

MODELLAZIONE DELL'ACQUIFERO SUB-TROPICALE DELLA CITTÀ DI SAN PEDRO SULA (HONDURAS) FINALIZZATA ALLA GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA

HYDRODYNAMIC NUMERICAL MODEL AIMED AT WATER MANAGEMENT AND WITHDRAWAL OF SUB-TROPICAL ALLUVIAL AQUIFER IN SAN PEDRO SULA AREA (HONDURAS)

PATRIZIO TORRESE(*), RAFFAELE MADONNA(*), PATRIZIO SIGNANINI(*) & VINCENZO COSTANTINO(**)

(*) "G. d'Annunzio" University of Chieti-Pescara - DiGAT Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio, Via dei Vestini 31, - 66013 Chieti Scalo, Italy

(**) C. Lotti & Associati - Consulting Engineering, Via del Fiume, 14 - 00186 Roma, Italy

RIASSUNTO

Il lavoro presenta lo sviluppo ed i risultati della modellazione numerica idrodinamica effettuata nell'ambito dello studio multidisciplinare che ha interessato l'acquifero alluvionale sub-tropicale della città di San Pedro Sula (Honduras), al fine di quantificare la risorsa disponibile per l'approvvigionamento idrico ad uso potabile della popolazione. Una volta sviluppato il modello concettuale e ricavati i parametri idraulici di input tramite indagini dirette (stratigrafie) ed indirette (indagini geoelettriche e log elettrici in foro), si è operato mediante modellistica inversa, cioè imponendo le piezometrie osservate e stimando quali volumi d'acqua fossero necessari al mantenimento delle stesse condizioni. Ciò ha permesso, quindi, una ricostruzione del corpo idrico sotterraneo relativamente semplice in quanto non è stato necessario stimare l'entità degli apporti che sono risultati, anzi, un risultato di calcolo. La modellazione, effettuata mediante il codice di calcolo alle differenze finite Visual Modflow 2000 (MCDONALD & HARBAUGH, 1984), ha permesso di simulare le caratteristiche essenziali del sistema idrogeologico in studio e di valutare la disponibilità idrica del sistema nel suo complesso. Successivamente, lo studio si è focalizzato sulla modellazione di dettaglio delle aree dei campi pozzi sulla base di prove mirate. Il lavoro ha permesso di stimare i tassi di pompaggio sostenibili ed ottenere simulazioni e previsioni per una corretta gestione e ottimizzazione dei campi pozzi.

PAROLE CHIAVE: *modellazione numerica, idrogeologia, acquifero alluvionale, estrazioni idriche*

INTRODUZIONE

L'acquifero alluvionale del bacino di San Pedro Sula è di fondamentale importanza per l'approvvigionamento idrico della città omonima, la seconda città dell'Honduras con circa 800.000 abitanti (Fig. 1). Lo sviluppo sostenibile dell'area, in rapido aumento demografico, non può prescindere dall'ottimizzazione della risorsa idrica.

Nell'ambito di uno studio multidisciplinare dell'acquifero, è stato realizzato un modello numerico idrogeologico (PRICKETT & LONNQUIST, 1971; TRECOTT, 1975; TRECOTT *et alii*, 1976) come strumento per quantificare le risorse disponibili per l'approvvigionamento idrico ad uso potabile della popolazione (C. LOTTI & ASSOCIATI, 2002; C. LOTTI

ABSTRACT

This paper deals with the results of a hydrodynamic numerical model carried out within the multidisciplinary study of San Pedro Sula (Honduras) alluvial aquifer. The main focus was the appraisal of water resources for the supply of drinking water. As well as normal hydrogeological methodologies and hydrological ones, the use of geo-electrical prospections, well electric logs and stratigraphies made it possible to evaluate hydraulic parameters which were used as model input data. Due to the complexity and extension of this kind of aquifer, a reverse model was built by imposing the measured piezometric levels and estimating the necessary water volumes for maintaining the same conditions. It was so possible to reconstruct the hydrogeological system in a relatively easy manner because inflow amounts were the results of the model rather than input data. It has so been possible to simulate the main features and estimate the water supply of the hydrogeological system. Visual Modflow software package (finite difference calculation code, MCDONALD & HARBAUGH, 1984) was used for the modelling. Furthermore, a detailed modelling carried out on the basis of well fields pumping tests data, allowed to obtain simulations and forecasts aimed at the management of water extraction.

KEY WORDS: *numerical modelling, hydrogeology, alluvial aquifer, water withdrawal*

INTRODUCTION

The alluvial aquifer of the San Pedro Sula basin is of great importance for water supply of the city which bears the same name, the second largest city of Honduras with 800,000 inhabitants (Fig. 1). A sustainable development of the area, which is undergoing a rapid demographic increase, must be assessed with regard to water resource optimization.

A multidisciplinary study was conducted on the aquifer which was the background for the development of a hydrogeological numerical model (PRICKETT & LONNQUIST, 1971; TRECOTT, 1975; TRECOTT *et alii*, 1976) conceived to assess water resources neces-

& ASSOCIATI, 2003). Un modello idrodinamico alle differenze finite di simulazione del flusso sotterraneo è stato sviluppato dapprima orientato alla determinazione della quantità di acqua disponibile nel sistema generale. Successivamente, lo studio si è focalizzato sulla modellazione di dettaglio delle aree dei due campi pozzi denominati Sunceri e Chamelecon (Fig. 1) gestiti dalla società locale ASP (Agua De San Pedro). In questa seconda fase, la programmazione di prove mirate sui pozzi ha permesso di valutare le potenzialità idriche a breve e a lungo termine delle singole aree produttive e le problematiche connesse con le estrazioni idriche concentrate. Nell'area sono, inoltre, presenti numerosi pozzi privati, utilizzati principalmente per scopi irrigui ed industriali, caratterizzati da estrazioni idriche generalmente inferiori.

Studi precedenti (DIMA & MONCADA, 1994; DIMA *et alii*, 1994) e relativi modelli numerici sono stati eseguiti in passato da NORPLAN (1986a, 1986b, 1987, 1990) e da POMPER (1999). Tuttavia i forti abbassamenti piezometrici previsti dai precedenti modelli matematici (NORPLAN, 1990; POMPER, 1999) non si sono verificati nel corso degli anni nonostante il fatto che i prelievi all'epoca fossero la metà di quelli attuali.

CARATTERISTICHE GEOLOGICHE E MORFOLOGICHE

L'area in studio è costituita da una zona di piana alluvionale e collinare (circa 120 km² a quota variabile tra i 20 m e i 360 m s.l.m.) circondata da rilievi sui lati di nord-ovest, ovest e sud e interessata da numerosi corsi d'acqua (Fig. 1).

Il clima dell'area in studio, di tipo sub-tropicale, è caratterizzato da precipitazioni distribuite nel corso dell'anno in una stagione secca

sary for supply to the population (C. Lotti & Associati, 2002; C. Lotti & Associati, 2003). An initial hydrodynamic finite difference model was developed for assessing water resource quantities available from the entire system. At a later stage, the study focused on a localized simulation of two well fields, the Sunceri and the Chamelecon well fields (Fig. 1), both run by the local ASP (Agua De San Pedro) authority. Accurately programmed tests on the wells were of great importance for estimating both the water resources of the single production areas, over the short and long term, and the problems associated with localized water extractions. Many private wells, used for industrial and agricultural purposes, are found in the area but usually extract small quantities of water.

Earlier studies (DIMA & MONCADA, 1994; DIMA *et alii*, 1994) with relative numerical models have been developed in the past, by NORPLAN (1986a, 1986b, 1987, 1990) and by POMPER (1999). Excessive lowering of the water table foreseen in previous mathematical models (NORPLAN, 1990; POMPER, 1999) has not occurred over the years despite the doubling of present day water discharges.

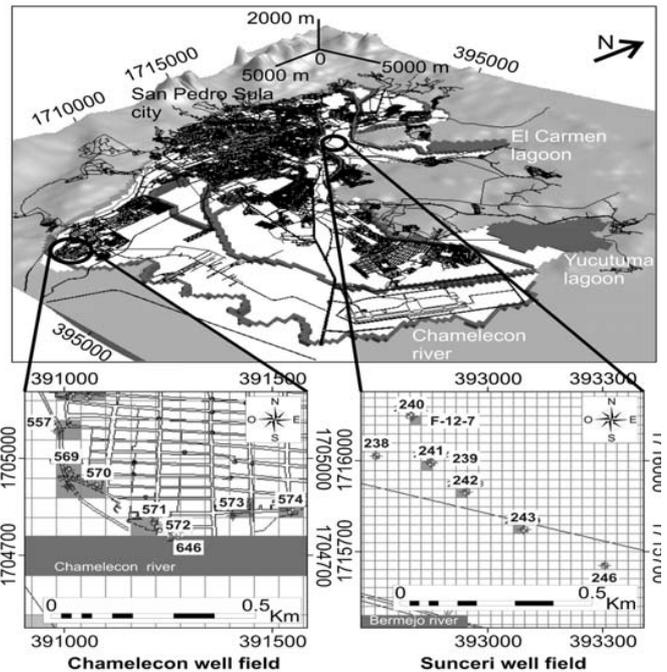
GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGIC FEATURES OF THE AREA

The area under study consists of an alluvial plain and an area dominated by hills (about 120 km² with altitudes varying from 20 m to 360 m a.s.l.) surrounded by mountain ranges to the north-west, west and southern sides and with several water courses located in the area (Fig. 1).

A sub-tropical climate dominates the area where precipitation is



Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio e localizzazione dei campi pozzi
- Site Map with well field location



HYDRODYNAMIC NUMERICAL MODEL AIMED AT WATER MANAGEMENT AND WITHDRAWAL OF SUB-TROPICAL ALLUVIAL AQUIFER IN SAN PEDRO SULA AREA (HONDURAS)

(novembre-maggio) e in una umida (giugno-ottobre) per un totale in media di 840 mm/a per l'area pianeggiante e collinare (200 km²) e di 1560 mm/a per le zone montuose (100 km²).

Dall'esame delle figg. 1, 2 si può notare come diversi siano gli elementi geomorfologici rilevati nell'area. Nella parte orientale e centrale della piana compaiono zone fortemente depresse, a sedimentazione molto fine (limi e argille), caratterizzate dalla presenza di estese lagune (El Carmen e Yucutuma). L'incisione da parte dei fiumi ed il loro sovralluvionamento ha portato alla formazione di numerosi terrazzi alluvionali fino al terzo ordine; la sedimentazione è di tipo gradato presentando nella parte alta le granulometrie maggiori.

Caratteristiche delle zone di contatto tra la catena montuosa (Merendon) e l'area di pianura, sono invece le conoidi di deiezione che si sono generate dal trasporto di materiale da parte dei fiumi che, in condizioni energetiche molto elevate, hanno depositato rapidamente elementi di grandi dimensioni. Depositi di talus si rinven-gono nelle aree collinari e nelle zone vallive.

