# Principali fonti di inquinamento degli acquiferi carsici cubani

Leslie Molerio Leon [1], Mario Parise [2], Carlos Aldana Vilas [3]

[1] *Cesigma S.A., La Habana, Cuba*
[2] *CNR-IRPI, Bari, Italia*
[3] *Escuela Nacional de Espeleològia "Antonio Nuñez Jimenez"; El Moncada, Cuba*

**Riassunto**
Il territorio dell'isola di Cuba è coperto per quasi il 66% da rocce carsiche; nel paese gli acquiferi di maggiore importanza sono di natura carsica e costituiscono complessivamente l'80% delle risorse idriche sotterranee. La struttura geologica, geografica ed economica di Cuba definisce, di conseguenza, i problemi di natura ambientale che dovrebbero essere gestiti ai fini della salvaguardia della qualità delle acque sotterranee. La vulnerabilità degli acquiferi dipende in particolare da numerosi fattori connessi a struttura geologica, condizioni climatiche, uso del suolo e delle risorse idriche, e assetto economico del paese. Le cinque principali fonti di inquinamento per le risorse idriche sotterranee carsiche di Cuba vengono descritte brevemente nel presente contributo: intrusione marina, agricoltura, rifiuti domestici, industria e attività estrattiva.

**Parole chiave:** carsismo, inquinamento, Cuba

***Abstract -*** MAIN SOURCES OF POLLUTION OF CUBAN KARST AQUIFERS
*The territory of the island of Cuba consists for about 66% of soluble rocks, affected by karst processes; the most important aquifers in the country are karstic, and they make up in overall the 80% of groundwater hydric resources. The geological, geographical, and economic structure of Cuba determine, as a consequence, the main environmental problems to be managed in order to properly safeguarding the quality of groundwaters. Vulnerability of the aquifers depends upon several factors related to geological setting, climate, land use and the hydric resources, and economy of the country. The five main sources of pollution for the cuban groundwater are briefly described in this contribution: sea water intrusion, agriculture, wastes, industry and mining.*

***Key words:*** *karst, pollution, Cuba*

## Introduzione

L'arcipelago cubano è formato da circa 4000 piccole isole (denominate *"cayos"*) che circondano le due isole maggiori: Cuba e la Isla de la Juventud. Il carso cubano copre quasi il 66% dell'intero territorio (Geze & Mangin, 1980; Nuñez Jimenez, 1984; Tyc, 2003). Nel paese gli acquiferi di maggiore importanza sono di natura carsica e costituiscono complessivamente l'80% delle risorse idriche sotterranee di Cuba. Questi acquiferi sono principalmente non confinati e costituiti da rocce carbonatiche mioceniche morfologicamente e-

spresse sotto forma di pianure costiere a debole pendenza. Solo una piccola parte del carso totale (circa 7500 km$^2$) è formato da rilievi di bassa o media altezza in rocce Giurassico-Paleogeniche. Mentre nelle piane costiere si osservano sia flussi idrici attraverso condotti che flussi diffusi, con questi ultimi dominanti, nelle zone di montagna i flussi turbolenti rappresentano il processo principale (Molerio, 1995; Molerio et al., 1995). Per la stretta ed allungata configurazione (da W-E a NW-SE) di Cuba, il principale spartiacque determina la presenza nell'isola di bacini idrografici, generalmente di piccole dimensioni, diretti verso N e verso S (Fig. 1). I bacini più estesi, invece, si rinvengono in corrispondenza dei pochi fiumi che si sviluppano in direzione est o verso ovest. A causa di tali caratteristiche, che si combinano con gli eventi meteorici estremi tipici delle zone umide tropicali, piene improvvise di

