqua.

In laboratorio sui campioni prelevati sono state eseguite analisi chimiche complete. Su alcuni campioni di piogge e di acque di falda, scelti in maniera razionale, sono state eseguite analisi di isotopi ambientali ¹⁸O, D, T, ¹⁴C allo scopo di datare le acque e definire eventuali aree di ricarica e la circolazione idrica.

Sono state ricostruite le carte isotenore di TDS, SO₄⁻, Cl⁻ per l'acquifero Paleozoico e gli acquiferi Mesozoici. Tali carte, abbinata alle informazioni fornite dagli isotopi ambientali, sono servite per definire i collegamenti tra gli acquiferi e la circolazione idrica sotterranea.

Inoltre i parametri salinità e SAR sono serviti per l'utilizzo agricolo, mentre pH, pot Redox, CO₂, O₂, H₂S sono stati utilizzati per definire l'aggressività del

l'acqua sui materiali.

Nelle figg. 7 e 8 sono riportate la piezometria ed il valore del residuo secco delle unità acquifere superiore-mediana ed inferiore, le cui caratteristiche salienti sono di seguito descritte.

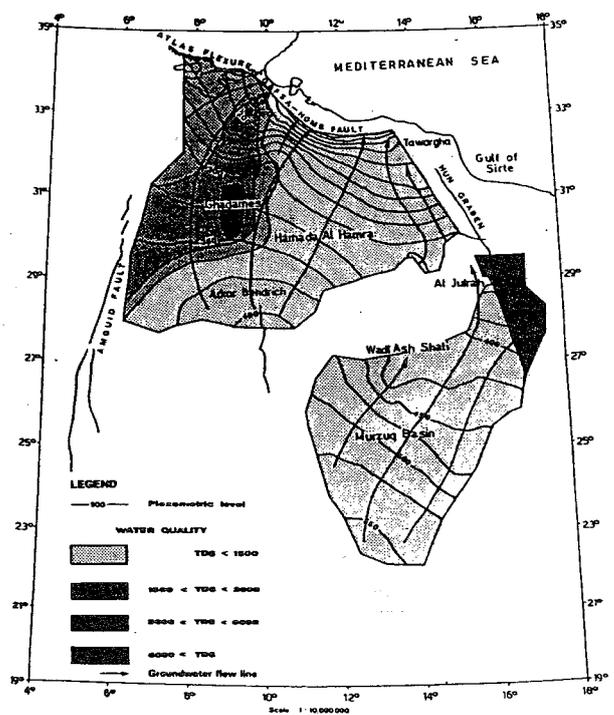


Fig. 7 - Piezometria e distribuzione della qualità delle acque della prima unità acquifera

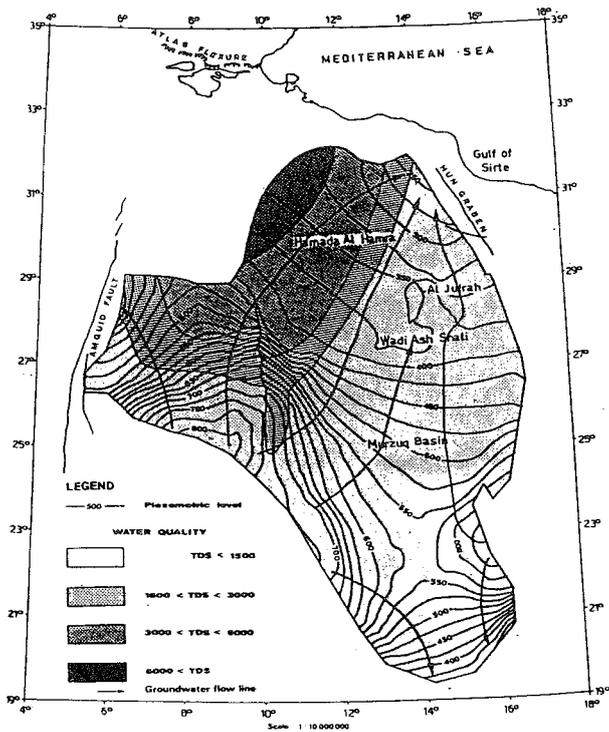


Fig. 8 - Piezometria e distribuzione della qualità delle acque della seconda unità acquifera

— Unità acquifera superiore

L'acquifero del Mizda presenta tre flussi con diverse direzioni. Il primo, originato dall'infiltrazione delle piogge nel Jabal Nefusa, presenta direzione ad Est verso Tawargha-Misratah. Il secondo con la stessa origine volge verso Ovest. Il residuo secco nella parte Nord dell'acquifero del Mizda, quindi in prossimità dell'area di ricarica di Jebel Nefusa, è inferiore ad 1,5 gr/1.