Il basamento è costituito nell'area (HORNE *et alii*, 1976) da rocce sedimentarie e vulcaniche precambriane metamorfosate in facies anfibolite-almandino, sottostanti una sequenza pelitica debolmente metamorfosata. Le rocce del basamento sono in contatto di tipo unconformity con depositi calcarei del Cretacico Inferiore. Tutto il complesso è stato interessato da plutonismo a composizione intermedia risalente a 305 ± 12 milioni di anni e 150 ± 13 milioni di anni e a composizione acida risalente al Cretacico Superiore e Terziario Inferiore (ELVIR, 1974, 1976; FOYE, 1918; FINCH, 1981; MILLS RICHARD, 1991; WILLIAMS & MCBIRNEY, 1969). Le forme circolari che si notano da immagini satellitari si riferiscono alle intrusioni profonde, alcune delle quali affioranti, altre rimaste in profondità (Fig. 2).

Dal punto di vista strutturale, sono rilevabili nell'area faglie E-

distributed over a dry season (November-May) and a wet season (June-October) for a total of 840 mm/yr over the alluvial plain (200 km²) and 1560 mm/yr over the mountainous regions (100 km²).

The different geomorphologic elements found in the area are outlined in Figg. 1 and 2. Strongly depressed areas are located in the eastern and central parts of the plain. These are characterized by very fine sedimentation (lutites and clays). Extensive lagoons (El Carmen and Yucutuma) are found here. Rivers have cut through them and this, together with aggradations has led to the formation of numerous alluvial terraces up to third order; graded sedimentation occurs, with the larger grain sizes to the top.

Alluvial fans are typical of the contact areas between the mountain chain (Merendon) and the alluvial plain. They are the result of transport of material by the rivers which, in conditions of extremely high energy, have rapidly deposited large-sized blocks. Talus deposits can be found in the hilly areas as well as in the valley zones.

The bedrock of the area is characterized (HORNE *et alii*, 1976) by Precambrian sedimentary and volcanic rock that has metamorphosed into amphibolite-almandine facies and which is located below a weakly metamorphosed pelitic sequence. An unconformity characterizes the contact between the bedrock and the limestone deposits from the Lower Cretaceous period. The entire complex has been affected by intermediate composition plutonism going back to 305 ± 12 Ma and 150 ± 13 Ma and acid composition dating back to the Upper Cretaceous and the Lower Tertiary periods (ELVIR, 1974, 1976; FOYE, 1918; FINCH, 1981; MILLS RICHARD, 1991; WILLIAMS & MCBIRNEY, 1969). The circular geometries seen from satellite images refer to deep intrusions, some of which have surfaced, while others have remained at some depth (Fig. 2).

From a structural viewpoint, E-W faults can be identified in

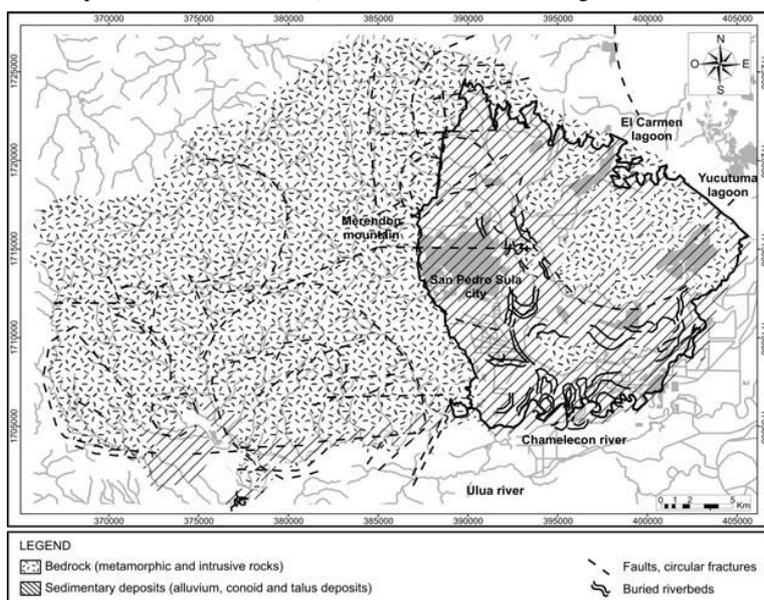


Fig. 2 - Carta geologico-geomorfologica dell'area in studio (dominio del modello in linea marcata)
- Lithological - geomorphologic sketch map of the area under study (model domain in bold line)

W talora riempite da grossi filoni aplitici e quarziticci, talora anche basici e talora con calcite secondaria e faglie NE-SW che tagliano il basamento. Si tratta per lo più di motivi trascorrenti in corrispondenza dei quali talora si riscontrano eventi idrotermali (ENEE, 1988; EPPLER *et alii*, 1986; FINCH, 1986; PATINO, 1993; PIERCE HERBERT & RIVERA-MONTES, 1991).

Il maggiore elemento idrografico nell'area in studio è costituito dalla valle dell'Ulua (a sud-est del dominio del modello, Fig. 2) il cui sviluppo sarebbe legato ad un sistema distensivo di faglie orientate N-S risalenti al Terziario.

Il pacchetto sedimentario sede dell'acquifero è caratterizzato da una forte eterogeneità, legata ad una sedimentazione di tipo torrenziale. Le repentine variazioni laterali di facies, legate alla complessa evoluzione geologica dell'area, fanno sì che i pozzi vicini abbiano stratigrafie difficilmente correlabili.

IL SISTEMA ACQUIFERO

L'acquifero in studio (circa 120 km²) è delimitato dalla zona montuosa ad W, dalla zona collinare a N ed E, dal letto del fiume Chamelecon a S e SE (Fig. 1) ed ha una profondità variabile tra 0 m e 390 m (Fig. 3). Le rocce che costituiscono il basamento inteso in senso idrogeologico vanno da rocce intrusive acide (graniti, granodioriti) a migmatiti, a rocce ad alto metamorfismo (quali gneiss), a scisti di medio metamorfismo, a filladi di basso metamorfismo. Queste rocce sono fortemente alterate e l'analisi delle perforazioni effettuate precedentemente nell'area (NORPLAN, 1987, 1990), ha mostrato che buona parte di queste fasce d'alterazione possiedono una permeabilità non trascurabile, comparabile con quella di sedimenti medio fini (MCKENZIE ANDREW, 1995).

Al fine di ricostruire la morfologia del substrato idrogeologico (Fig. 3), integrando i dati delle perforazioni esistenti ed effettuate nell'area e parametrizzare idraulicamente il pacchetto sedimentario sede dell'acquifero, è stata eseguita una campagna di prospezioni geoelettriche costituite da 102 SEV (CARRUTHERS, 1983; ZINIGA IZAGUIRRE & MARCO ANTONIO, 1975). La morfologia del substrato (Fig. 3), frutto di una tettonica probabilmente ancora attiva, presenta alti strutturali ubicati in corrispondenza dei lineamenti tettonici orientati NE - SW, (come ad esempio la zona urbana di San Pedro Sula) e bassi strutturali con profondi canyon (come quello orientato NE-SW verso Laguna El Carmen).

Per quanto riguarda le piezometrie, sulla rete di pozzi scelti, per quanto possibile, privi d'interferenze di pompaggi nelle prossimità, sono state effettuate 10 misure piezometriche nel periodo compreso tra gennaio 2002 e giugno 2004. Le piezometrie (Fig. 7) mostrano direzioni di flusso articolate e contenute differenze tra magra e morbida considerando che la maggioranza dei pozzi ha subito una variazione inferiore ad un metro (nel periodo gennaio-maggio). Si possono osservare, inoltre, due zone di alimentazione del sistema acquifero, una posta a NW e l'altra ad W dell'area in studio e un flusso diretto da NW verso SE, localmente verso NE in corrispondenza di Laguna El Carmen e Laguna Yucutuma.

the area. Some are full of large aplite and quartzite seams which, at times, are also basic or contain secondary calcite. NE-SW faults cut through the bedrock. For the most part, they are strike-slip movements and show corresponding hydrothermal events (ENEE, 1988; EPPLER *et alii*, 1986; FINCH, 1986; PATINO, 1993; PIERCE HERBERT & RIVERA-MONTES, 1991).

The largest hydrographic element in the studied area is the Ulua Valley (southeast of the model domain, Fig. 2), the development of which is probably related to an extension N-S oriented fault system dating back to the Tertiary period.

The sedimentary deposits, which accommodate the aquifer, are the result of torrential-type sedimentation and are extremely heterogeneous. Sudden lateral facies variations, linked to complex geological evolution of the area, have made stratigraphic correlation of the wells very difficult.

THE AQUIFER SYSTEM

The depth of the aquifer (120 km²) ranges from 0 m to 390 m (Fig. 3). It is delimited by the Merendon massif to the west, the area dominated by hills to the north and to the east, and the Chamelecon River to the south and southeast (Fig. 1). The rocks of the bedrock range from acid intrusive rocks (granite, granodiorites) to migmatites, to high-grade metamorphic rocks (such as gneiss), medium-grade metamorphic shale, and low-grade metamorphic phyllites. These rocks are strongly pedogenised, and analysis of wells drilled in the area (NORPLAN, 1987, 1990), has shown that much of these altered layers have reasonably good permeability, comparable to that of medium-fine sediments (MCKENZIE ANDREW, 1995).

A series of 102 SEVs (CARRUTHERS, 1983; ZINIGA IZAGUIRRE & MARCO ANTONIO, 1975) were undertaken so as to reconstruct the morphology of the hydrogeological bedrock (Fig. 3). These data were integrated with that of the existing wells and aided in assigning hydraulic parameters for the aquifer. The hydrogeological substratum (Fig. 3), probably still subject to active tectonics, resulted as being divided into structural horsts (for example, the urban area of San Pedro Sula), in correspondence of the northeast-southwest tectonic outlines and deep canyons (for example, those tending northeast near to the El Carmen Lagoon).

As far as the piezometries are concerned, 10 hydraulic head measurements were taken on the chosen network of wells between January 2002 and June 2004. These wells free from any nearby pumping interference. Measurements of piezometric levels (Fig. 7) show articulated flow directions and limited differences between yearly based minimum and maximum piezometric levels. The difference between these two levels, in the majority of wells, have undergone a variation of less than one metre (in the period January-May). The aquifer system has two supplying areas located to the northwest and to the west of the studied area. The flow direction is from northwest towards southeast and locally changes to northwest near the El Carmen and Yucutuma lagoons.