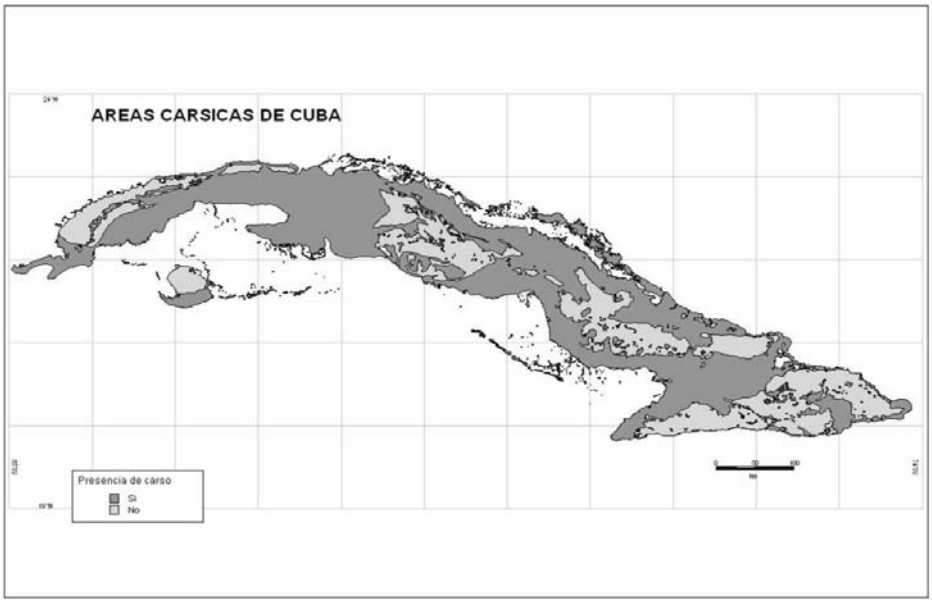


Fig. 1 - Aree carsiche di Cuba.
*Fig. 1 - Karst areas at Cuba.*

frequente costituiscono la risposta a forti piogge tropicali.
L'economia a Cuba era tradizionalmente basata sull'agricoltura, come in gran parte dei Carabi. Negli ultimi decenni, tuttavia, altre attività hanno assunto un'importanza sempre crescente, dall'attività estrattiva, all'industria leggera, al turismo (Mangano & Mundet i Cordan, 2002). A partire dagli anni '60, si è registrato un fenomeno di elevata concentrazione della popolazione nella capitale del paese (L'Avana) e nelle altre maggiori città; questa tendenza si è fermata, e leggermente invertita localmente, solo negli ultimi cinque anni.
La struttura geologica, geografica ed economica del paese definisce quindi i problemi ambientali che devono essere affrontati ai fini di una adeguata protezione delle risorse idriche carsiche e della conservazione della loro qualità.

## Vulnerabilità degli acquiferi carsici

In ambiente carsico, la vulnerabilità degli acquiferi dipende da numerosi fattori connessi a struttura geologica, condizioni climatiche, uso del suolo e delle risorse idriche e assetto economico. Gli acquiferi carsici, in particolare, sono estremamente complessi, e la valuta-

zione della relativa vulnerabilità è difficile a causa della eterogeneità e anisotropia degli strati acquiferi, le strette relazioni tra paesaggio e drenaggio, e il grado di attività idrologica del sistema carsico (Perrin et al., 2004; Parise & Gunn, 2007).

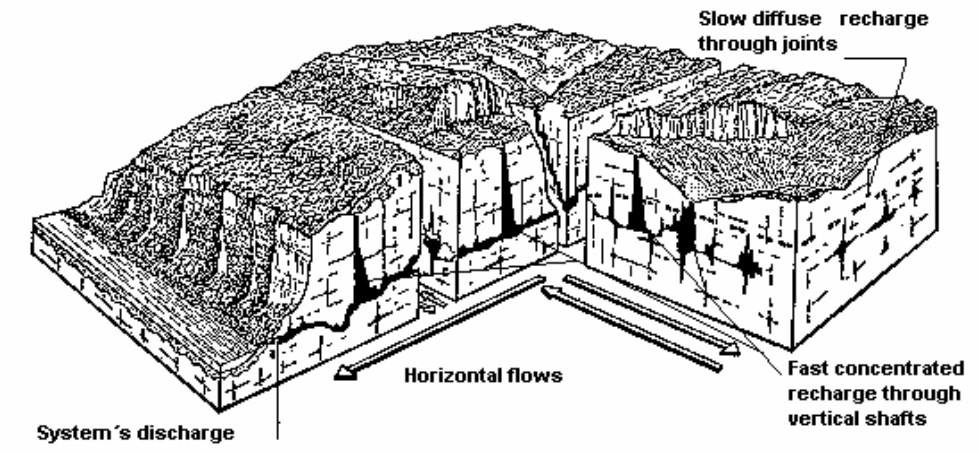


Fig. 2 - Schema idealizzato di un sistema carsico, con indicazione delle vie preferenziali di infiltrazione dell'acqua (modificato da Mangin, 1975).
*Fig. 2 - Idealized sketch of a karstic system showing extreme features for infiltrating waters (after Mangin, 1975, modified).*

I sistemi carsici sono caratterizzati dalle seguenti proprietà (Molerio, 1985):

