

## Utilisation de l'hydrochimie et de la géochimie isotopique pour caractériser les conditions de recharge de l'aquifère de Morroa (Colombie) sous climat semi-aride

JEAN DENIS TAUPIN<sup>1</sup>, HECTOR MARIO HERRERA<sup>2</sup>, LUZ ELENA ROMERO<sup>2</sup> & MARIA CONSUELO VARGAS<sup>3</sup>

<sup>1</sup>IRD-UM2, HydroSciences Montpellier, Maison des Sciences de l'Eau, 300 Av. Jeanbrau, 34095, Montpellier, France  
taupin@msem.univ-montp2.fr

<sup>2</sup>Carsucre, Cra. 25 No. 22-29 Sincelejo, Colombie

<sup>3</sup>Ingeominas, Dg 53 #34-53 Bogotá, Colombie

**Résumé** L'aquifère multi-couche de Morroa (nord-ouest Colombie) est constitué principalement de sable conglomératique peu consolidé, intercalé avec des couches argileuses. Il constitue la principale source d'alimentation en eau de la région (climat tropical sec) qui compte de nombreux centres urbains. Au cours des 50 dernières années, son utilisation intensive a conduit à une baisse significative de la nappe même si l'arrêt des pompages semble montrer une certaine récupération. Dans ce contexte, des mesures géochimiques classique et isotopique (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C et tritium) ont été menées entre 2002 et 2003, afin de caractériser les conditions de la recharge actuelle. La chimie des eaux montre un faciès bicarbonaté calcique tendant à évoluer vers un faciès bicarbonaté sodique pour les forages les plus profonds liés aux processus d'échanges cationiques avec les niveaux argileux. Oxygène-18 et deutérium donnent des teneurs très homogènes, signe d'un mélange des eaux importants dans l'aquifère, donc de temps de résidence long en accord avec les résultats en tritium (sans) et <sup>14</sup>C (50–90% d'activité). Il semble donc que la possibilité de renouvellement de l'eau de cet aquifère reste faible à nulle et donc qu'il est important de penser à trouver d'autre stratégies pour l'approvisionnement en eau de la zone.

**Mots clefs** aquifère; zone semi-aride; gestion de l'eau; chimie; isotope; Colombie

### Use of hydrochemistry and isotope geochemistry to characterize recharge conditions in Morroa (Colombia) groundwater under semi-arid climate

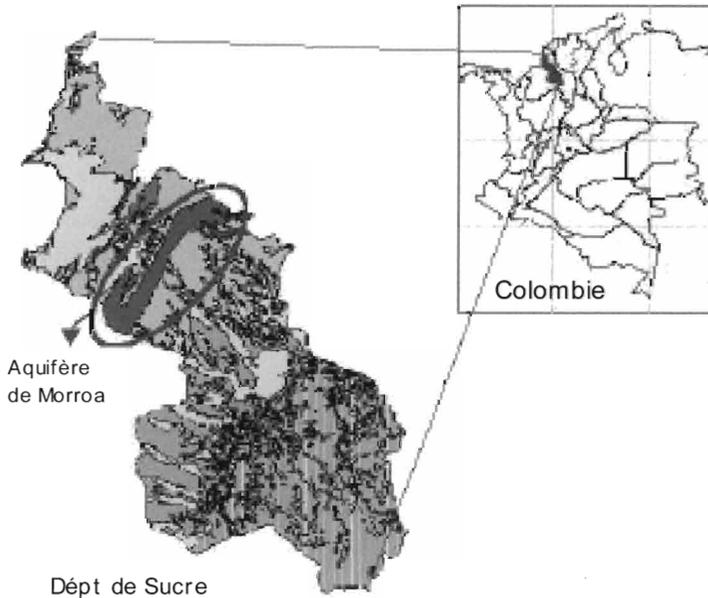
**Abstract** The multilayer aquifer of Morroa (northwest Colombia) is mainly composed of sandstone and is almost under consolidated conglomerates interbedded with clayey layers. It is the main water supply source of the region characterized by a dry tropical climate, and includes many urban centres. During the last 50 years, its intensive use has resulted in a significant decrease of the water table, even if the cessation of pumping seems to show some recovery. In this context, classical and isotopical geochemical measurements (<sup>18</sup>O, <sup>2</sup>H, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>C and tritium) were made between 2002 and 2003 to characterize current recharge conditions. The water chemistry shows an evolution between calcium bicarbonate and sodium bicarbonate in proportion to borehole depth, which can be explained by a cation exchange process with the layers of clay. Oxygen-18 and deuterium give homogeneous values, indicating an important water mixing in this aquifer and thus a large water residence time, which agrees with tritium results (none) and <sup>14</sup>C (50–90% of activity). The possibility to have a recent recharge is very limited study and it is very important to consider the current strategy to supply the zone with water.