HYDRODYNAMIC NUMERICAL MODEL AIMED AT WATER MANAGEMENT AND WITHDRAWAL OF SUB-TROPICAL ALLUVIAL AQUIFER
IN SAN PEDRO SULA AREA (HONDURAS)

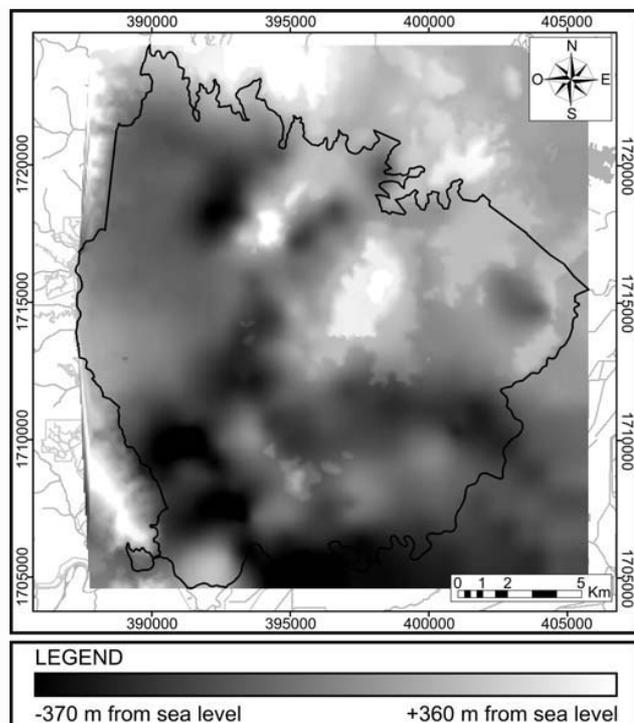


Fig. 3 - Mappa della quota del substrato idrogeologico (dominio del modello in linea marcata)
- Map of the aquifer bedrock elevation (model domain in bold line)

Nello stesso intervallo di tempo (gennaio 2002 e giugno 2004) sono state condotte quattro campagne di misura dei livelli idrici superficiali (corsi d'acqua e lagune). Una campagna di misure di portata è stata inoltre effettuata per le elaborazioni sui bilanci idrici dell'acquifero, su oltre 30 sezioni fluviali, incluse sezioni lungo i corsi d'acqua nella Pianura e nel Rio Chamelecon. Le portate sono state misurate in media ogni 15-20 giorni.

I risultati di cross-correlazioni effettuate tra precipitazioni ai pluviometri situati in montagna e livelli ai piezometri nella piana hanno evidenziato in alcuni casi una risposta veloce dell'acquifero alle precipitazioni; ciò sembrerebbe indicare che parti dell'acquifero della piana alluvionale reagiscano agli apporti meteorici dell'area montana almeno entro 15 giorni (passo di campionamento di misura delle piezometrie). D'altra parte, la ridottissima variazione della piezometria nei mesi di secca rispetto a quelli piovosi, nonché il fatto che alcuni livelli di falda presentino un minimo molto traslato rispetto a quello delle precipitazioni, potrebbe far pensare ad un sistema con risposta lenta ed a forte inerzia. In sostanza, oltre ad un'alimentazione per infiltrazione, si può ipotizzare un'alimentazione profonda dal substrato, per fratturazione, legata alla tettonica (Fig. 4).

Il sistema acquifero può essere assimilato ad un monostrato freatico nella zona di alimentazione (identificabile nella parte apicale e mediana delle conoidi), mentre in zona distale l'acquifero può risultare in pressione e/o talora si sdoppia in un acquifero meno profondo ed uno più profondo.

In base ai dati disponibili, si può affermare che generalmente si

During the same time span (January 2002-June 2004), 4 surface water levels surveys (rivers, streams, channels and lagoons) were carried out. Discharge gauging surveys were carried out on a 15-20 day base on more than 30 river sections, including sections along water courses in the plain and in the Rio Chamelecón.

In some cases, the results of cross-correlations between the precipitation values of the pluviometers located in the mountains and the levels of the piezometers in the plain has proved that there is a rapid aquifer response to precipitation; this seems to indicate that parts of the aquifer on the alluvial plain react to rainfall inflows from the mountain areas within 15 days (maximum sampling rate of piezometry measurements). On the other hand, the extremely small variations of piezometric levels between dry and rainy months, as well as the fact that some water table levels show minimums that are extremely delayed with respect to those of precipitation, could lead us to believe that the system has slow response and high inertia. In synthesis, both a shallow water influx and a deeper supply from the bottom, via fractured bedrock (Fig. 4), can be suggested.

The aquifer was simplified to a phreatic layer aquifer, even if this is rigorously correct only in the feeding area (which can be identified in the apical and median parts of the alluvial fans). In the distal area of the fans, however, the aquifer seems to be pressurised and/or at times it splits into two separate aquifers.

There is generally hydraulic connection between aquifer and rivers but impermeable deposits are often responsible for local

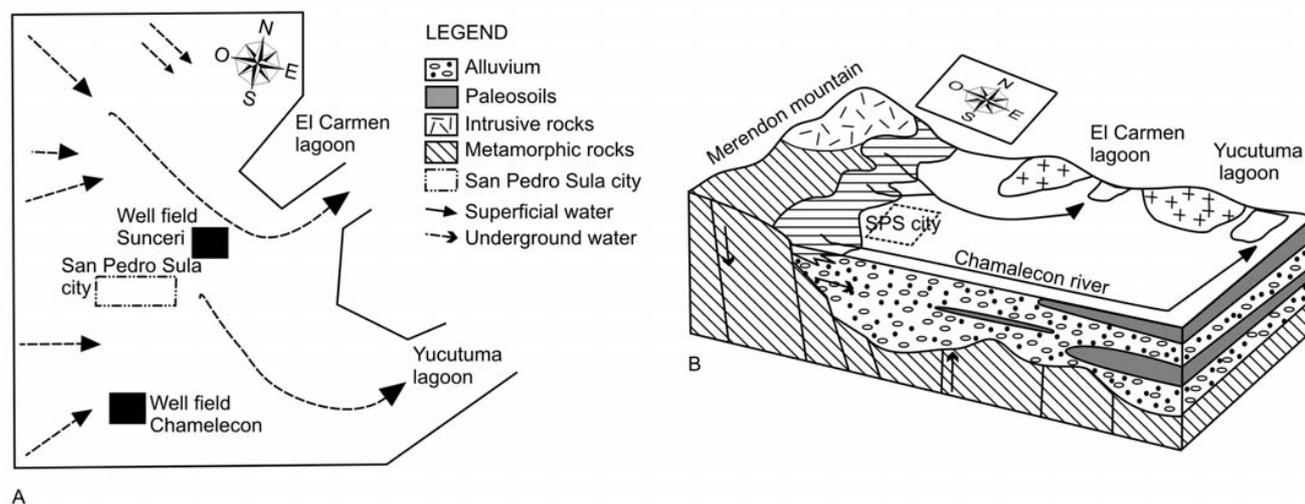


Fig. 4 - Schematizzazione del circuito delle acque superficiali (A) e sotteranee (B)
- Surface (A) and underground (B) flow scheme

ha continuità idraulica tra acquifero e corsi d'acqua; tuttavia questa è risultata essere localmente interrotta a causa della presenza di depositi impermeabili.

MODELLO MATEMATICO

Finalità del modello

Essendo risultata la quantità d'acqua nel sistema superiore a quanto oggettivamente si potesse prevedere sulla base di bilanci tradizionali che considerano coincidenti bacino idrologico e bacino idrogeologico, si è dedotto, quindi, che dovesse verificarsi un consistente apporto di acque sotteranee da altri bacini.

Una volta ricostruito il modello geologico mediante indagini dirette (perforazioni) ed indirette (indagini geofisiche di resistività) e compreso il sistema idrogeologico in studio, il modello nasce dalla necessità di:

- stimare la quantità idrica disponibile alla scala dell'intero bacino;
- valutare la ricarica sotterranea esterna al dominio;
- effettuare delle simulazioni predittive del comportamento dell'acquifero al mutare delle condizioni esterne;
- stimare la quantità idrica disponibile alla scala dei campi pozzi.

Parametri di input per il modello

Il dominio del modello è stato delimitato dalla zona montuosa ad W, dalla zona collinare a N ed E, dal letto del fiume Chamelecon a S e SE (Fig. 1). Tale dominio è stato discretizzato in una griglia rettangolare con celle di 120 m di lato. Un raffittimento nelle aree dei campi pozzi (WARD *et alii*, 1987), è stato effettuato portando la dimensione delle celle a 30 m per il campo pozzi Sunceri e 60 m per il campo pozzi Chamelecon (Fig. 1).

Una volta ricostruita la morfologia del bedrock idrogeologico

interruzione di queste idrauliche continuità.

MATHEMATICAL MODEL

Aims of the model

The amount of water in the system is greater than the amount that could have been objectively foreseen on the basis of traditional budget analysis, which considered coincidence of hydrological and hydrogeological basins. This has led to the deduction that there must be a consistent inflow of underground water from other basins, which was not assessed by traditional budget analysis.

Once the geological model had been reconstructed using direct (drilled wells) and indirect surveys (geophysical resistivity investigations) and the hydrogeological system being studied had been understood, a model was created with the objective to:

- estimate the amount of currently available water;
- evaluate the underground recharge coming from outside the system domain;
- perform predictive simulations of the aquifer behaviour as external conditions change.
- estimate water volumes at the local scale of the well fields.

Model input parameters

The geometrical boundaries of the model were set by the Merendon massif to the west, the hilly area to the north and east, and the Chamelecon River to the south and southeast (Fig. 1). This domain was discretised with a rectangular grid with sides of approximately 120 m. Grid refinement was conducted over the areas of the well fields (WARD *et alii*, 1987) bringing the cell dimensions to 30 m for the Sunceri well field and to 60 m for the Chamelecon well field (Fig. 1).

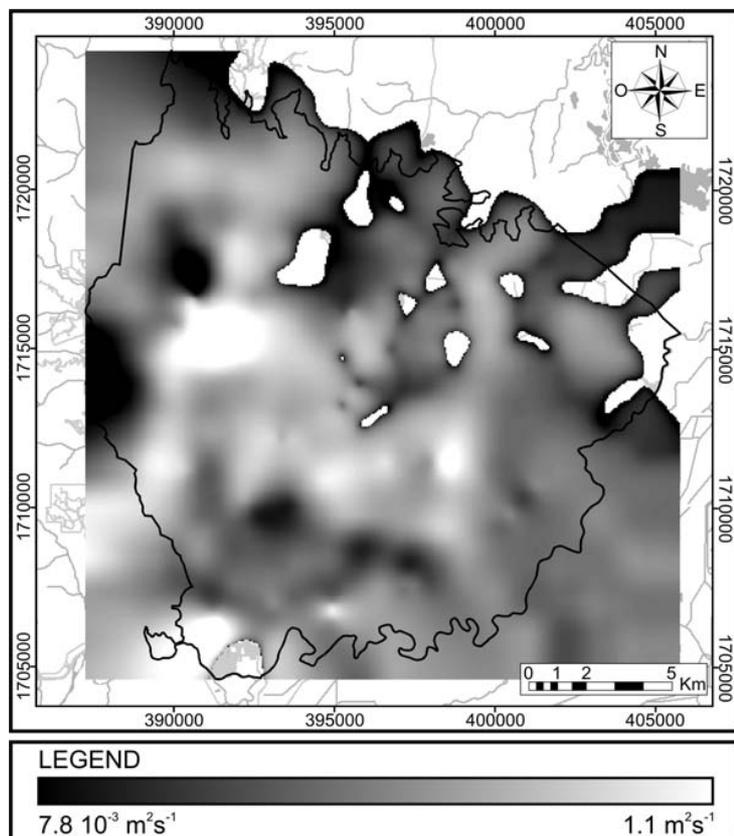


Fig. 5 - Mappa della trasmissività interpolata (dominio del modello in linea marcata)
 - Map of the interpolated transmissivity values (model domain in bold line)