- dal punto di vista termodinamico, il carso è un sistema aperto che interagisce con i mezzi circostanti;
- le variabili che descrivono le proprietà fisiche del sistema presentano una anisotropia tridimensionale;
- per ciascun tipo di misura di base di una lunghezza caratteristica (area, volume, lunghezza, diametro effettivo) lo spazio carsico è rigorosamente gerarchizzato;
- quattro tipologie di spazi costitutivi sono sviluppati, indicati (per ordine decrescente di lunghezza caratteristica) come grotte, fessure, pori e matrice solida;
- ciascuno degli spazi costituivi esibisce il proprio dominio di flusso e uno scambio attivo di massa, momento ed energia avviene tra di essi;
- risposte a input esterni o interni, naturali o artificiali, di massa, energia e momento sono gerarchicamente modulate dalla struttura interna del sistema e dalla capacità di assimilare sforzi;
- il fattore scala esercita una forte influenza sul significato fisico e sul comportamento stocastico delle proprietà fisiche;
- il sistema, e in particolare le proprietà fisiche che lo definiscono, sono fortemente dipendenti dal tempo a differenti scale spaziali e temporali;
- il processo di carsificazione è irreversibile; la sua evoluzione è di conseguenza unidirezionale, verso livelli di entropia crescenti.

Tali proprietà significano che anisotropia ed eterogeneità sono dovute allo sviluppo differenziale della carsificazione in rocce carbonatiche. Caratteristiche morfologiche sono sviluppate selettivamente, quindi esse si comportano in maniera differenziata rispetto a flussi verticali o orizzontali (Fig. 2). Doline e pozzi verticali, o grotte orizzontali o sub-orizzontali che assorbono il deflusso superficiale, sono i portatori di enormi volumi d'acqua che entrano rapidamente nel sistema acquifero. La risposta a questi input concentrati è in genere più o

meno rapida, in funzione dello stato iniziale del sistema e delle sue proprietà inerziali. Comunemente, se connesse alla falda, la risposta tende ad essere veloce, con un comportamento a pistone che descrive molto bene l'andamento ed il comportamento matematico della idrodinamica degli acquiferi.
Morfologie carsiche meno sviluppate, grotte verticali, fessure o fratture colmate da argilla o depositi residuali, reagiscono più lentamente agli input, ritardando il flusso verso la zona satura e, a loro volta, producendo un secondo picco nei livelli sotterranei o perlomeno una risposta ritardata al trasferimento di massa. Questi due comportamenti estremi producono una interazione ed un comportamento complesso del sistema in riferimento a processi di trasporto di massa. Non solo le proprietà fisiche, ma anche i tempi di risposta, sono diversi per ciascuno degli spazi coinvolti. Il cosiddetto flusso multi-fase si osserva più comunemente nei sistemi carsici che altrove. Un intenso sviluppo carsico nella zona non satura permette di sviluppare due principali percorsi di infiltrazione per le acque sotterranee, e precisamente:

- una ricarica veloce e concentrata si verifica lungo pozzi connessi verticalmente alle acque sotterranee, o tramite grotte orizzontali e sub-orizzontali. Il flusso superficiale in direzione di questi elementi carsici avviene in due maniere principali: un flusso diffuso in superficie o un flusso concentrato e canalizzato lungo corsi d'acqua che entrano in grotta.
- una ricarica lenta e diffusa si verifica attraverso pori, fratture e fessure meno carsificate.

Entrambi i meccanismi sono importanti per spiegare l'idrodinamica degli inquinanti in terreni carsici. Concentrazioni, percorsi di flusso e tempi d'arrivo differenti sono tutti controllati dal sistema di ricarica. Le modellazioni matematiche devono inoltre tenere in conto le modalità di diffusione degli inquinanti (puntuali o diffuse).
Mentre un gruppo di condizioni al contorno che riguardano la capacità di infiltrazione dipende dalla differenziazione dei diversi ambienti carsici, l'altro gruppo è funzione degli effetti antropici sul carso. Conseguentemente, l'uso del suolo e delle acque in ambiente carsico influenza fortemente la vulnerabilità del sistema. A Cuba, le principali fonti di inquinamento per le acque sotterranee di origine carsica sono state identificate nelle seguenti attività: intrusione marina; agricoltura; rifiuti; industria; attività estrattive.