— Unità acquifera media

Il sistema acquifero del Kikla e del Mizda presenta tre diversi flussi.

Il primo si origina dalla zona di Hadrar Ben Dric e si irradia verso Nord. Il secondo flusso prende origine dalla interconnessione con l'acquifero Paleozoico e defluisce a Nord verso la zona di Tawargha-Misratah. Il terzo si origina dall'infiltrazione sugli affioramenti di Tuil el Hira e Jabal Nefusa e fluisce a nord-est verso la pianura di Jefara.

Nella zona Nord-occidentale di questo acquifero tra la terminazione settentrionale della faglia di Amguid el Biod e la flessura dell'Atlante vi è una connessione idraulica tra i bacini di Ghadames e del Grande Erg Orientale; perciò lungo questo bordo v'è entrata d'acqua in direzione NE.

Il residuo salino degli acquiferi del Kikla e del Triassico è inferiore ad 1,5 gr/1 in prossimità di Jabal Nefusa, Jabal Tuil el Hira e nella zona orientale di Hamada al Hamra; nei bacini di Ghadames e del Grande Erg Orientale il residuo salino supera i 3 gr/1.

Il flusso idrico degli acquiferi Nubiano e Triassico avviene da SW verso NE. Il residuo fisso è inferiore ad 1,5 gr/1.

Nell'angolo Nord-orientale l'acqua di questi acquiferi fluisce nel bacino della Sirte verso Est e nell'area di Al Jufrah verso Nord.

— Unità acquifera inferiore

L'acquifero Paleozoico presenta una distribuzione di flusso, che si origina dagli affioramenti di Paleozoico, che circondano il bacino di Murzuq, ed è diretta a Nord verso Wadi Ash Shati, dove avviene una naturale emergenza tramite sebke, e verso Bu Nghem-Hun Graben, dove l'acqua profonda del Paleozoico risale lungo le faglie sino ad arrivare a mescolarsi con quella meno profonda delle formazioni del bacino della Sirte.

* Nella zona delle faglie di Amguid el Biod vi è un flusso diretto ad Ovest verso il bacino Polignac.

* Nella zona meridionale tra In Erzane e Madama esiste uno spartiacque sotterraneo, a Sud del quale v'è un flusso verso il bacino del Tchad.

Gran parte dell'acquifero presenta residuo secco inferiore ad 1,5 gr/1 mentre verso l'Hamada Al Hamra l'acqua è salmastra e nella zona occidentale del bacino di Ghadames diventa sempre più salata.

2.1. CARATTERISTICHE IDRAULICHE

La trasmissività presenta valori variabili da 10^{-2} a 10^{-4} m²/sec. Il coefficiente di immagazzinamento per gli acquiferi in pressione varia intorno $5 \cdot 10^{-3}$; per quelli freatici il valore della porosità efficace è dell'ordine di 10^{-1} .

Nel modello matematico per gli acquitardi sono stati usati i seguenti valori:

$$K = 10^{-10} - 10^{-11} \text{ m/sec}$$

$$S = 10^{-9} - 10^{-11}$$

Le condizioni dei diversi acquiferi sono le seguenti:

— L'acquifero del Mizda è in pressione nella zona di Al Jufrah, parzialmente in pressione in Hamada Al Hamra a causa della copertura discontinua del Pliocene impermeabile, libero in corrispondenza degli affioramenti (Jabal Nefusa).

— Il sistema acquifero Kikla-Triassico è in pressione nei bacini di Ghadames ed Hamada Al Hamra e libero in corrispondenza degli affioramenti di Jabal Nefusa, Jabal Tuil el Hira e Hadrar Ben Dric.

— Il sistema acquifero Nubiano-Triassico è libero ad eccezione della zona Nord-orientale.

— L'acquifero Paleozoico è in pressione eccettuata l'area di affioramento.

La situazione dell'alimentazione è la seguente:

— L'unità acquifera superiore è ricaricata in corrispondenza di Jabal Nefusa (3500 Km²; 200 mm di piogge).