(Fig. 3) mediante indagini geoelettriche, (alto resistivo in presenza di graniti e gneiss, medio resistivo in presenza di rocce a medio - basso metamorfismo), la caratterizzazione idraulica del pacchetto sedimentario è stata effettuata mediante i parametri resistenza trasversale e fattore di formazione; per quanto riguarda i valori (Tab. 1) di trasmissività (T), coefficiente di immagazzinamento (Ss, Sy), porosità (ne, nt), dato che le prove dirette (DIMA & MONCADA, 1994; DIMA *et alii*, 1994; NORPLAN, 1990) riguardavano solo alcune zone dell'area in studio (21 pozzi mal distribuiti), la loro integrazione è stata effettuata mediante correlazioni tra la portata specifica normalizzata dei pozzi e il fattore di formazione. Tale approccio, sebbene frutto di una serie di approssimazioni e semplificazioni, si è reso necessario a causa della presenza di una forte variabilità nell'area della conducibilità elettrica delle acque interstiziali (da $40 \mu\text{S cm}^{-1}$ ad oltre $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$). In sintesi, i valori (ricavati dai 102 SEV effettuati nell'area) di fattore di formazione, costituito, come è noto, dal rapporto tra la resistenza trasversale specifica unitaria e la resistività dell'acqua interstiziale, sono stati correlati con le portate specifiche e le trasmissività specifiche dei pozzi, determinando così, per ogni singola area in cui il dominio è stato diviso, il grado di attendibilità di queste correlazioni e ricavando le funzioni di regressione che pongono i due parametri in relazione massima. Utilizzando queste funzioni, è stato quindi possibile per ciascuna area associare ad un valore di fattore di for-

After reconstruction of the bedrock geometry (Fig. 3) by means of SEVs surveys (the bedrock was considered as being highly resistive when the bedrock was thought of being granites and gneiss and as medium resistivity was considered when it seemed to be formed by medium-low-grade metamorphic rock), the sediment package was characterised using transversal resistance and formation factor parameters. Given that the well tests (DIMA & MONCADA, 1994; DIMA *et alii*, 1994; NORPLAN, 1990) only covered some parts of the area (21 wells available were badly distributed over the studied area), transmissivity (T), storage (Ss, Sy) and porosity (ne, nt) coefficient values (Tab. 1) were integrated by correlation with the wells specific rate of flow and the formation factor. This approach, which considers a great deal of simplification and approximation, was justified by the huge variability of the electrical conductivity of the interstitial waters ($40 \mu\text{S cm}^{-1}$ to $1000 \mu\text{S cm}^{-1}$). The values of the formation factor (known to be the ratio between the specific transversal resistivity and the resistivity of the interstitial water) obtained from the 102 SEVs, were correlated to the specific rate of flow and the specific transmissivity of the wells. The reliability of these correlations was determined for each of the subareas into which the entire area was divided and regression functions were obtained. A specific transmissivity was assigned to each subarea in relation to its formation factor with the aid of these regression

**MODELLAZIONE DELL'ACQUIFERO SUB-TROPICALE DELLA CITTÀ DI SAN PEDRO SULA (HONDURAS) FINALIZZATA
ALLA GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA**

$k_{x,y}$ ($m s^{-1}$)			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
$1.8 \cdot 10^{-4}$	$2.0 \cdot 10^{-3}$	$2.2 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-2}$
k_z ($m s^{-1}$)			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
$1.8 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$
n_e			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
0.20	0.23	0.23	0.25
n_t			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
0.30	0.31	0.31	0.33
T ($m^2 s^{-1}$)			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
0.0078	0.70	0.70	1.1335
Ss (m^{-1})			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
0.10	0.29	0.27	0.36
Sy			
<i>min</i>	<i>steady ref</i>	<i>transient ref</i>	<i>max</i>
0.010	0.020	0.025	0.030

mazione, un valore di trasmissività specifica.

In Fig. 5 è riportata la mappa di distribuzione dei valori interpolati di trasmissività idraulica, funzione della profondità del basamento (Fig. 3) e delle conducibilità idrauliche delle varie litologie presenti (Tab. 1).

Sono stati presi in considerazione per la simulazione, i pozzi privati, industriali e ASP (pozzi di emungimento per uso potabile) per un emungimento complessivo pari a circa $2.5 m^3/s$ (Fig. 6).

La gestione dei dati geolitologici e idrogeologici necessari allo sviluppo del modello è stata effettuata mediante utilizzo di un sistema informativo territoriale (GIS).

Sviluppo del modello

Il modello è stato realizzato seguendo le procedure fornite dalla ASTM nel documento ASTM D 5447-93 in cui è stata codificata la successione delle fasi operative.

- definizione degli obiettivi dello studio;
- sviluppo del modello concettuale;
- scelta del programma per il modello
- preparazione del modello numerico;
- calibrazione del modello e analisi di sensibilità;
- validazione del modello.

Il codice di calcolo alle differenze finite Visual Modflow 2000 (McDONALD & HARBAUGH, 1984; McDONALD *et alii*, 2000), è stato utilizzato per simulare il flusso idrodinamico sia in condizioni stazionarie che transitorie.

Data la notevole complessità del sistema idrogeologico in studio, si è schematizzato il corpo idrico sotterraneo ai fini del calcolo come un'unità monostrato freatico anche se localmente (in zona distale delle conoidi), può risultare in pressione e/o talora si sdoppierebbe in

Tab. 1 - Range di variazione dei parametri idrogeologici e valori di riferimento successivi alla fase di calibrazione in regime stazionario (steady ref) e transitorio (transient ref). k = conducibilità idraulica; n_e = porosità efficace; n_t = porosità totale; T = trasmissività; S_s = coefficiente di immagazzinamento (falda confinata); S_y = coefficiente di immagazzinamento (falda libera)

- The range of hydrogeological parameters and reference values after steady state (steady ref) and transient state (transient ref) calibration. k = hydraulic conductivity; n_e = effective porosity; n_t = total porosity; T = transmissivity; S_s = specific storage; S_y = specific yield

functions.

Figure 5 shows the frequency distribution graph for the interpolated hydraulic transmissivity values which are function of the depth of the hydrogeological basement (Fig. 3) and the hydraulic conductivity of the various lithologies that are present (Tab. 1).

For the simulation, private, industrial and ASP (abstraction wells for drinking water use) were considered for an overall pumping rate of around $2.5 m^3/s$ (Fig. 6).

Geolithological and hydrogeological data within the model were managed with the aid of a geographical information system (GIS).

Development of the model

The overall model was identified following guidelines supplied by the ASTM (ASTM D 5447-93), which codified the sequence of operational stages and include:

- definition of the objectives of the study;
- development of a conceptual model;
- choice of a numerical simulation program
- construction of a numerical model;
- calibration of the model and sensitivity analysis;
- validation of the model.

The finite-difference software package used is Visual Modflow 2000 (McDONALD & HARBAUGH, 1984; McDONALD *et alii*, 2000), which simulates hydrodynamic flow under steady and transient conditions.

The necessity of model simplification, due to the complex nature of the studied hydrogeological system, implied the association of the aquifer system to a single layer phreatic aquifer even though in distal areas the aquifer system could be locally associat-

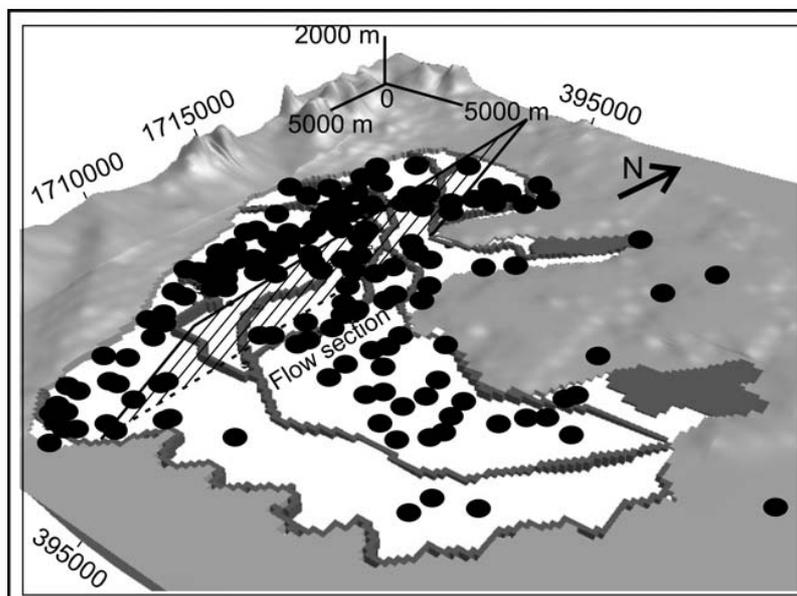


Fig. 6 - Mappa di localizzazione dei pozzi ASP e privati (pallini neri), delle condizioni al contorno (curve ed aree grigio scure) e indicazione della sezione per il calcolo del flusso. Dominio attivo del modello in bianco
 - Map with the location of ASP and private wells (black dots), boundary conditions (grey curves and areas), with section for calculated flow. Active domain in white

un acquifero meno profondo ed in uno più profondo: il modello è stato, quindi, risolto come bidimensionale. Si è ipotizzato, inoltre, che il flusso avvenga prevalentemente nel corpo ghiaioso-sabbioso o sabbioso, facendo coincidere quindi lo spartiacque superficiale con quello sotterraneo.

Le condizioni al contorno sono state imposte sulla base del modello concettuale ricostruito. Data l'impossibilità di conoscere e quindi quantificare gli aspetti puntuali di afflusso dell'acquifero, si è imposto in determinati punti, come condizione al contorno, un livello di pressione idrostatica variabile lungo il dominio temporale di calcolo, simulando, quindi, una entrata di massa che tiene conto anche dell'apporto esterno necessario per l'equilibrio del sistema (Fig. 6). Conoscendo, quindi, l'interpolazione della superficie piezometrica con buona risoluzione spaziale, vincolando in questo modo, lungo i corsi fluviali, i valori interpolati delle misure dei livelli idrici, si è imposto, nelle celle opportune, una pressione freatica che è la risultante algebrica di:

- ricarica meteorica;
- scambio di flussi tra fiume e acquifero;
- evapotraspirazione;
- afflussi sotterranei.

Per quanto riguarda gli ingressi o le uscite di massa dal modello, si sono considerati nulli i contributi dall'esterno in afflusso e, dall'interno, in deflusso, in quanto essi vengono simulati rispettivamente dai flussi immessi dalle superfici a livello costante e dai deflussi verso altre superfici a livello costante, interne al modello. Questo espediente ha permesso, quindi, una ricostruzione del corpo idrico

ed to a multi layer aquifer with a shallower layer and a deeper aquifer which is in pressure. The model was thus considered two-dimensional. It was assumed that the flow mainly occurs in the gravel-sandy or sandy body and therefore the surface watershed was made coincident with the ground water unit.

Boundary conditions were set with regard to the conceptual model. Given the impossibility to know and therefore quantify the aquifer precise flow conditions from its boundaries, in specific points, we set a hydrostatic pressure level as a boundary condition. The code maintains this level constant throughout the temporal domain of the calculation, therefore simulating a mass entry that also takes into account the outside inflow required for the system equilibrium (Fig. 6). Knowing, therefore, the interpolation of the piezometric surface with a good spatial resolution and in this way, constraining the interpolated values of water level measurements along the river courses, phreatic pressure is established in suitable cells and this is the (algebraic) result of:

- rainwater recharge;
- flow exchanges between river and aquifer;
- evapotranspiration;
- underground inflows.