**Key words** aquifer; semi-arid zone; water management; water chemistry; isotope; Colombia

## INTRODUCTION

La principale source d'approvisionnement en eau de la population du département de Sucre, situé dans la partie nord occidentale de la Colombie (Fig. 1), est constituée principalement de nappes d'eaux souterraines accessibles par captage profond, captages artisanaux voire par captage de quelques sources (INGEOMINAS, 2000; Barrera, 2002). Un des aquifères les plus importants qui approvisionne la zone d'étude en eau potable est l'aquifère de Morroa dont plus de 500 000 personnes dépendent. Un des principaux problèmes dans cet aquifère est la surexploitation (4 m an<sup>-1</sup> en moyenne de rabattement depuis une trentaine d'année) et la possible contamination à partir du réseau de surface, le traitement des eaux résiduelles n'étant pas assuré. Pour améliorer la connaissance de cet aquifère, la Corporación Autónoma Regional de Sucre (CARSUCRE) gestionnaire public de la ressource en eau au niveau régional a mis en œuvre un suivi systématique de l'hydrodynamisme de la nappe depuis quelques années dont l'objectif est de produire un modèle hydrogéologique conceptuel et numérique afin d'estimer la potentialité de cet aquifère et

pour finalement faire une gestion la meilleure possible sur le long terme, la population ayant tendance à augmenter. C'est dans ce cadre qu'une étude géochimique (éléments majeurs) et isotopique a eu lieu entre 2002 et 2003 pour apporter un certain nombre d'éléments sur les zones de recharge, les possibilités de renouvellement de l'aquifère, l'acquisition de la salinité des eaux, les relations avec l'encaissant et les autres aquifères situés dans les formations géologiques adjacentes et la mise en évidence éventuelle d'un phénomène de contamination.



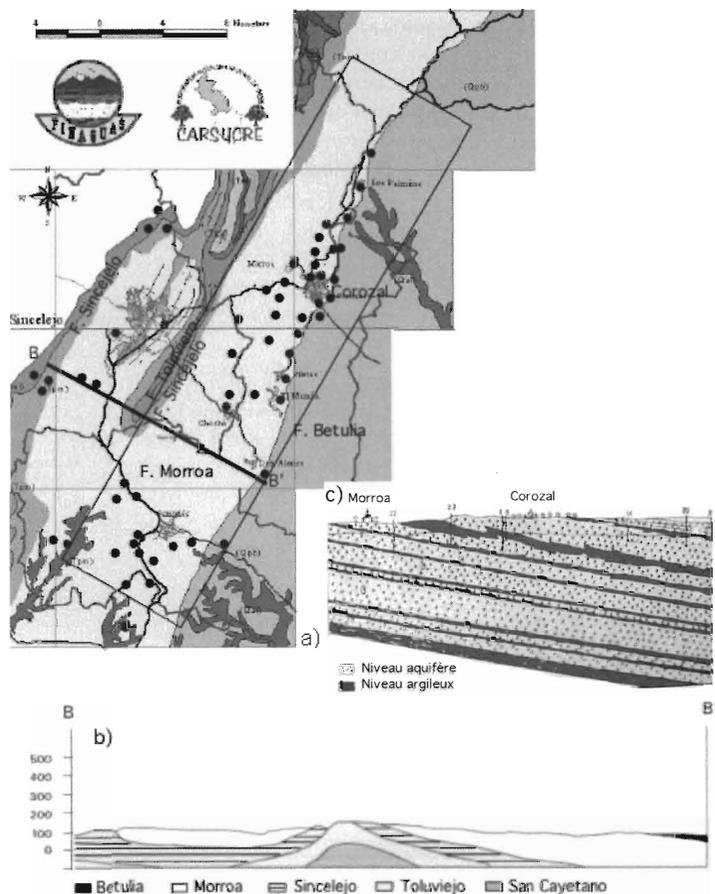
**Fig. 1** Localisation de la zone d'étude.

## DONNEES ENVIRONNEMENTALES

L'aquifère de Morroa occupe une surface d'environ 1120 km<sup>2</sup> et est localisé dans la partie centrale du Département de Sucre (Fig. 1). L'eau de cet aquifère est considérée apte à la consommation humaine (INGEOMINAS, 1992; Rodriguez, 1993).

Le climat de la zone est de type semi-aride, plus précisément de type forêt tropicale sèche avec une température moyenne annuelle de 28°C et une précipitation annuelle modale de 1050 mm (90% de la précipitation entre avril et novembre) bien en dessous de l'ETP représentant environ 1800 mm an<sup>-1</sup> (IGAC, 1998, 2003). Le réseau hydrographique, dans ces conditions climatiques, est non pérenne pendant la saison sèche malgré un écoulement continu en relation avec les eaux résiduelles des activités urbaines et agricoles.