***Intrusione marina***

I più importanti acquiferi sono ubicati a Cuba lungo la costa meridionale dell'isola. L'intru-

Fig. 3 -L'isola di Cuba presenta quasi 3600 km di cose vulnerabili all'intrusione marina (foto: L. Molerio).
*Fig. 3 - The main island of Cuba has almost 3600 km of coastline vulnerable to sea water intrusion (photo: L. Molerio).*

sione marina, quindi (Fig. 3), rappresenta il più comune ed esteso fattore che influisce negativamente sulla qualità delle acque, anche in riferimento a quelle sotterranee.
Il carsismo esercita una influenza differenziata su distribuzione ed intensità dell'intrusione marina. Condotti carsici allagati presentano una distribuzione salina differenziata in senso verticale in funzione della profondità della grotta al di sotto del livello del mare, a prescindere dalla distanza dalla linea di costa. Mentre la profondità delle grotte allagate è associata allo sviluppo di antichi stazionamenti del livello marino, la distribuzione del livello delle grotte è un fattore che controlla l'intrusione marina attuale. In molti casi, lenti isolate di acqua marina sono trovate a dozzine di chilometri verso l'interno dell'isola.
Negli acquiferi il cui flusso avviene attraverso condotti carsici, l'intrusione marina è controllata dalla quantità di acqua emessa da sorgenti sottomarine o costiere. In genere, nelle stesse condizioni di regime di emungimento, distribuzione di pioggia e uso del suolo, gli acquiferi a flusso diffuso sono maggiormente interessati da intrusione marina rispetto a quelli nei quali il flusso avviene attraverso condotti. Dato che entrambi i tipi di acquiferi coesistono a Cuba, non è raro osservare un andamento irregolare della distribuzione orizzontale e verticale dell'intrusione marina, in funzione dei fattori su citati.

***Agricoltura***
L'impatto dell'agricoltura sulle acque sotterranee deriva da numerosi fattori, tra i quali il tipo di uso del suolo e di irrigazione, le pratiche colturali, e le proprietà del suolo. Le più importanti evidenze di contaminazione agricola delle acque sotterranee sono la presenza di nitrati e pesticidi. A partire dagli anni '60 le pratiche di irrigazione e di fertilizzazione si sono sviluppate con grande rapidità a Cuba. La concentrazione dei nitrati nelle acque sotterranee è aumentata improvvisamente da livelli di 0 - 10 mg/l sino a valori al di sopra dei limiti consentiti per le acque potabili in diversi bacini idrogeologici. Le pratiche di fertilizzazione sono state il principale imputato per tale situazione e alcune stime indicano valori pari a 80 -120 kg N/ettaro/anno.
La contaminazione da nitrati nelle acque sotterranee a Cuba è sempre da porre in relazione al suo assetto agricolo ed economico. Evidenze di aumenti nelle concentrazioni di nitrati sono state osservate in pozzi di monitoraggio negli ultimi decenni. La natura carsica del territorio cubano e dei suoi acquiferi principali determina una vulnerabilità mediamente alta all'inquinamento da nitrati.

***Rifiuti***
L'infiltrazione diretta di rifiuti domestici poco o per nulla trattati costituisce una importante fonte di inquinamento per le acque sotterranee a Cuba (Fig. 4), congiuntamente a fonti pun-

Fig. 4 -Discariche non controllate di rifiuti solidi e liquidi non trattati sono estremamente comuni, specialmente nelle aree rurali e nelle zone periferiche dei grandi centri (foto: L. Molerio).
*Fig. 4 - Untreated sewage waters are a common threat to groundwater in urban karst lands (photo: L. Molerio).*

| Popolazione totale settore | Abitanti | % | Percentuale di popolazione con servizi sanitari: Servizi fognari | Vasche settiche e bagni | totale | Soluzioni inadeguate | Totale con servizi | Popolazione senza servizi |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Urbano | 8.27 | 75.7 | 35.0 | 31.6 | 66.6 | 30.0 | 96.6 | 3.4 |
| Rurale | 2.65 | 24.3 | 52.0 | 46.8 | 52.0 | 20.0 | 72.0 | 28.0 |
| totale | 10.92 | 100.0 | 39.0 | 35.2 | 74.2 | 27.6 | 90.6 | 9.4 |

Tab. 1 - Servizi sanitari a Cuba (dati relativi alla popolazione espressi in milioni di abitanti).
*Tab. 1 - Sanitary services at Cuba (figures expressed in millions of inhabitants).*

tuali di inquinamento quali vasche settiche e fogne. Scarichi da zone con ristagni di rifiuti liquidi, e problemi nei processi di depurazione delle acque reflue sono tra le cause principali di contaminazione diretta delle acque sotterranee degli acquiferi cubani. I servizi fognari sono estesi soltanto al 39% della popolazione. La tabella 1 mostra, a titolo di esempio, la distribuzione di servizi sanitari a Cuba nel 1993.