As far as mass inputs or outputs from the model are concerned, the contributions from outside and inside inflows were considered to be inexistant since they are simulated respectively by the flows issued from the constant level surfaces and by outflows towards other surfaces at a constant level within the model. This expedient has therefore allowed us to make a relatively simple reconstruction

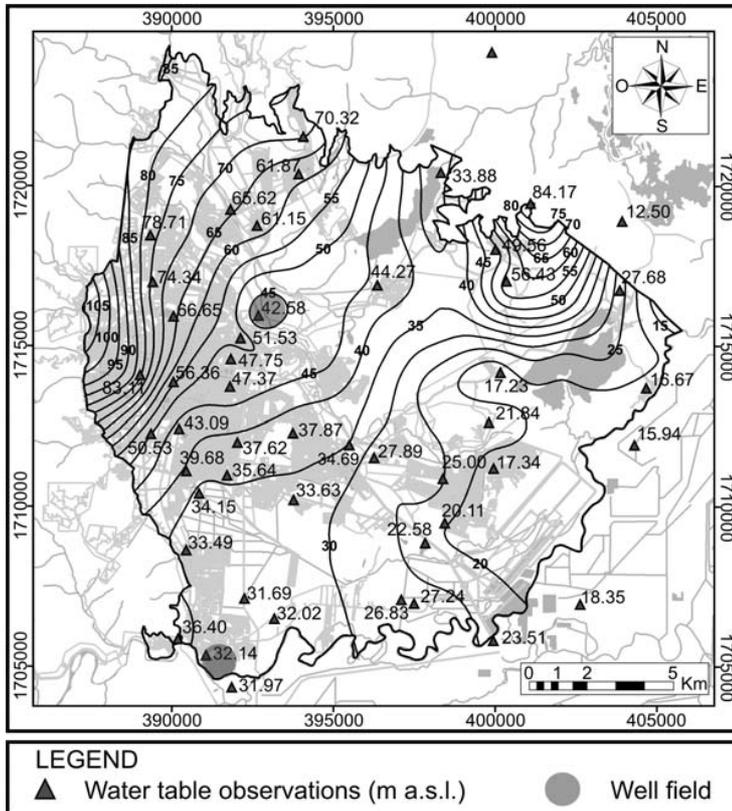


Fig. 7 - Piezometria di gennaio 2002 (isopieza 5 m) con punti di osservazione (triangoli neri)
 - Observed piezometric heads of January 2002 (5 m) with observation points (black triangles)

sotterraneo relativamente semplice in quanto non è stato necessario disporre dell'andamento stratigrafico puntuale, nè stimare l'entità dell'apporto che risulta, anzi, un risultato del calcolo.

Il dominio del modello è stato suddiviso in 22 zone (le principali delle quali sono riportate in Fig. 12) con differenti caratteristiche idrogeologiche.

Il modello è stato quindi tarato in regime stazionario (condizioni al tempo $t=0$, corrispondente alla data 01/01/02) tenendo in riferimento la piezometria di gennaio 2002 (Fig. 7). È stata eseguita, quindi, una prima calibrazione del modello effettuando una valutazione per via iterativa delle modifiche da apportare ai parametri idraulici affinché i valori calcolati e quelli osservati si avvicinino il più possibile (valori di riferimento riportati in Tab. 1 per i diversi parametri in relazione al campo di variazione degli stessi). Ciò è stato fatto con l'ausilio del software Pest (DOHERTY, 1994) per meglio definire la distribuzione dei parametri di input e per stimare l'incertezza delle predizioni (Fig. 8). La ridotta differenza tra piezometria misurata e piezometria calcolata, convalida la buona qualità della parametrizzazione dell'acquifero eseguita.

La simulazione in transitorio (il risultato della fase di calibrazione per la data 06/08/04 è riportato in Fig. 9, i valori dei parametri idraulici di riferimento sono mostrati in Tab. 1) è stata eseguita con 30 periodi di stress (ciascuno dei quali caratterizzato da 10 step) e 30

of the aquifer, since it is not necessary to have a precise stratigraphic trend or to estimate the amount of the resulting inflow, which is the result of the model rather than input data.

The model domain was subdivided into 22 zones (the principle zones appear in Fig. 12), each with different hydrogeologic characteristics.

The model was then calibrated under steady state conditions (conditions at time $t=0$ considered to be set to the conditions of 01/01/02) using the January 2002 hydraulic head as a reference (Fig. 7). An initial calibration assessment, via iteration process, was made regarding the changes to be made to the hydraulic head so that calculated and observed values would be as close as possible (values for the different parameters are in Tab. 1 in relation to their variability). This has been achieved with the PEST software (DOHERTY, 1994) so as to better define the distribution of the input parameters and the errors associated with the predictions (Fig. 8). The rather low differences found, validate the good quality of the aquifer parameters.

The transient state simulation (the result for the calibration of 06/08/2004 is shown in Fig. 9, while the hydraulic parameters are shown in Tab. 1) was made with 30 stress periods (each of which consists of 10 steps) and 30 observations (from 01/01/02 to 06/08/04 which include 10 piezometric measurements and 4 water

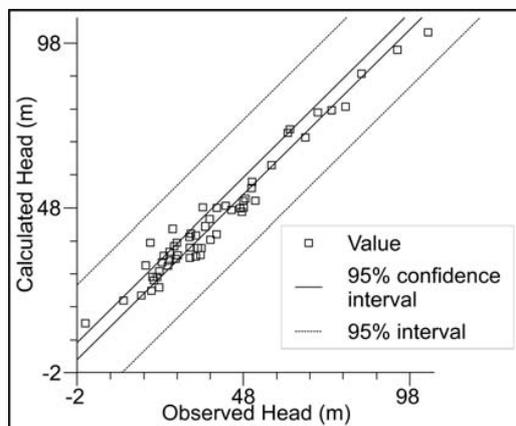


Fig. 8 - Confronto tra i valori calcolati e misurati dei carichi piezometrici in condizioni stazionarie
 - Comparison between calculated and observed head values in steady-state condition

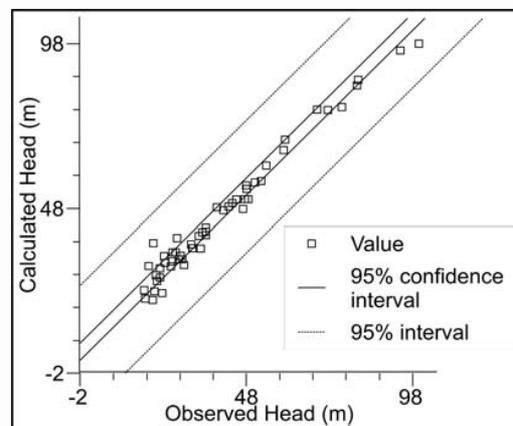


Fig. 9 - Confronto tra i valori calcolati e misurati dei carichi piezometrici in condizioni transitorie per la data 06/08/04 (termine della prova sul campo pozzi)
 - Comparison between calculated and observed head values in transient-state condition on August 6th 2004 (end of well field test)

osservazioni (dal 01/01/02 al 06/08/04 comprendenti 10 misure piezometriche e 4 misure dei livelli idrici superficiali).

Data la complessità e vastità dell'acquifero in studio e dato che le informazioni ottenute mediante le indagini dirette ed indirette effettuate nell'area, non sono comunque state sufficienti per la realizzazione di un modello diretto, si è operato mediante modellistica inversa, cioè imponendo le piezometriche osservate e stimando quali volumi d'acqua fossero necessari al mantenimento delle stesse condizioni. La piezometria di Febbraio è stata utilizzata per la definizione del volume di equilibrio (parità tra entrate ed uscite degli afflussi-deflussi sia superficiali che sotterranei). In questo modo, la simulazione dinamica ha permesso di stimare come vari l'immagazzinamento del sistema in particolari condizioni imposte e di valutare, con l'ausilio del codice di calcolo Zonebudget (HARBAUGH, 1990), gli interscambi idrici tra le zone in cui il dominio del modello è stato suddiviso.

Risultati del modello

La grandezza di interesse è "storage in - storage out", quantità che può risultare positiva o negativa qualora, rispettivamente, il sistema si stia arricchendo o impoverendo d'acqua. Il volume stimato è quindi un sopravanzo od un disavanzo rispetto al volume necessario a mantenere la piezometrica costantemente sui valori osservati in campagna. Pur mantenendo costanti gli emungimenti e le condizioni al contorno per tempi successivi a quelli dell'ultima misura e diminuendo linearmente fino all'annullamento l'apporto della ricarica meteorica alla data 01/01/04, cioè all'inizio del periodo di esaurimento, il termine storage in diventa minore di quello storage out solo al tempo $t=1950$ (05/05/07). Ciò significa che in tali condizioni, la riserva di acqua presente nel sistema inizia a depauperarsi soltanto dopo circa 3 anni (Fig. 10). Ciò starebbe ad indicare che il sistema riceve una ricarica sotterranea dalle zone esterne al dominio che la back analysis stima pari a $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$. Tali apporti esterni interessano le zone 2,

level measurements of surficial waters).

Given the dimensions and complexity of the aquifer being studied, and that the information obtained through direct and indirect surveys undertaken within the area, were not enough to construct a direct model, reverse modelling was used. This involved fixing the observed hydraulic head and estimating the water volumes required to maintain the same conditions. The piezometry of February was used for defining the equilibrium volume (equilibrium of input-output of both surficial and groundwater fluxes). In this way, dynamic simulation made it possible to estimate how the system storage varies when particular conditions are imposed and it was possible to evaluate, with the help of the Zonebudget numerical code (HARBAUGH, 1990), the mass quantities that each sub-area of the model domain exchanged with the other areas.