La géologie de la zone est assez complexe, due aux déformations que la zone a subi (zone anticlinale complexe) et à la variabilité des séquences de dépôt qui peuvent être marins, continentaux ou de transition (Fig. 2(a),(b)). Dans la zone d'étude étendue, on trouve des roches sédimentaires consolidées ou non, d'âge compris entre le Crétacé Supérieur et le Quaternaire. La Formation affleurante principale est celle de Morroa, encadrée par la Formation plus ancienne Sincelejo Supérieur à la base et par la Formation Betulia plus jeune au toit de la série de Morroa. S'y ajoute quelques dépôts alluviaux de faible épaisseur en relation avec les rivières qui circulent sur la zone d'étude. L'étude géochimique des eaux s'est concentrée évidemment sur celles appartenant à la formation Morroa, sujet de l'étude mais aussi sur celles des deux formations l'encadrant qui peuvent avoir une interaction éventuelle.



**Fig. 2** Géologie de la zone et emplacement des forages profonds et artisanaux, (a) plan, (b) coupe régionale B–B', coupe formation Morroa. Le rectangle délimite la zone d'étude.

Les informations géologique et hydrogéologique plus détaillées des séries citées précédemment sont décrites ci-après (Fig. 2(a),(b)):

La Formation Sincedejo comprend deux membres, Inférieur et Supérieur, et affleure en surface dans la zone centrale et occidentale de l'aire étudiée. Elle se caractérise au niveau de la géomorphologie par un paysage de collines à pentes fortes. Elle est constituée de séries de sables micacés à grain fin à moyen cimenté en partie par des argiles et par des sables conglomératiques composé principalement de quartz cimenté par du calcaire prédominant (INSFOPAL, 1981). Au niveau structural elle est présente sur les flancs des plis anticlinaux et synclinaux qui affectent aussi les formations plus anciennes que l'on trouve dans la région, Formation Toluvejo (Tet) et Carmen (Tmc). Du point de vue hydrogéologique cette formation ne constitue pas une ressource aquifère très productive. L'âge de cette formation est compris, selon les auteurs, entre le Miocène supérieur et le Pliocène inférieur (Duque-Caro, 1980).

La Formation Morroa (Tpm) affleure dans toute la zone d'étude, le pli orienté vers l'est comprend une large et longue bande qui s'étend du nord au sud, sur une largeur moyenne de 3 km et une épaisseur moyenne de 500 m. La géomorphologie en relation avec cette formation présente une topographie ondulée formée par un système de collines basses et allongées, de pentes faibles à modérées alternant avec de petites vallées peu profondes. Du point de vue lithologique cette formation est constituée principalement par des couches de grès friables et de conglomérats peu

consolidés, intercalées avec des couches argileuses, produit de la sédimentation détritique dans un environnement de cône et/ou de lit alluvial. Au niveau structural elle forme en partie le coeur du grand monoclinale présent dans la zone d'étude avec un angle d'inclinaison des couches variable, de 5° à 20°. Elle est en concordance avec la Formation Sincelejo. La mise en place de ces sédiments s'est faite au cours du Pliocène moyen à supérieur.

Du point de vue hydrogéologique, la formation Morroa peut être considérée comme un aquifère multi couche (huit niveaux aquifères – du toit A à la base de la formation H – séparés par des niveaux imperméables argileux) mais avec des connexions entre les niveaux aquifères. La nappe se rencontre entre 50 et 85 m de profondeur, la conductivité hydraulique est comprise entre  $4.6 \times 10^{-5}$  et  $13.9 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$  avec une transmissivité comprise entre  $8.7 \times 10^{-5}$  et  $7 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  (Pacheco & Villegas, 2003). D'après les mêmes auteurs, le coefficient d'emmagasinement calculé serait de l'ordre de  $1.1 \times 10^{-3}$  à  $1.1 \times 10^{-4}$ , reste néanmoins qu'étant en condition d'aquifère libre, du moins dans la zone d'étude, le calcul d'un coefficient d'emmagasinement n'a que peu de signification. Selon les résultats de référencement d'activité, l'exploitation de l'aquifère de Morroa, dans le secteur de Sincelejo, Corozal et Morroa, est très intense avec un pompage en continu et reste concentré dans une zone délimitée (campo de pozo de Corozal). Actuellement il existe 30 forages actifs, sept inactifs et 36 abandonnés dont les profondeurs se situent entre 150 et 400 m pour une extraction par puits entre 5 et 60  $\text{L s}^{-1}$ , et une extraction totale de 650  $\text{L s}^{-1}$ . La conséquence de cette utilisation intensive est un abaissement des niveaux statiques constatés de 4 à 15  $\text{m an}^{-1}$  ces dernières années, même si lors de l'arrêt des pompages on assiste à une certaine récupération.