***Industria***

I rifiuti industriali rappresentano una delle più estese e importanti fonti di inquinamento. In particolare, di grande rilevanza è la contaminazione connessa all'industria della canna da zucchero (Fig. 5), che determina la produzione di acque ricche in saccarosio, a basso pH e elevata temperatura, il cui impatto sulle acque sotterranee si traduce nell'abbassamento del COD e di $SO_4$ e, indirettamente, in fenomeni locali di subsidenza determinati da acque arricchite in $CO_2$, e quindi in grado di svolgere un'azione accelerata di dissoluzione sulle rocce carbonatiche.

Per quanto riguarda l'industria leggera, le principali fonti di inquinamento derivano da industrie tessili e cartiere. Acque colorate derivanti dalle industrie tessili sono state a lungo utilizzate come traccianti nella zona occidentale di Cuba. Altra fonte di inquinamento è l'industria chimico- farmaceutica, che però, essendosi sviluppata più di recente, è meglio controllata dalle agenzie ambientali.

***Attività estrattive***

L'intenso sviluppo dell'attività mineraria a Cuba ha determinato numerosi problemi di inquinamento delle acque superficiali più che di quelle sotterranee, dato che i principali minerali oggetto di estrazione (nickel, rame, ferro, oro) sono connessi a rocce non carsiche. Il loro effetto negativo sulle acque carsiche sotterranee risulta quindi più limitato, a causa del relativo isolamento delle miniere rispetto alle aree occupate da terreni carbonatici. Campi di petrolio e di perforazioni petrolifere sono, sinora, i pericoli maggiori di inquinamento delle acque sotterranee per quanto riguarda le attività estrattive e/o di miniera. Ciò anche perché i più importanti campi per l'estrazione di petrolio sono localizzati su acquiferi carbonatici, il che aumenta notevolmente il rischio di problemi ambientali nel paese.

Fig. 5 -Le industrie di zucchero sono una delle maggiori fonti di inquinamento delle acque carsiche sotterranee a Cuba (foto: Cuban Environmental Agency).
*Fig. 5 - Sugar factories, one of the most important sources of groundwater pollution of karst waters in Cuba (photo: Cuban Environmental Agency).*

**Acque superficiali**

| Variabile misurata | Stazione | Totale |
|---|---|---|
| Pioggia | Pluviografi | 1997 |
| | Pluviometri | 1083 |
| Deflusso superficiale | Idrometri | 50 |
| Evaporazione, umidità relativa, vento, insolazione | Stazioni climatiche (essenzialmente evaporimetriche) | 75 |
| Qualità delle acque | | 768 |

**Acque sotterranee**

| Variabile misurata | Stazione | Totale |
|---|---|---|
| Livello delle acque sotterranee | Pozzi di osservazione | 2399 |
| Salinità delle acque sotterranee | Pozzi di osservazione | 290 |
| Qualità delle acque sotterranee | Pozzi di osservazione | 1354 |

Tab. 2 - Sistema di monitoraggio a Cuba (da Molerio et al., 1998).
*Tab. 2 - Monitoring system at Cuba (after Molerio et al., 1998).*

| Variabile misurata | Stazione | Totale |
|---|---|---|
| Pioggia | Pluviografi | 696 |
| Qualità dell'acqua | | Variabile. Dipende da stagione, popolazione rifornita e programma di monitoraggio |
| Livello delle acque sotterranee | Pozzi di osservazione | 527 |
| Qualità delle acque sotterranee | Pozzi di osservazione | Variabile. Dipende da stagione, popolazione rifornita e programma di monitoraggio |

Tab. 3 - Sistema di allerta per l'emergenza ambientale delle acque interne.
*Tab. 3 - Warning system for inland water environmental emergency.*

## Il rischio ambientale

La valutazione del rischio per la contaminazione di acque sotterranee è istituzionalmente basato su: i) una struttura legislativa; ii) un sistema di monitoraggio della qualità delle acque sotterranee, comprese le corrispondenti fasi di elaborazione dei dati e sistemi di allarme; iii) piani di emergenza ambientale. Dal punto di vista della legislazione, a partire dagli anni '60 le leggi che si occupano di acque interne, suolo, gestione e protezione dell'ambiente sono sistematicamente migliorate. La Costituzione stessa della Repubblica di Cuba considera la protezione ambientale come un diritto ed un dovere dello Stato e dei cittadini.
In riferimento alla protezione delle acque sotterranee, la responsabilità è affidata all'Istituto Nazionale di Risorse Idriche, mentre il Centro di Idrologia e di Qualità delle Acque