Results of the model

The parameter of interest is "storage in - storage out", the volume (stored) that may be either positive or negative in the event that the system is respectively being enriched or impoverished of its water. The estimated volume is therefore a surplus or a deficit compared to the volume required to maintain the piezometric surface constantly at the values observed in the field. Although the pumping rate and boundary conditions were kept constant for the periods following the last measurement taken and considering a linear reduction of rainfall to the date of 01/01/04 (at the beginning of the recession period), the term storage in becomes less than storage out only at the time $t=1950$ (05/05/07). This means that in those conditions, the water reserves in the system will begin to deplete only after 3 years (Fig. 10). This means that the system is recharged underground from areas outside the domain that, according to the back calculation, is equal to $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$. These external recharges

MODELLAZIONE DELL'ACQUIFERO SUB-TROPICALE DELLA CITTÀ DI SAN PEDRO SULA (HONDURAS) FINALIZZATA ALLA GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA

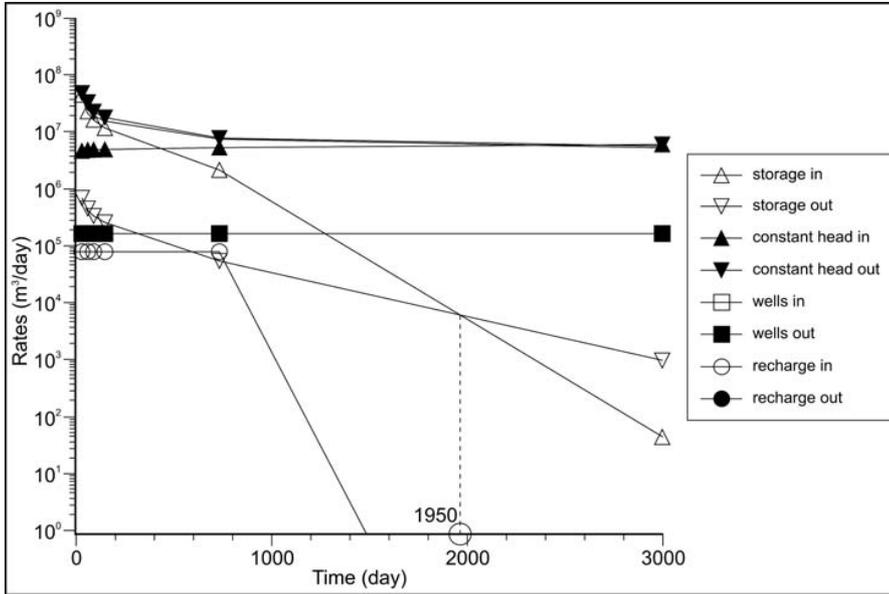


Fig. 10 - Variazione dell'immagazzinamento e delle condizioni al contorno lungo il dominio di calcolo
- Storage and boundary condition variation graph through the temporal domain

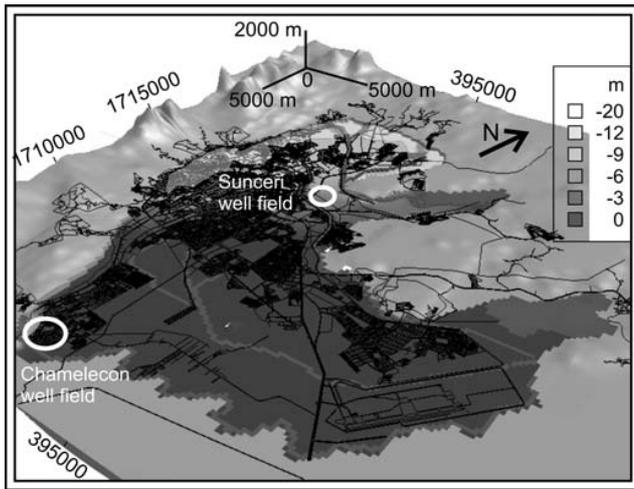


Fig. 11 - Distribuzione dei massimi abbassamenti piezometrici previsti
- Maximum estimated drawdown distribution of piezometric heads

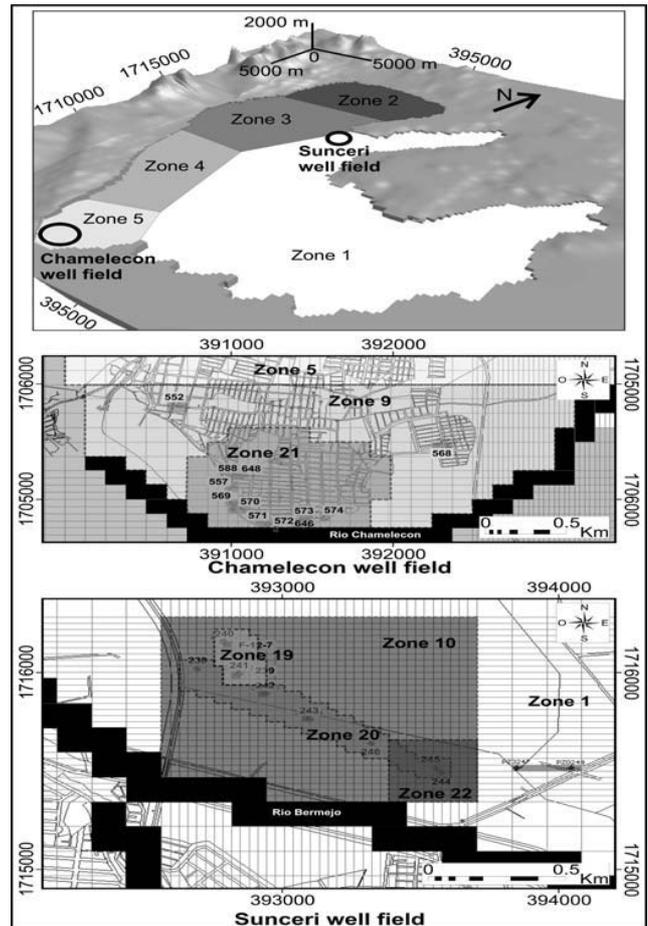


Fig. 12 - Zone idrogeologiche di calcolo in cui l'area in studio, i campi pozzi Chamelecon e Sunceri, sono stati suddivisi
- Hydrogeological model zones in which the studied areas (a) Chamelecon (b) and Sunceri well field (c) have been divided

Zone	1	2	3	4	5	9	10	19	20	21	22
Flow rate (l/s)	45.453	15.926	23.572	4.795	2.118	977	874	108	329	937	107

Tab. 2 - Bilancio idrico (flusso in uscita) per le principali zone idrogeologiche del modello
- Water balance (flow rate) at the main hydrogeological model zones at the date 06/08/04

4 e 5 di Fig. 12, vale a dire una ricarica da ovest, dalle zone montuose. Il bilancio di flusso effettuato su una sezione che taglia N-S l'aquifero (Fig. 6), stima in data 26/05/02, cioè alla fine del periodo di esaurimento, un flusso calcolato di 110140 m³/giorno cioè 1.27 m³/s. Tale flusso proviene dal settore occidentale dell'area in studio.

In Tab. 2 sono riportati i flussi in uscita calcolati per la data 06/08/04 per le principali zone idrogeologiche in cui il dominio del modello è stato suddiviso (Fig. 12). In Fig. 11, si mostra come la depressione piezometrica massima prevista nell'area, sia dell'ordine dei 15 m. Tale perdita di carico, che si ha nel settore nord-occidentale e al limite meridionale dell'area del campo pozzi Chamelecon, non sarebbe legata ad un problema regionale di ricarica dell'aquifero che presenta nel complesso abbattimenti contenuti. Ciò sembrerebbe confermare un legame diretto tra queste acque e quelle relative alla struttura idrogeologica della Valle del Sula (sistema-Ulua Chamelecon).

Modellazione di dettaglio dei campi pozzi

Nel luglio 2004 sono state effettuate delle prove sui campi pozzi tenendo conto sia delle tipologie delle pompe installate che delle necessità della rete acquedottistica. Ciò ha permesso di calibrare il modello di flusso anche sulla base delle perturbazioni indotte e di simulare diversi scenari di emungimento in condizioni transitorie nelle modellazioni di dettaglio.

Campo pozzi Chamelecon

Il campo pozzi Chamelecon, situato a sud della città, in prossimità del corso d'acqua omonimo (Fig. 1), in un'area pari a circa 432000 m², comprende 6 pozzi (569, 570, 571, 572, 573, 574) di cui 2 generalmente non operanti durante le ore notturne in cui la richiesta idrica diminuisce. La portata emunta a pieno regime consta mediamente di circa 915 l/s. Due piezometri (557, 646) e 4 pozzi occasionalmente in pompaggio (552, 588, 568, 648) sono utilizzati per monitorare il livello idrico nelle vicinanze del campo pozzi (Fig. 1, 12). Pur avendo subito abbassamenti dovuti all'interferenza dei coni di depressione dei vari pozzi, il livello piezometrico non ha mostrato un progressivo abbattimento nel corso degli anni.

La prova è stata effettuata per valutare la potenzialità degli apporti idrici da sud ponendo il sistema idrico in condizioni di massimo stress. In una prima fase i tassi di emungimento sono stati ridotti al minimo, per poi tornare ai regimi normali. La prova è consistita nel variare i tassi di pompaggio di 5 pozzi (570, 571, 572, 573, 574, Fig. 12, Tab. 3) e monitorare le perturbazioni della falda in essi e in 2 piezometri (557, 646) e 4 pozzi (552, 588, 568, 648) mediante data logger in continuo e sonde manuali; la prova ha avuto la durata di 4 giorni e le misure hanno avuto un passo variabile tra un minimo di 10 minuti ed un massimo di 2 ore.

In Fig. 13 sono messe a confronto le variazioni di portata effettuate sul pozzo 574 (secondo quanto riportato in Tab. 3) e le variazioni di livello piezometrico osservate nei piezometri 557 e 646. La diminuzione dei prelievi, quasi sincrona sui pozzi (A), causa un aumento del livello idrico di 21 cm nel piezometro 557 e 90 cm nel

regard zone 2, 4 and 5 of Fig. 12, which are recharges from the west, from the mountain area. The model calculated that the flow budget for a section cutting the aquifer in a north-south direction (Fig. 6) at the time 26/05/02, that is, the end of the depletion period, is 110140 m³/day or 1.27 m³/s. This influx is coming from the western areas of the domain.

The calculated discharges at the date of 06/08/04 are shown for the main hydrogeological areas (Fig. 12) in Tab. 2. Fig. 11 shows how the maximum hydraulic head depression foreseen for the area is in the range of 15 m. This loss of hydraulic head, which occurs in the north-west sector and in south-west Chamelecon wells site area is not linked to a regional problem of aquifer recharge since this shows a limited overall drawdown. This seems to confirm a direct link between these waters and the hydrogeological structure of the Valle del Sula (Ulua-Chamelecon system).

Detailed modelling of the abstraction wells

On July 2004 a series of pumping tests were done on the wells considering both the type of pumps installed and the necessities of the water supply network. This has made calibration possible on the basis of induced perturbation and different abstraction scenarios that were simulated in transient conditions for the detailed modelling.

Chamelecon well field

Six wells (569, 570, 571, 572, 573, 574) are located in the Chamelecon well field, which is located to the south side of the city and near the river which bears the same name (Fig. 1), over an area of 432000 m². Two of these wells are turned off during the night hours when water supplies go down. Water exploitation reaches 915 l/s at maximum extraction. Two piezometers (557, 646) and four wells (552, 588, 568, 648), occasionally in pumping, are used for monitoring the water level near the well fields (Fig. 1, 12). Piezometric level drawdown have been produced as a consequence of cone interference but it has not progressively suffered over the years.

The test was carried out in maximum stress conditions so as to evaluate the potential flows coming from the south. In an initial phase, pumping rates were reduced to minimum and then brought to normal regimes. The test was carried out by varying pumping rates on 5 wells (570, 571, 572, 573, 574, see Fig. 12 and Tab. 3) and by observing the perturbations of the water table in these wells and in two near piezometers (557, 646). Other 4 wells (552, 588, 568, 648) were monitored with continued data loggers and manual measuring gauges; the test lasted 4 days with steps between a minimum of 10 minutes and a maximum of two hours.