Plus en détail, la littérature (INSFOPAL, 1981; INGEOMINAS, 1992; Buitrago & Donado, 2000; FINAGUAS-CARSUCRE, 2001; De Vivero & Montoya, 2004; Abreu & Díaz, 2005) subdivise l'aquifère de Morroa en quatre structures principales (Fig. 2(c)):

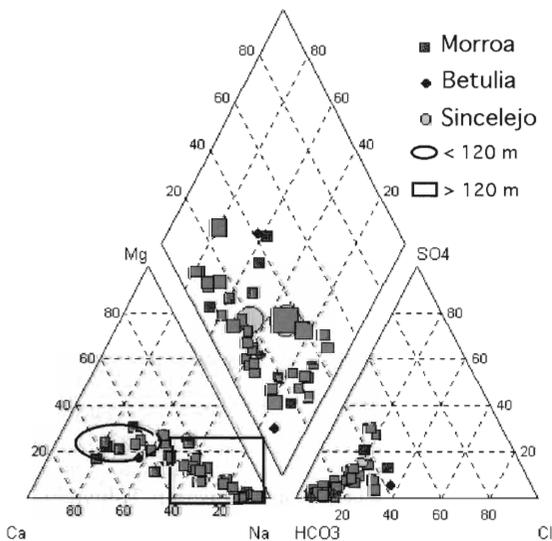


Fig. 3 Analyses chimiques des eaux souterraines de la zone d'étude, diagramme de Piper.

Le groupe 1 rassemble les niveaux A (en contact direct avec la formation Betulia) et B qui présentent des zones de connexions entre eux. Les niveaux sont composés de sable lithique fin à grossier contenant des lentilles conglomératiques et de fines couches d'argiles, l'épaisseur du niveau A et B varient de 30 à 226 m et présente une forte perméabilité, des essais de pompages donnent des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de  $4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ .

Le groupe 2 concerne les niveaux C et D, séparés du niveau B par une couche argileuse. Les deux niveaux sont constitués par des grès à grain fin et moyen ferrugineux contenant des lentilles et couches de graviers très friables et quelques lentilles d'argiles. L'épaisseur varie entre 38 et 164 m. Ce niveau présente une porosité primaire importante et sa disposition structurale peut favoriser l'infiltration et donc la recharge et le stockage d'eau souterraine. Des essais de pompages donnent des valeurs de conductivité hydraulique de l'ordre de  $6 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ .

Le groupe 3 concerne les niveaux E et F, séparés du niveau C par une couche d'argile et séparés entre eux par des lentilles d'argile. Ces deux niveaux sont constitués de grès à grains moyens, de grès à grains fins argileux avec des lentilles conglomératiques et des lentilles argileuses. L'épaisseur de ces couches varie de 40 à 50 m pour le niveau D et de 40 à 60 m pour le niveau E. La perméabilité primaire est relativement basse à moyenne pour le niveau D et de moyenne à haute pour le niveau E. Le groupe 4 concerne les niveaux G et H, séparés du niveau F par une couche d'argile. Ces niveaux sont constitués de grès à grains fins à moyens consolidés, grès à grains fins argileux contenant des concrétions endurcies de grès calcaires, des lentilles agglomérées et des lentilles argileuses. L'épaisseur de ces couches n'est pas connue en raison de l'absence de puits profonds dans ces niveaux, seuls cinq puits artisanaux sont présents. La porosité primaire est relativement basse en relation avec le type de sédimentologie mais la disposition structurale reste favorable à l'infiltration et à la recharge. Sur ces niveaux ont été recensées deux sources dans le secteur de La Flores et de La Peñata (nord de la zone d'étude).

La Formation Betulia (Qpb) affleure dans la partie orientale de la zone d'étude en apparente discordance avec la Formation Morroa. Elle se caractérise par un paysage de petites collines à pentes douces orientées vers le sud-est, dont la morphologie est typique de la savane du département de Sucre. La structure lithologique est constituée par une séquence monotone d'argiles bigarrées intercalée avec des argiles sableuses, des argiles avec graviers et de fines couches et lentilles de sables argileux. L'âge de la formation s'est déposée au cours du Quaternaire pendant le Pléistocène. La valeur hydrogéologique de cette formation est très faible.

Les dépôts alluviaux (Qal) d'âge Holocène, sont localisés au bord des principales rivières de la zone. En général ils sont d'épaisseur relativement faible et sont formés par des sables, graviers, argiles et limons, produits de la sédimentation détritique de ces rivières. Les principaux dépôts alluviaux sont ceux des rivières Corozal, Canoas (au sud) et Mancomoján (au nord), qui serpentent sur la zone potentielle de recharge de l'aquifère de Morroa. Ils se caractérisent par une série de sables mal classés, comprenant des couches fines d'argiles intercalées, le tout ayant une épaisseur qui varie entre 0 et 15 mètres.