(CENHICA) è l'agenzia nazionale incaricata del monitoraggio ai fini della salvaguardia delle risorse idriche. Il sistema di monitoraggio è gestito quindi dal CENHICA-INRH dagli anni '60, mentre la rete pluviometrica e diverse stazioni idrometriche risalgono all'inizio del XX secolo. La tabella 2 elenca nel dettaglio la struttura del sistema di monitoraggio.
I sistemi di allerta sono integrati per mezzo di stazioni prescelte monitorate su base giornaliera, settimanale e mensile. Le variabili misurate sono valutate in termini delle loro variazioni nella qualità delle acque. Modelli di simulazione sono inoltre stati implementati in diversi bacini o sistemi acquiferi per diagnosticare e prevedere il loro comportamento. La struttura di questa rete informativa è rappresentata in tabella 3.

## Considerazioni conclusive

La struttura geologica, geografica ed economica di Cuba definisce i problemi di natura ambientale che dovrebbero essere gestiti ai fini della salvaguardia della qualità delle acque sotterranee. La vulnerabilità degli acquiferi cubani dipende da numerosi fattori connessi alla struttura geologica, alle condizioni climatiche, all'uso del suolo e delle risorse idriche, e all'assetto economico del paese. Gli acquiferi carsici, che si estendono su oltre il 66% del territorio nazionale, sono spesso a maggiore complessità per la definizione della vulnerabilità, a causa della eterogeneità e della anisotropia degli strati acquiferi, delle strette relazioni esistenti tra forme del paesaggio e modalità di drenaggio e del grado di attività idrologica dei sistemi carsici. Cinque principali fonti di inquinamento per le risorse idriche sotterranee carsiche di Cuba sono state identificate: intrusione marina, agricoltura, rifiuti domestici, industria e attività estrattiva. La qualità delle acque sotterranee è gestita mediante un sistema di allerta integrato da stazioni selezionate monitorate su base giornaliera, settimanale e mensile. Le variabili misurate sono valutate in termini delle loro variazioni nella qualità delle acque. Modelli di simulazione sono inoltre stati implementati in diversi bacini o sistemi acquiferi per diagnosticare e prevedere il loro comportamento.

## Bibliografia


Geze B., Mangin A. (1980) - *Le karst de Cuba.* Geologie Dynamique, 22 (2), pp. 157-166.

Mangano S., Mundet i Cordan L. (2002) -*I Caraibi: un nuovo Mediterraneo? Il caso di Cuba.* Boll. Soc. Geogr. It., ser. XII, 7, pp. 89-104.

Molerio Leòn L.F. (1985) -*Dominios de flujo y jerarquizacion del espacio en acuiferos carsicos.* Simp. XLV Aniv. Soc. Espel. Cuba, La Habana, pp. 54.

Molerio Leòn L.F. (1995) - *Regionalización Hidrogeoquímica de las Aguas Subterráneas en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba.* Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana, pp. 92-93.

Molerio Leòn L.F., Menendez A., Flores E., Bustamante C., Guerra M. (1995) - *Hidrodinámica de los Grandes Sistemas Cavernarios de Cuba Occidental.* Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana, pp. 88-89.

Molerio Leòn L.F., Barros O., Gomez N., Gelabert J.L. (1998) -*Cuba. Red nacional de monitoreo del regimen de las aguas subterraneas.* Red Int. de Organismos de Cuenca, Carta de la Red.

Nuñez Jiménez A. (1984) - *Cuevas y carsos.* Ed. Cientifico-Tecnica, Ciudad de La Habana.

Parise M., Gunn J. (2007) - *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: an introduction.* In: Parise M., Gunn J. (eds) *Natural and anthropogenic hazards in karst areas: recognition, analysis, and mitigation.* Geological Society, London, Special Publication. 279, pp. 1-3.

Perrin J., Pochon A., Jeannin P.Y., Zwahlen F. (2004) - *Vulnerability assessment in karstic*

*areas: validation by field experiments.* Environmental Geology, 46 (2), pp. 237-245.
Tyc A. (2003) - *Cuba.* In: Gunn J. (ed) *Encyclopedia of caves and karst science.* Routledge, pp. 271-272.