In Fig. 13, a comparison between the discharge of well 574 (according to Tab. 3) and the changing of hydraulic heads in the 557 and 646 piezometers is shown. The synchronous lowering of pumping rates on the wells (A), cause a 21 cm increase in the hydraulic head in the 557 piezometer and 90 cm in the 646 piezometer. The

MODELLAZIONE DELL'ACQUIFERO SUB-TROPICALE DELLA CITTÀ DI SAN PEDRO SULA (HONDURAS) FINALIZZATA ALLA GESTIONE DELLA RISORSA IDRICA

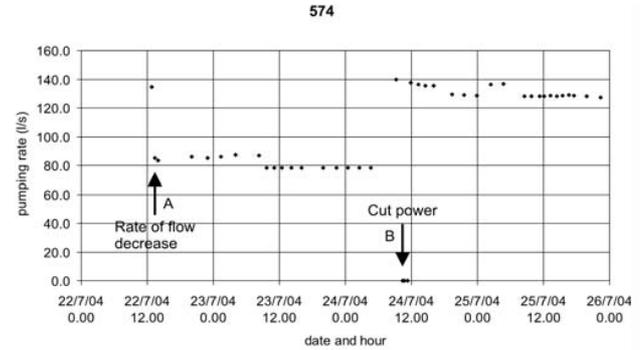
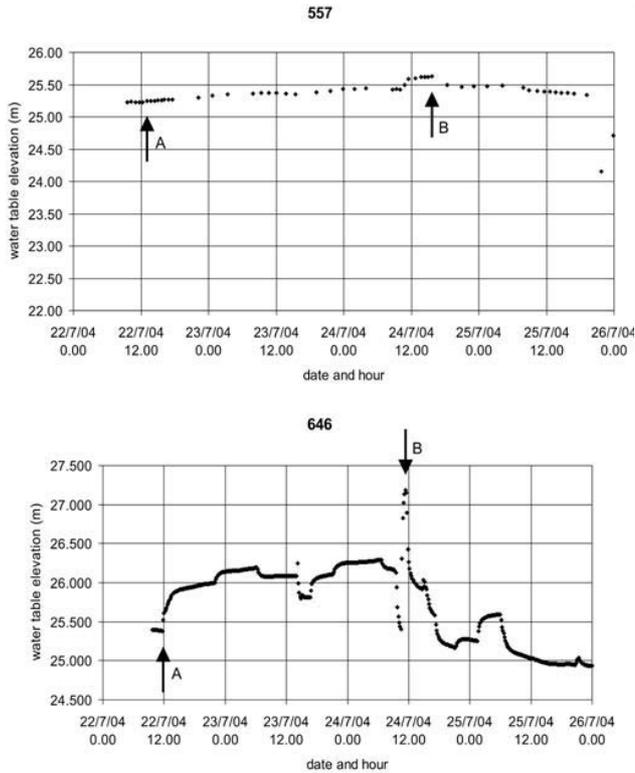


Fig. 13 - Confronto tra i livelli piezometrici misurati nei piezometri 557 e 646 e i tassi di pompaggio del pozzo 574 del campo pozzi Chamelecon

- The comparison between observed piezometric levels in 557 and 646 piezometers and pumping rates of 574 well in Chamelecon well field

Well	Normal pumping rate (l/s)	Pumping rate days 1, 2 (l/s)	Pumping rate decrease days 1, 2 (%)	Pumping rate days 3, 4 (l/s)
570	122	92	24.6	122
571	147	98	33.3	147
572	123	0	100	123
573	154	139	9.7	154
574	131	84	35.9	131

Tab. 3 - Variazione dei tassi di pompaggio durante la prova sul campo pozzi Chamelecon

- Pumping rates variation during Chamelecon well field test

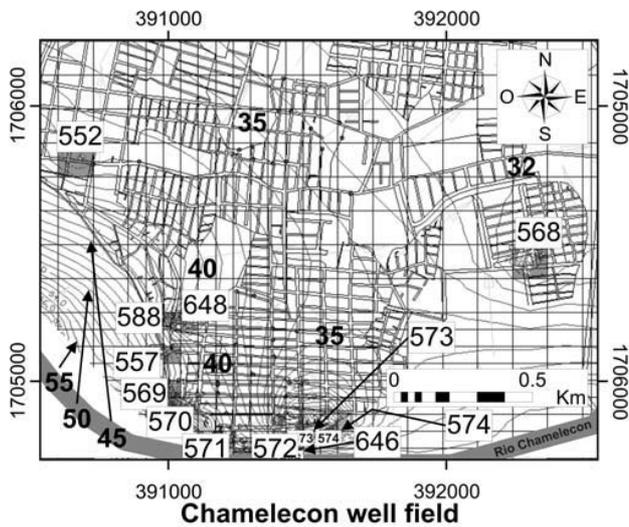
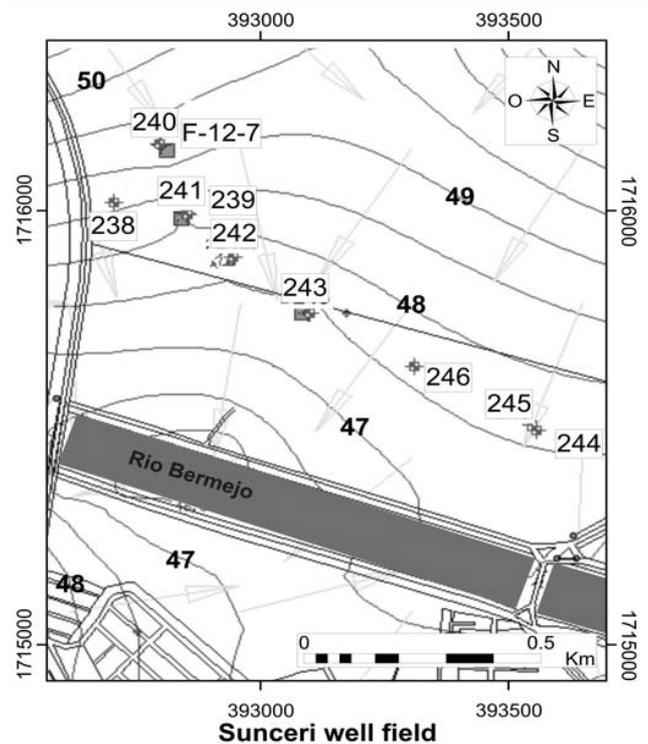


Fig. 14 - Distribuzione dei carichi piezometrici simulati al termine delle prove, considerando i tassi di estrazione nei campi pozzi Chamelecon (isopiezia 1m) e Sunceri (isopiezia 0.5 m)

- The simulated piezometric heads at the end of the tests, considering pumping rates in Chamelecon (1 m) and Sunceri (0.5 m) well fields



piezometro 646. Il black-out elettrico verificatosi il 24 luglio (B), che ha causato lo spegnimento di tutte le pompe per circa 30 minuti, dà origine ad un ulteriore aumento dei livelli pari a 0.19 cm e 89 cm rispettivamente. Piccole variazioni dei tassi di pompaggio e della piezometria sono dovute alle condizioni dinamiche (controllabili ed incontrollabili) della prova.

Si osserva una rapida stabilizzazione dei pozzi 569, 572, 574, 648, 588, 557 e 646 (Fig. 13), dovuta all'alta trasmissività dell'acquifero. In Tab. 2 si osserva il risultato del bilancio di massa effettuato sulle zone in cui l'area del modello è stata suddivisa: l'area 9 sarebbe caratterizzata in data 26/07/04 (al termine della prova) da un flusso idrico pari a 977 l/s dovuto principalmente al flusso di direzione SW-NE (Fig. 14). Quasi la totalità di questo, il 96 % circa, pari a 937 l/s, interesserebbe l'area 21 che comprende la zona del campo pozzi e un intorno di essa. Ciò significa un surplus di 125 l/s rispetto all'attuale tasso di pompaggio, che renderebbe tale area interessante dal punto di vista di un ulteriore sfruttamento. La piezometria calcolata per la data 26/05/05 (Fig. 14), al termine del periodo di esaurimento, evidenzia, in condizioni di magra, la presenza di ben sviluppati coni di depressione dei pozzi 574, 568 e 572.

Campo pozzi Sunceri

Il campo pozzi Sunceri, ubicato a nord-est della città (Fig. 1) in un'area pari a circa 201000 m², comprende 4 pozzi (240, 241, 242, 243) operanti a pieno regime per tutto l'anno per una portata totale mediamente pari a circa 195 l/s e 6 piezometri (238, F-12-7, 239, 244, 245, 246, Figg. 1, 12). Nel corso degli ultimi anni (2000-2004) è stato osservato un abbassamento piezometrico progressivamente crescente nell'area non giustificato da un'aumento di portata emunta. Inoltre i pozzi dell'area hanno subito decrementi di portata specifica elevatissimi (portate specifiche attuali di 2-4 l/s m, contro gli oltre 10 l/s m iniziali al momento della perforazione).

La prova è stata effettuata per quantificare gli apporti da N e da W. Una volta abbassati i prelievi in modo tale che la portata emunta rimanesse circa costante (a causa delle differenti portate delle pompe installate) nell'area durante tutta la prova, essa è consistita nel monitorare nei piezometri e pozzi circostanti, la risposta della falda alle perturbazioni causate dalle variazioni di portata in due fasi differenti su pozzi differenti. La prova è consistita nel variare i tassi di pompaggio di 3 pozzi (241, 242, 243, Fig.12, Tab. 4) e misurare le perturbazioni della falda in essi e nei 6 piezometri circostanti (238, F-12-7, 239, 244, 245, 246), mediante data logger in continuo e sonde manuali; la prova ha avuto la durata di 8 giorni e le misure hanno avuto un passo variabile tra un minimo di 10 minuti ed un massimo di 1 ora. Successivamente si è tornati alle condizioni iniziali.

Dopo 2 giorni dal ripristino delle condizioni iniziali, soltanto i livelli idrici misurati nei piezometri 244 e 245 vanno a stabilizzarsi, mentre in tutti gli altri punti di osservazione essi presentano ancora delle differenze che vanno da circa 0.35 m a 0.74 m con differenze massime nei piezometri F-12-7 e 239. In Fig. 15 è riportato il livello osservato nel piezometro 246 confrontato con il tasso di pompaggio

blackout that occurred on the 24 July (B), which caused the shutdown of all pumps for 30 minutes, caused another increase of 0.19 cm and 89 cm respectively. Small changes in pumping rates and hydraulic heads are caused by the dynamic conditions (known and not known) of the test.

A fast stabilization of wells 569, 572, 574, 648, 588, 557 and 646 (Fig. 13) was observed due to high transmissivity of the aquifer. A mass balance for the areas in which the domain has been divided into, is shown in Tab. 2: on 26/07/2004 (end of test) area 9 shows a flow of 977 l/s, mainly due to flow from SW-NE direction (Fig. 14). About 96% of this flow, 937 l/s, is falling in the area 21 in which the well field is found. This means that a surplus of 125 l/s with respect to actual pumping rate is present and this makes the area rather interesting for further future exploitation. The calculated hydraulic head at date 26/05/2005 (end of the recession period) shown in Fig. 14, shows well developed depression cones in the 574, 568 and 572 boreholes.