## RESULTATS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES

### Chimie

Deux campagnes de mesures de la géochimie des eaux ont été réalisées, la première en Avril 2002 sur l'ensemble de l'aquifère (36 points de mesures) avec le problème que les forages captent tous les niveaux aquifères et donc que les eaux sont mélangées et la seconde en avril 2003 uniquement sur le niveau supérieur A (16 points de mesures) pour s'assurer que les eaux représentent chimiquement un seul niveau aquifère. Les résultats de la première campagne (Avril 2002), ont montré une variabilité importante de la conductivité et donc de la salinité (180 à 1200 mg/L) ainsi que l'existence de deux groupes d'eaux chimiquement différenciés, l'un bicarbonaté calcique et l'autre bicarbonaté sodique (Fig. 3). La répartition de ces eaux se fait suivant un schéma relativement simple car dépendant de la profondeur du forage. Pour les forages inférieurs à 120 m le faciès est toujours bicarbonaté calcique et pour les forages plus profonds, le faciès est bicarbonaté sodique. Cette différenciation, en l'absence d'autre variabilité d'élément chimique liée au paramètre profondeur peut être reliée à un échange cationique avec les couches et lentilles argileuses nombreuses dans la Formation Morroa et indique donc par la même un temps de séjour plus important au fur et à mesure que  $\text{Na}^+$  devient prédominant. Les résultats de la seconde campagne uniquement sur le niveau A, montre les mêmes caractéristiques de la relation

profondeur vs rapport (calcium/sodium). On note par contre des indices importants localement (trois forages, deux au centre et un au sud de l'aquifère de Morroa) de pollution anthropique avec des teneurs élevées en nitrates (20 à 90 mg L<sup>-1</sup>) et en chlorures (67 à 138 mg L<sup>-1</sup>). La Fig. 4 qui représente la variabilité spatiale en chlorures sur l'aquifère de Morroa, montre bien des enrichissements ponctuels en chlorures que l'on peut expliquer par une contamination locale, associée aux fuites du réseau d'assainissement et des eaux résiduelles non traitées.

Pour les deux autres formations, Sincelejo et Betulia, on ne détecte pas de faciès chimique particulier (bicarbonaté calcique).

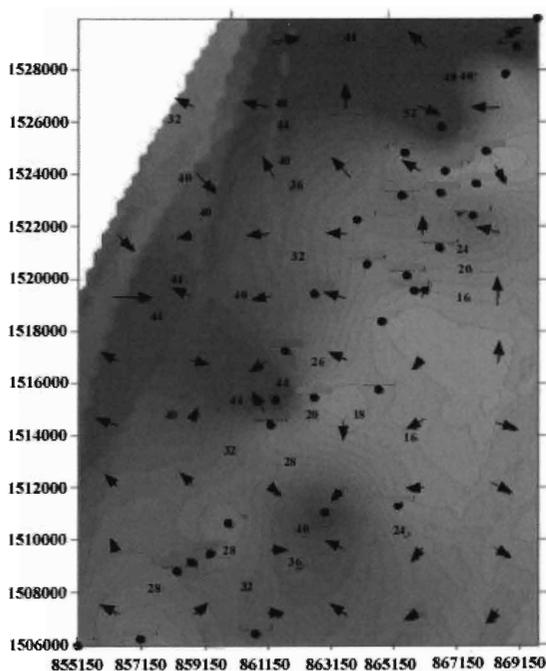


Fig. 4 Représentation spatiale des chlorures dans l'eau de l'aquifère de Morroa en mg/L, les flèches représentent le gradient de concentration.

## Isotopes

Il est nécessaire pour interpréter la composition isotopique des eaux souterraines de les relier à la composition isotopique des précipitations qui restent la donnée d'entrée à tout système aquifère. Pour cela deux pluviomètres ont été installés couvrant la zone d'étude (Corozal et Ovejas), et on dispose d'une année complète de données mensuelles (Fig. 5). La variation isotopique de la pluie mensuelle varie de -1.2‰ à -12.3‰ en oxygène 18 et -6 à -41‰ en deutérium. La variation isotopique est quasi identique sur les deux stations, avec des teneurs isotopiques plus appauvries au moment de la saison des pluies et des teneurs plus enrichies durant la saison sèche, en concordance avec le schéma classique qui gère la composition isotopique des précipitations durant l'année, avec l'effet de masse prédominant dans la zone tropicale (Fig. 5). Dans le graphe oxygène-18 vs deutérium, on peut voir que La Ligne Météorique Locale (LML,  $^2\text{H} = 8.3 \times ^{18}\text{O} + 9.6$ ) est légèrement en dessous mais reste parallèle à la Ligne Météorique Mondiale (WML,  $^2\text{H} = 8 \times ^{18}\text{O} + 10$ ) avec donc une genèse des précipitations dans le cadre de la circulation générale atmosphérique. Au mois de Mars et Avril 2002 des mesures de Tritium ont été aussi effectuées sur les précipitations mensuelles aux deux stations Corozal et Ovejas, les teneurs s'établissent entre 0.86 et 1.57 UT qui constituent la teneur de base de référence atmosphérique actuelle dans la zone d'étude.