— L'unità acquifera media è ricaricata in corrispondenza alle fasce di affioramento di Jabal Nefusa e Jabal Tuil el Hira (4000 Km²; 100 mm di piogge); inoltre questa unità acquifera riceve molta acqua da NW:

— L'unità acquifera inferiore ha solo acqua fossile e non è quindi ricaricata.

2.2. DISCARICA NATURALE ED ARTIFICIALE

La discarica naturale si esplica nella seguente maniera:

— in corrispondenza e vicino agli affioramenti degli acquiferi del Paleozoico e del Nubiano sotto forma di evaporazione da sebke;

— lungo il Bu Nghem-Hun Graben ed in direzione Est, verso cui si muove l'acqua, attraverso il sistema di faglie dagli acquiferi Paleozoico e Mesozoico a quelli della Sirte;

— nella zona Sud dell'acquifero Paleozoico, dove il flusso dell'acqua è diretto verso il bacino del Tchad;

- lungo il sistema di faglie di Amguid El Biod l'acqua si muove dall'acquifero Paleozoico verso la zona di Amguid El Biod;
- lungo la faglia Gafsa-Medenine-Homs attraverso cui l'acqua passa dall'acquifero Mesozoico alle formazioni di Jefara.

Relativamente ai prelievi per uso urbano, industriale ed agricolo si sono utilizzati i dati di JONES (1969), UNESCO (1972), PALLAS (1977a - 1978b). Per l'Algeria e la Tunisia si sono utilizzati i dati UNESCO (1972).

Una grande discarica artificiale dall'acquifero Paleozoico avviene nel bacino di Polignac tramite i pozzi per olio (WORLD OIL, 1978).

Dall'unità acquifera superiore non si preleva acqua a causa dell'alta salinità, ad eccezione della zona di Al Jufrah, dove il prelievo totale dal Cretaceo Superiore è di $1 \text{ m}^3/\text{sec}$.

I prelievi dall'unità acquifera media sono i seguenti:

Gatrun ($0,1 \text{ m}^3/\text{s}$), Murzuq ($2,82 \text{ m}^3/\text{s}$), Sabha ($1,4 \text{ m}^3/\text{s}$), Fedjadi ($0,50 \text{ m}^3/\text{s}$), Nezaua ($4 \text{ m}^3/\text{s}$), Djerid ($4,5 \text{ m}^3/\text{s}$), Sud Tunisino ($0,50 \text{ m}^3/\text{s}$).

I prelievi dall'unità acquifera Inferiore sono i seguenti:

Ghat ($0,25 \text{ m}^3/\text{s}$), Wadi Ash Shati ($4,2 \text{ m}^3/\text{s}$), campi petroliferi del bacino di Polignac ($1,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

Bisogna considerare che durante gli ultimi 10.000 anni, età dell'ultimo pluviale, la discarica era solo il tipo naturale (evaporazione da sebke, fuoriuscita d'acqua attraverso il sistema di faglie Nord-occidentale ed il flusso attraverso il bacino del Tchad).

Le sebke si formano nella seguente maniera: a causa della piezometria e di linee tettoniche che mettono in collegamento l'acquifero Paleozoico con la superficie topografica si ha risalita di acqua, la quale forma dei grossi laghi poco profondi (sebke) altamente soggetti all'evaporazione a causa dell'alta temperatura e radiazione. Tali perdite influiscono in maniera elevata nel bilancio idrologico.

Per il calcolo delle perdite d'acqua tramite sebke dal punto di vista metodologico si è eseguita una zonazione del territorio in base a caratteristiche fisiche (litologia, pedologia, copertura, idrogeologia) e chimiche omogenee. Per ciascuna zona sono state definite delle aree campione rappresentative, sulle quali sono stati eseguiti bilanci di energia sopra il suolo e di massa nella fascia insatura (l'umidità del suolo è stata misurata con una sonda a neutroni).

L'estrapolazione dei dati è stata compiuta utilizzando serie di voli all'infrarosso termico eseguiti in diverse stagioni e ad ore diverse della giornata. In tale maniera è stato possibile calcolare il flusso di evaporazione attraverso le sebke.

2.3. REGIME NATURALE DEL SISTEMA ACQUIFERO

Una prima analisi dell'abbassamento piezometrico per discarica naturale degli acquiferi Kikla, Triassico e Paleozoico negli ultimi diecimila anni è stata fatta nell'ipotesi di mancanza di ricarica.

I risultati dell'analisi sono i seguenti:

— Acquifero Kikla e Triassico

L'abbassamento piezometrico in corrispondenza degli affioramenti di Adrar Ben Drieh è molto debole e può essere assunto come pseudo-stazionario per il periodo considerato (il livello piezometrico cala in maniera stazionaria dal livello iniziale assunto di 500 m

a 411,5 m dopo 10.000 anni con un abbassamento annuo di 8,8 mm). Ciò conferma l'ipotesi di mancanza di ricarica attuale sugli affioramenti di Adrar Ben Drieh.

— Acquifero Paleozoico

Dovuta al naturale flusso in Wadi Ash Shati, gli affioramenti del Qarqaf sono soggetti ad un forte regime non stazionario nei primi 5000 anni dopo il riempimento fluviale, dopo si è assunta una configurazione pseudo-stazionaria.

Il naturale abbassamento degli affioramenti del Tassili è molto debole e può essere assunto come pseudo-stazionario per il periodo considerato (il livello piezometrico cala in maniera stazionaria da un livello iniziale assunto di 850 m a 760 m dopo 10.000 anni con un abbassamento di $9 \text{ mm}/\text{anno}$).

I valori della piezometria calcolata in corrispondenza degli affioramenti del Qarqaf ($h = 372,7 \text{ m}$) per la quantità di flusso di Wadi Ash Shati ($Q = 1,1 \text{ m}^3/\text{s}$) corrispondono bene con i valori misurati.

Ciò conferma l'ipotesi di mancanza di ricarica per l'acquifero Paleozoico, in particolare per gli affioramenti del Qarqaf.

Le precedenti considerazioni avvalorano l'affermazione che il sistema acquifero regionale riceve ricarica attuale solo nella zona settentrionale in corrispondenza di Jabal Nefusa e Jabal Tuil El Hira. Il flusso è regolato dal gradiente idraulico.

3. QUALITÀ DELL'ACQUA

— Unità acquifera inferiore (acquifero Paleozoico)

La qualità dell'acqua è simile nell'acquifero Cambro-Ordoviciano e Devoniano e ciò conferma la loro interconnessione.

Si distinguono tre tipi di acqua:

- clorurato sodica con 20-30 mequ di HCO_3^- , rappresentativa dell'acquifero Paleozoico nell'area di Wadi Ash Shati tra Barqan ed Ash Kidah (TDS 0,35-0,45 gr/l);

- clorurato sodica a basso contenuto di HCO_3^- , chimicamente omogenea, come si riscontra in Wadi Shati, nell'area tra Idri e Wanzarik (TDS 0,7-1,5 gr/l);

- clorurato sodica a componente solfato calcica; si riscontra nell'area compresa tra Jabal Fezzal, Al Jafrah, Al Fuqaha (TDS 0,9 e 1,5 gr/l).

Si hanno incrementi di salinità NW di Uwaynat Wannin ed in corrispondenze del Hun-Graben, dove si possono avere interconnessioni idrauliche con le facies evaporitiche del bacino della Sirte.

I risultati delle analisi degli isotopi ambientali delle acque del Cambro-Ordoviciano e del Devoniano sono molto prossimi e ciò conferma il loro collegamento idraulico.

In Jabal Qarqaf il contenuto in ^{14}C varia da 13,5‰ a 9,5‰ del moderno, mentre nei pozzi attorno al Jabal Qarqaf è circa 1‰. Il contenuto in Trizio è trascurabile a conferma dell'assenza di una ricarica recente.

— Unità acquifera intermedia (acquifero Nubiano e Triassico)

L'acqua è di tipo clorurato sodica con TDS minore per i pozzi profondi (da 0,3 a 0,5 gr/l), mentre nei meno profondi, dove aumentano gli SO_4^{--} , il TDS varia tra 1 e 4 gr/l; la causa di tale aumento è da connettersi con acqua già evaporata di ricircolazione.

Anche dal punto di vista isotopico le acque sono totalmente diverse da quelle del Paleozoico.

— Unità acquifera superiore (Cretaceo Superiore-Formazione Mizda)

Sono stati raccolti due gruppi di campioni, uno in Al Jufrah e l'altro in Hamada Al Hamra.

Il primo gruppo è di tipo clorurato sodico, il secondo presenta acque solfato-alcalino-terrose, clorurato alcalino, alcalino-terrose e clorurato-alcaline.