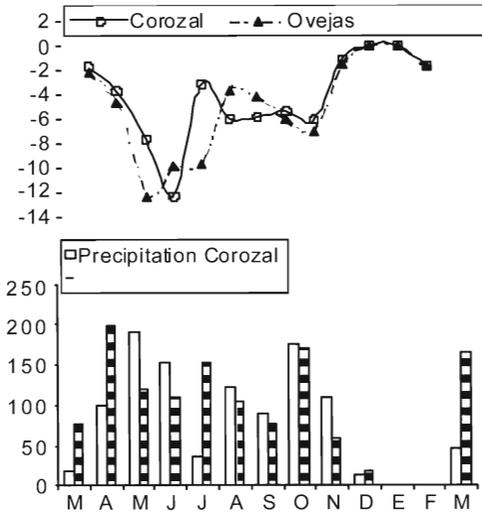


Fig. 5 Composition isotopique des précipitations mensuelles sur la zone, Mars 2002 à Mars 2003.

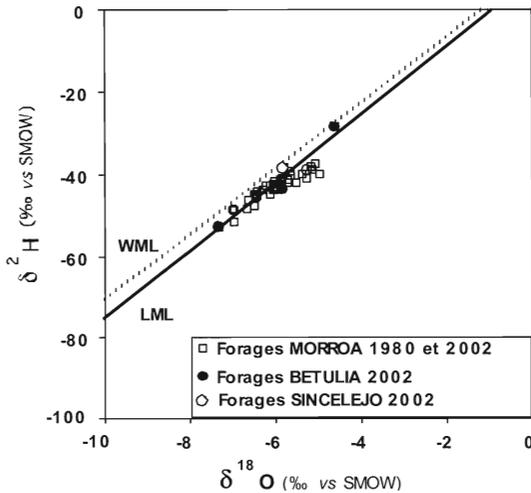


Fig. 6 Composition isotopique des eaux souterraines.

Dans le graphe oxygène-18 vs deutérium (Fig. 6), la composition isotopique des eaux souterraines restent groupée autour de la valeur de la composition isotopique des précipitations de la saison 2002–2003 pondérée par la hauteur de pluie, cela signifie des conditions climatiques identiques à l'actuel lors de l'infiltration des eaux vers la nappe. Quelques points, les plus enrichis en isotopes stables de l'eau, semblent montrer une possible évaporation qui reste limitée. Les teneurs isotopiques dans les eaux de l'aquifère de Morroa sont pour l'oxygène-18 comprises entre  $-5$  et  $-7\text{‰}$  et  $-40$  et  $-55\text{‰}$  pour le deutérium. L'unique mesure sur la formation Sincelejo est dans la gamme de mesure des eaux de l'aquifère de Morroa et les trois points de mesures de l'eau de la formation Betulia encadrent celles de Morroa avec une gamme de mesures plus large, pour l'oxygène-18 comprises entre  $-4.5$  et  $-7.5\text{‰}$  et  $-30$  et  $-57\text{‰}$  pour le deutérium. On ne trouve aucune relation particulière entre isotopes et profondeur de la nappe ou du forage ou isotope et conductivité, cela pourrait éventuellement être masqué par le mélange des eaux des différents niveaux aquifères.

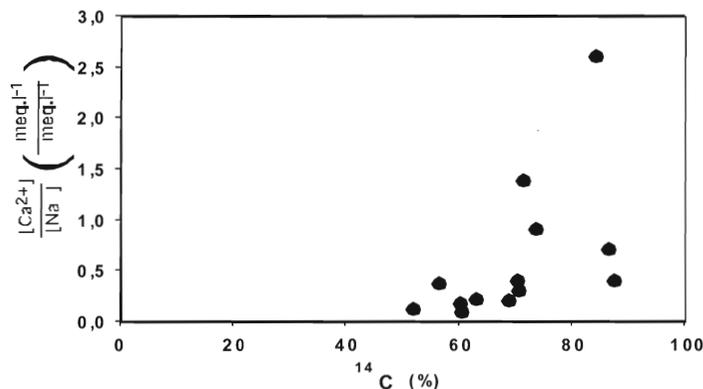


Fig. 7 Relation carbone 14 en fonction du rapport  $[\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+]$ .

Les valeurs de tritium (uniquement sur les eaux de l'aquifère de Morroa) mesurées sur 14 points lors de la première campagne de terrain ont montré des teneurs faibles (dans la limite de l'erreur) ou nulle ce qui indique que les eaux de l'aquifère de Morroa ont un temps de résidence supérieur au début des essais nucléaires atmosphériques, donc antérieur à 1950. Les résultats du  $^{14}\text{C}$  (uniquement sur les eaux de l'aquifère de Morroa) donnent une activité comprise entre 51.9 et 87.7 %. Les teneurs en  $^{13}\text{C}$  des bicarbonates issus de la précipitation des eaux de Morroa sont comprises entre  $-10.5$  et  $-16.4\%$  vs PDB, ces valeurs sont relativement négatives et exclues un possible apport de bicarbonates issus de la dissolution de carbonates primaires ( $^{13}\text{C} = 0\%$  et  $^{14}\text{C} = 0\%$ ) qui pourraient altérer la mesure de l'activité, d'ailleurs aucune relation n'est visible dans un graphe  $^{13}\text{C}$  vs  $^{14}\text{C}$  entre un pôle biogénique et un pôle minéral. Considérant ces résultats on peut utiliser un simple modèle de décroissance radioactif pour déterminer l'âge de l'eau dans chaque forage. Celui ci est compris entre 836 et 5168 ans, ce qui montre que la recharge actuelle est quasi inexistante, confirmant bien les résultats issus des mesures du tritium.