In Al Jufrah il TDS è di poco superiore ad 1 gr/1, mentre in Hamada Al Hamra il TDS varia da 1 a 4 gr/1. Le acque inoltre sono ricche in CO₂, il che sommato al tipo di acqua (clorurato alcalina) ed all'elevato TDS esalta le proprietà corrosive.

Per quanto riguarda gli isotopi ambientali si riscontrano i seguenti valori:

Hamada Al Hamra	¹⁸ O = - 7,76	D = - 59,2
Sawakanah	¹⁸ O = - 10,34	D = - 75,5
		(come nel Paleozoico)

Tali valori confermerebbero l'ipotesi di una provenienza dell'acqua da Sud, come quella del Paleozoico.

4. MODELLO MATEMATICO

Allo scopo di comprendere la geometria e la dinamica degli acquiferi in condizioni naturali e prevederne il loro comportamento in condizioni imposte, è stato costruito un modello matematico ad elementi finiti, calibrato in regime permanente e transitorio.

4.1. CALIBRAZIONE IN REGIME PERMANENTE E TRANSITORIO

La piezometria del sistema acquifero alla fine del 1960 (data d'inizio dei prelievi artificiali) è stata assunta come rappresentativa del regime naturale dell'acquifero ed utilizzata come piezometria di riferimento per la calibrazione in regime stazionario.

Per riprodurre il regime naturale si sono considerate solo le fuoriuscite naturali. La descrizione del comportamento del sistema acquifero è contenuta nel capitolo 2.3 "Regime naturale del sistema acquifero". Considerando le piezometrie o i prelievi dal 1960 al dicembre 1979 il modello è stato successivamente calibrato in regime transitorio.

4.2. SVILUPPO DEI PRELIEVI E SIMULAZIONI

Considerando i vari usi si passa da 163,8 milioni di m³/anno nel 1978 a 325,4 milioni di m³/anno nel 2000 con varie ipotesi di distribuzione spaziale e temporale dei prelievi.

Dopo la calibrazione in regime permanente e transitorio il modello è stato utilizzato per prevedere il comportamento del sistema acquifero, per diversi programmi di estrazione d'acqua, sino al 2000.

Le condizioni iniziali per le simulazioni sono costituite dalla piezometria e dei risultati dalla calibrazione in stato transitorio (1979). I programmi di estrazione di acqua utilizzati per le simulazioni sono stati definiti secondo i seguenti criteri:

- proiezione delle attuali estrazioni: la produzione aumenta per un certo periodo poi rimane costante;
- per progetti a breve termine la produzione comincia nel 1980 e raggiunge il suo valore stabilizzato nel

1985;

- per progetti a medio termine la produzione comincia nel 1985 e raggiunge il suo valore massimo nel 1990.

Le varie simulazioni forniscono i seguenti risultati per quanto riguarda il 2000:

- il più importante abbassamento (15-65 m per diverse simulazioni rispetto alla situazione di riferimento del 1979) ha luogo in Ashkidah ed è dovuto non solo all'omonimo progetto, ma anche all'interferenza tra l'estrazione in Wadi Ash Shati e Wadi Aril;
- l'abbassamento in Al Jufrah è di 30 metri e non è dovuto solo ai progetti di Ferjan ed Haman ma anche all'interferenza dell'estrazione nella parte orientale del Fezzan e Wadi Ziman;
- vi è poca interferenza tra Wadi Ash Shati ed Al Jufrah;
- grandi prelievi possono essere estratti in Jabal Fezzan (6 m³/s) con un abbassamento dai 20 ai 40 metri;
- il progetto di Wadi Aril è fattibile poiché con un'estrazione di 3.2 m³/s, l'abbassamento è di 35-40 metri.

BIBLIOGRAFIA

AQUATER (1982) - *Hydrogeological study of Wadi Ash Shati, Al Jufrah and Jabal Fezzan area*. Secr. agr. recl. land. dev. Soc. peoples Lib. arab Jam., Tripoli.

BURDON D.J. (1975) - *Evaluation of water-consuming projects in LAR*. Agricultural Development (Drainage) Project of Brak oasis, Wadi Ash Shati. Annex - F. Tripoli, GWA, 2pp.

COLLOMB G.R. (1962) - *Etude Géologique du Djebel Fezzan et de sa bordure Paléozoïque*. - Notes et Mémoires C.F.P. n° 1, 26 p.