La chimie avait montré l'existence de deux pôles chimiques l'un bicarbonaté calcique l'autre bicarbonaté sodique liés a priori au temps de contact de l'eau de l'aquifère avec les couches d'argiles favorisant ainsi l'échange cationique. Si l'on compare l'activité en carbone 14 et le rapport  $[\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+]$  on trouve une tendance identique (Fig. 7), en général plus l'échantillon d'eau prélevé montre une activité basse en carbone-14, plus le rapport  $[\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+]$  diminue, donc plus l'eau est vieille, plus l'échange cationique remplaçant le calcium par le sodium est important.

Lors de la seconde campagne, onze autres mesures de carbone-14 ont été faites sur le niveau A, les activités s'échelonnent entre 62 et 109% dont trois entre 95 et 109%, ce qui indique une contribution d'eau récente sur ces trois points (temps de résidence inférieur à 50 ans) dans l'aquifère. Ces trois points coïncident avec les trois points où a été détectée une contamination en nitrates et chlorures mis en évidence par les résultats chimiques. On peut penser à une fuite locale du réseau d'assainissement mais il est aussi probable que la contamination se fasse directement au niveau du conduit des forages qui n'assurerait plus l'étanchéité entre la surface et l'aquifère, les forages n'étant pas protégés par un périmètre grillagé.

Il n'en demeure pas moins qu'à l'échelle régionale 22 mesures de carbone 14 confirment une recharge très faible avec un taux de renouvellement de l'ordre de 0.0002 à 0.001.

L'étude géochimique et isotopique tend à montrer que l'aquifère de Morroa est constitué d'eaux à renouvellement très lent et qu'aux conditions actuelles d'utilisation de la ressource, l'aquifère est en déséquilibre au niveau du bilan. Les relations éventuelles de mélange avec les eaux des deux autres formations Sincelejo et Betulia ne peuvent pas être mis en évidence à ce point de l'étude, d'autres mesures sur ces deux formations seraient nécessaires.

## CONCLUSIONS

L'aquifère multicouche de Morroa est la source d'alimentation principale en eau au niveau régional, dans un contexte de régime climatique semi-aride et qui dans ce contexte est très sollicité, matérialisé par une baisse continue des niveaux phréatiques depuis plusieurs décennies. Cet aquifère se révèle ainsi d'une importance vitale pour le développement de la zone. Cependant les résultats chimiques et isotopiques montrent que la recharge naturelle actuelle est très faible ponctuellement liée probablement à des ouvrages non imperméables, ou inexistante (temps de résidence calculé entre 800 et 5200 ans) et dans tous les cas ne compense aucunement l'extraction actuelle. L'utilisation des techniques isotopiques  $^2\text{H}$ ,  $^3\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$  et  $^{14}\text{C}$  en complément des outils traditionnels dans cette problématique de gestion de la ressource souterraine en milieu semi-aride a permis ainsi d'affiner le mode de recharge de l'aquifère de Morroa pour permettre la meilleure gestion possible de cette ressource peu ou non renouvelable à notre échelle de temps. A partir de ces résultats, il semble nécessaire d'adapter les prélèvements et de contrôler les volumes extraits sur l'aquifère de Morroa pour limiter la baisse du niveau aquifère. D'un autre côté, la sédimentologie très favorable à l'infiltration de la formation Morroa, permet de penser qu'il semble possible de favoriser la création de zones d'infiltration artificielle qui pourraient être utilisées tant pendant la saison des pluies, en retenant les eaux de ruissellement et une partie des eaux de rivières, que pendant la saison sèche en recyclant les eaux urbaines qui pourrait alors servir aussi de recharge potentielle pour l'aquifère.