CONANT L.C. & GOUDARSI G.H. (1964) - *Geologic map of the Kingdom of Libya - 1/2,000,000*. U.S. Geol. Survey. Misc. Geol. Inv. Map 1-350 A.

CONANT L.C. & GOUDARSI G.H. (1967) - *Stratigraphic & tectonic framework of Libya*. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. - Vol. 51 n° 5 pp. 719-730.

CONRAD G. & FONTES J.C. (1970) - *Hydrologie isotopique du Sahara Nord-Occidental*. Isotope Hydrology, IAEA, 405-419, Vienna.

CONRAD G., MARCE A., OLIVE P. (1974) - *Mise en évidence par le tritium de la recharge actuelle des nappes phratiques de la zone aride saharienne (Algérie)*. J. of Hydrology.

DE MARSILY, LEDOUX, LEVASSOR, POITRINAL, SALEM (1978) - *Modelling of large multilayered aquifer system: theory and application*. Journal of Hydrology, V. 36, 1-34 pp.

ENERGO PROJECT (1976) - *Regional Hydrogeological Study - Wadi Sawafajjin, Wadi Zmam, Al Jufrah*. General Water Authority of Libyan Arab Republic, Beograd. (Unpublished report).

F.A.O. (1966) - *Development of Tribal Lands and Settlement Project in Libya, 1966*. Prospects and Proposals for Land Settlement Projects in Fezzan.

GERMAN CONSULT (1975) - *Groundwater resources development Um Al Djadawel and Hatteyat Barken*. Council of Agricultural Development of Libyan Arab Republic, Essen, Vol. 1, 22 tables, 9 annexes; Vol. 2, 12 tables, 5 annexes. (Unpublished reports).

GONFIANTINI R. (1977) - *Progress report on the application of isotope techniques to Hydrology*. Vienna.

- GOUDARSI G.H. (1971) - *Geology of the Shati Valley Area - Iron Deposit - Fezzan Libyan Arab Republic*. Symposium on the Geology of Libya, 522 p., Faculty of Science, University of Libya, Libyan Arab Republic.
- HOLZMANN-WAKUTI (1975) - *Hydrogeological studies of the project areas Wadi Morzog and Jufrah*. Council of Agricultural Development of Libyan Arab Republic, Siegen (W. Germany). (Unpublished report).
- KLITZSCH E. (1971) - *The structural Development of Parts of North Africa since Cambrian Time*. Symposium on the Geology of Libya, Beirut, pp. 253-262.
- IAEA (1968) - *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*. Technical Report Series N°91, Vienna.
- ITALCONSULT (1974) - *Fezzan land reclamation Project Wadi Ash Shati - Eshkeda area. Hydrogeological survey - Part one*. Ministry of Agricultural Development of Libyan Arab Republic, Rome, 53 pp., 6 tables, 12 figs. (Unpublished report).
- JONES J.R. (1964) - *Groundwater maps of the Kingdom of Libya*. U.S.G.S. open file report, 11 pp., 7 figs.
- MENENTI M. (1984) - *Physical aspects and determination of evaporation in deserts applying remote sensing techniques*. Institut voor Cultuur techniek en Water Huishouding, Wageningen.
- PALLAS P. (1977) - *Evaluation of groundwater resources in Fezzan*. Secretariat of Dams and Water Resources of Socialist Peoples Libyan Arab Jamahirya, Tripoli, 23 pp. (Unpublished report).
- PAYNE B.R. (1967) - *Contribution of isotope techniques to the study of some hydrological problems*. Isotope Techniques in the Hydrological Cycle, Am. geophys. Union, Geophys. Monograph N. 11, Washington D.C., 62-68.
- REGWA (1973) - *Studies in Wadi el Ajal, el Shati and Traghen*. Ministry of Agricultural Development of Libyan Arab Republic, Tripoli, 15 Vol., (Unpublished reports).
- TIBBITS G.G. (1956) - *A hydrogeological reconnaissance of the Hon - Socna - Waddan area, Libya*. Ministry of Agriculture and Water Resources of Libya, Tripoli, 4 pp., (Unpublished report).
- TIBBITS G.C. (1966) - *Groundwater resources of Ash Shati area*. Kingdom of Libya U.S.G.S., 184 pp., 30 figs., 12 tables, 2 maps.
- WAKUTI (1974) - *Hydrogeological studies of the Project Areas Wadi Morzog and Jufrah*. Libyan Arab Republic. (Interim report).