## REFERENCES

- Abreu, Y. & Díaz, M. (2005) Determinación de la geometría del acuífero Morroa y localización de futuras zonas de posible exploración y explotación del acuífero, mediante el uso de líneas sísmicas y pozos de petróleo.: CARSUCRE-Aguas de la Sabana, Sincelejo, Colombia.
- Barrera, R. (2002) Evaluación Hidrogeológica regional del Departamento de Sucre. INGEOMINAS, Bogotá, 10–14.
- Buitrago, J. & Donado, L. (2000) Evaluación de las condiciones de explotación del agua subterránea en la zona de recarga del acuífero Morroa, departamento de Sucre y Córdoba (Colombia), trabajo de grado, Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- De Vivero, J. & Montoya, C. (2004) Elaboración de la red de flujo del acuífero Morroa en el Sector Sincelejo, Corozal y Morroa, trabajo de grado, Ingeniería Civil, Universidad de Sucre, Sincelejo, Colombia.
- Duque-Caro, H. (1980) Geotectónica y evolución de la Región Noroccidental Colombiana. *Bol. Geol. INGEOMINAS*, Bogotá 23(3), 1–34.
- FINAGUAS-CARSUCRE (2001) Sistema de Información para la Gestión de Aguas Subterráneas, SIGAS CARSUCRE, Sincelejo.
- IGAC (1998) Carta de Suelos del departamento de Sucre. Igac, Bogotá, Colombia.
- IGAC (2003) Sucre: Características geográficas. Igac, Bogotá, Colombia, 59–70.
- INGEOMINAS (1992) Evaluación hidrogeológica del acuífero Morroa. Informe Ingeominas, Bogotá.
- INGEOMINAS (2000) Memorias del mapa hidrogeológico de Sucre. Informe Ingeominas, Bogotá.
- INSFOPAL (1981) Estudio hidrogeológico del flanco nororiental de la serranía de San Jacinto y la zona litoral del Golfo de Morrosquillo. Convenio Colombo – Holandés, Bogotá.
- Pacheco, D. & Villegas, P. (2003) Caracterización hidráulica del acuífero Morroa en el sector Sincelejo, Corozal y Morroa. Tesis de pregrado Universidad de Sucre, Sincelejo.
- Rodríguez, G. (1993) Estudio hidrogeológico del acuífero de Morroa. Ingeominas, Bogotá, Colombia, 12–33.

IAHS Publication 340  
ISSN 0144-7815

 friend 2010



# Global Change: *Facing Risks and Threats to Water Resources*

Edited by:

*Eric Servat*

*Siegfried Demuth*

*Alain Dezetter*

*Trevor Daniell*

Co-editors: *Ennio Ferrari, Mustapha Ijjaali, Raouf Jabrane,  
Henny van Lanen & Yan Huang*



# Global Change: *Facing Risks and Threats to Water Resources*

Edited by:

**ERIC SERVAT**

*UMR HydroSciences Montpellier (HSM),  
Université Montpellier 2, France*

**SIEGFRIED DEMUTH**

*Hydrological Processes and Climate Section, Division of Water Sciences,  
Natural Sciences Sector, UNESCO, Paris, France*

**ALAIN DEZETTER**

*UMR HydroSciences Montpellier (HSM),  
Université Montpellier 2, France*

**TREVOR DANIELL**

*School of Civil and Environmental Engineering,  
University of Adelaide, Australia*

Co-edited by: ENNIO FERRARI, MUSTAPHA IJJAALI,  
RAOUF JABRANE, HENNY VAN LANEN & YAN HUANG

Proceedings of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco,  
25–29 October 2010.

**IAHS Publication 340**

in the IAHS Series of Proceedings and Reports

Published by the International Association of Hydrological Sciences 2010

IAHS Publication 340

ISBN 978-1-907161-13-1

British Library Cataloguing-in-Publication Data.

A catalogue record for this book is available from the British Library.

**©IAHS Press 2010**

*This publication may be reproduced as hard copy, in whole or in part, for educational or nonprofit use, without special permission from the copyright holder, provided acknowledgement of the source is made. No part of this publication may be electronically reproduced, transmitted or stored in a retrieval system, and no use of this publication may be made for electronic publishing, resale or other commercial purposes without specific written permission from IAHS Press.*

The papers included in this volume have been reviewed and some were extensively revised by the Editors, in collaboration with the authors, prior to publication.

IAHS is indebted to the employers of the Editors for the invaluable support and services provided that enabled them to carry out their task effectively and efficiently.

The information, data and formulae provided in this volume are reproduced by IAHS Press in good faith and as finally checked by the author(s); IAHS Press does not guarantee their accuracy, completeness, or fitness for a given purpose. The reader is responsible for taking appropriate professional advice on any hydrological project and IAHS Press does not accept responsibility for the reader's use of the content of this volume. To the fullest extent permitted by the applicable law, IAHS Press shall not be liable for any damages arising out of the use of, or inability to use, the content.

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of IAHS concerning the legal status of any country, territory, city or area or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

The use of trade, firm, or corporate names in the publication is for the information and convenience of the reader. Such use does not constitute an official endorsement or approval by IAHS of any product or service to the exclusion of others that may be suitable.

Publications in the series of Proceedings and Reports are available from:  
IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK  
tel.: +44 1491 692442; fax: +44 1491 692448; e-mail: [jilly@iahs.demon.co.uk](mailto:jilly@iahs.demon.co.uk)

Printed by Information Press

---

Cover picture: Southern Morocco by Eric Servat