Sunceri well field

Located to the north-east of the city (Fig. 1), the Sunceri well field, spread over an area of 201,000 m² and includes four wells (240, 241, 242, 243), which are working all year around for a total water extraction of 195 l/s, and six piezometers (238, F-12-7, 239, 244, 245, 246, Figg. 1, 12). A progressive water level lowering has been observed from year 2000 to 2004 and it could not be explained with increased water extraction. The wells of the area have also experienced a huge decrease of specific rate of flow, which is now equal to 2-4 l/s m while they were over 10 l/s m when they were drilled.

The test was undertaken so as to evaluate the flows coming from N and W. Once that water withdrawals had been lowered so as to maintain constant water discharge in the area during the whole test, monitoring was undertaken in nearby boreholes and piezometers for observing the response of the aquifer caused by varying pumping rates in two different phases on two different wells. The test was based on varying pumping rates on three boreholes (241, 242, 243, see Fig. 12 and Tab. 4) and measuring perturbations on the aquifer from them and in the six nearby piezometers (238, F-12-7, 239, 244, 245, 246), by means of data loggers and manual measuring gauges; the test lasted 8 days with steps ranging from a minimum of 10 minutes to a maximum of 1 hour. At a second stage return was made to initial conditions.

After 2 days from returning to initial conditions, only the levels of piezometers 244 and 245 stabilized, while in all other observation points there were differences ranging from 0.35 m to 0.74 m with maximum differences in piezometers F-12-7 and 239. Piezometric levels of piezometer 246 are shown in Fig. 15 and they are compared to pumping rates of borehole 243. It should be noted that levels do

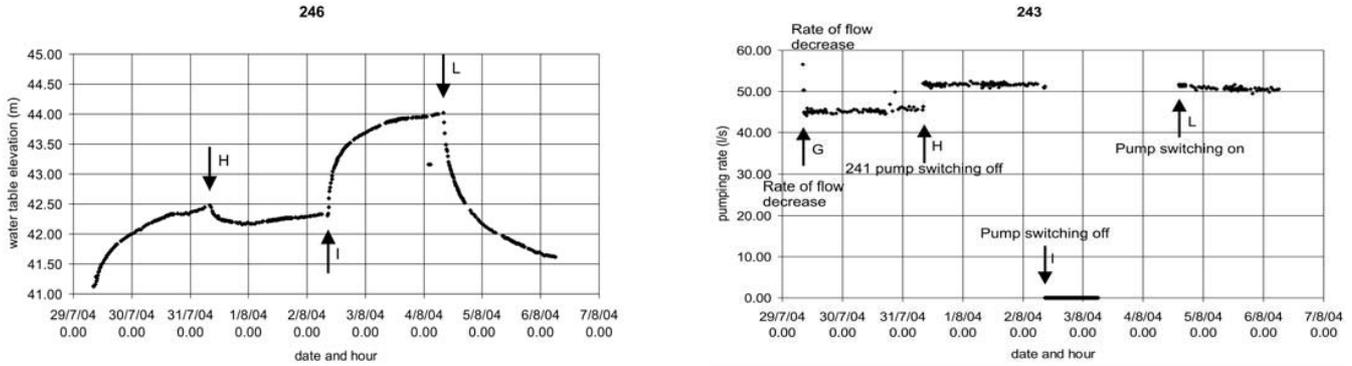


Fig. 15 - Confronto tra i livelli piezometrici misurati nel piezometro 246 e i tassi di pompaggio del pozzo 243 del campo pozzi Sunceri
 - The comparison between observed piezometric levels in 246 and pumping rates of 243 well in Sunceri well field

Well	Normal pumping rate (l/s)	Pumping rate days 1, 2 (l/s)	Pumping rate decrease days 1, 2 (%)	Pumping rate days 3, 4 (l/s)	Pumping rate days 5, 6 (l/s)	Pumping rate days 7, 8 (l/s)
241	44	26	40	0	44	44
242	51	31	40	51	51	51
243	51	45	12	51	0	51
Pumping rate difference with respect to days 1, 2 (%)	48	0		0	-7	25

Tab. 4 - Variazione dei tassi di pompaggio durante la prova sul campo pozzi Sunceri
 - Pumping rates variation during Sunceri well field test

del pozzo 243. E' degno di nota il fatto che i livelli idrici non tornino ai valori iniziali dopo 2 giorni dal termine delle perturbazioni e l'influenza che le variazioni di portata presentano sui livelli anche a distanze notevoli (punto H in Fig. 15).

I risultati della modellazione indicano che la zona 19 (Fig. 12), in cui sono ubicati i pozzi 240 e 241, presenterebbe in data 06/08/04 una differenza tra portata emunta e flusso idrico di soli 15 l/s (Tab. 2). Gli apporti idrici ai pozzi 242 e 243, sarebbero poco consistenti essendo il flusso di direzione NNW-SSE impoverito precedentemente. Ciò indicherebbe una situazione prossima alle condizioni critiche. La confluenza di 3 flussi idrici da NNW, SE e SW (Fig. 14), indicherebbe la presenza di condizioni migliori nel settore meridionale dell'area. Il modello indica che, mentre nell'area Sunceri si assisterebbe ad una riduzione di flusso idrico pari a 13 l/s in condizioni di minimo piezometrico, la zona 22 (Fig. 12) presenterebbe un deficit di soli 2 l/s. La stima di un flusso idrico pari a 107 l/s (Tab. 2) renderebbe interessante tale zona per un possibile sfruttamento.

CONCLUSIONI

Il modello ha permesso un'analisi complessiva del sistema idrogeologico dell'area per quanto riguarda i quantitativi idrici coinvolti

not return to initial conditions after 2 days after the tests had been stopped. It should also be noted how variations in pumping rates affect levels at far distances (H).

The results of the model show that in the area 19, on date 06/08/2004, where wells 240 and 241 are located (Fig. 12), there is a difference between pumped discharge and flow of only 15 l/s (Tab. 2). Water available at boreholes 242 and 243 is little because discharge along the NNW-SSE flow occurs earlier along the flowpath. This indicates a critical situation in the well field. The intersection of three different flows coming from NNW, SE and SW (Fig. 14) is proof of better conditions in the southern part of the area. The model indicates that while in the Sunceri area there is a reduction of water flow equal to 13 l/s at minimum hydraulic head, the 22 area (Fig. 12) has a deficit of only 2 l/s. The calculated values of 107 l/s in this area (Tab. 2) make it interesting for future exploitation.

CONCLUSIONS

Regarding the water quantities available and simulations for optimisation of pumping rates, thanks to this model, it was possi-

e di effettuare simulazioni e previsioni utili per l'ottimizzazione dei regimi di pompaggio. Tuttavia, emerge la difficoltà incontrata nella modellazione di un sistema idrogeologico estremamente complesso e caratterizzato da una notevole eterogeneità ed anisotropia. Le semplificazioni effettuate in fase di creazione del modello (modello con flusso prevalentemente bidimensionale, componente verticale di velocità trascurabile, superfici idriche a livello costante) e la quantità di dati disponibili, permettono soltanto di cogliere le caratteristiche essenziali del sistema fisico. Lo stato attuale delle conoscenze ed i dati disponibili non hanno permesso la creazione di un modello diretto ma si è operato mediante modellistica inversa. Le conoscenze pregresse e i nuovi dati acquisiti, unitamente alle prove dinamiche effettuate nei campi pozzi hanno permesso di verificare e meglio quantificare i parametri idrogeologici dell'acquifero.

Imponendo la piezometria ed andando a stabilire sotto quali condizioni di apporti sotterranei il modello non si discosti dall'evolversi nel tempo dei livelli idrici misurati, la back analysis avrebbe indicato un eccesso idrico in tempi di magra pari a $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$, vale a dire una ricarica da ovest, cioè dalle zone montuose. In periodi di magra, cioè di basso carico idraulico, l'innescò di un apporto profondo da parte del sistema Ulua-Chamelecon, manterrebbe l'escursione della falda contenuta. Il fatto che il minimo delle precipitazioni locali non risulti in fase con i minimi piezometrici e che dal bordo orientale potrebbero esistere ulteriori uscite d'acqua dal sistema (es. Laguna Yucutuma), avvalorerebbe tale ipotesi. È stato inoltre calcolato che alla fine del periodo di esaurimento, il flusso attraverso una sezione posta circa N-S che taglierebbe l'intero acquifero, consisterebbe in $1.27 \text{ m}^3/\text{s}$ e che un abbassamento della piezometria dell'ordine della decina di metri, sarebbe prevista soltanto per il settore NW dell'area, mentre il resto del dominio non subirebbe abbassamenti sostanziali. Il settore centro-meridionale ed orientale dell'area avrebbe escursioni trascurabili. Il legame diretto tra queste acque e quelle relative alla struttura idrogeologica Valle del Sula (sistema Ulua-Chamelecon) farebbe risultare quest'area, perciò, a potenzialità elevatissima.

La modellazione di dettaglio ha permesso di stimare i tassi di pompaggio accettabili per l'acquifero in studio. In particolare, il campo pozzi Sunceri è risultato in una situazione prossima alle condizioni critiche, confermata peraltro dall'abbassamento piezometrico progressivamente crescente nell'area nel corso degli anni (2000-2003) e dai decrementi di portata specifica elevatissimi (portate specifiche attuali di 2-4 l/s m, contro gli oltre 10 l/s m iniziali). Fa eccezione la zona ubicata nel settore meridionale dell'area (zona 22, Fig. 12) per cui è stato calcolato un flusso idrico pari a 107 l/s. Nel settore meridionale, infatti, la confluenza di tre flussi da NNW, NE e SW assicurerebbe un sufficiente approvvigionamento idrico che farebbe risultare tale zona interessante per un eventuale sfruttamento. L'ottimizzazione del campo pozzi potrebbe essere effettuata distribuendo l'attuale tasso di pompaggio di 195 l/s, in un 85 % estraibile mediante 2 soli pozzi e in un 15 % mediante un nuovo pozzo da realizzare nella zona 22 per il quale si stimerebbe un livello dinamico

ble to make a complete analysis of the hydrogeologic system. However, this study has shown the notable difficulties encountered when modelling an extremely complex hydrogeological system characterized by strong heterogeneity and anisotropy. The drastic simplifications made when creating the model (model with mainly two-dimensional flow, vertical component with negligible speed, water surfaces with constant level, isotropic distribution of permeability) and the quantity of available data, only allow to get the essential characteristics of the physical system, supplying valid results only as a first approximation. Current awareness and available data do not allow a direct model to be created but has allowed only reverse modelling. Previous knowledge and newly acquired data, together with data from pumping tests in the well fields, have given better understanding and have verified the hydrogeologic parameters of the aquifer.

Establishing both piezometry and the underground inflow conditions below which the model does not shift from the evolution of measured water levels over time, back analysis indicated a water surplus in low water periods of $0.55 \text{ m}^3/\text{s}$. Such a result may indicate recharging from the west, that is, from the mountain areas, but we cannot exclude a recharge from a deep supply, probably from the Chamelecon - Ulua system, in low water periods, when there is a low hydraulic head. This is borne out by the fact that the minimum local precipitation is not in line with piezometric minimums and that there may be further water outlets from the eastern border of the system (e.g. Yucutuma Lagoon). Moreover, it has been calculated that at the end of the period of recession, the flow across a section located approximately north-south, crossing the entire aquifer, consisted of $1.27 \text{ m}^3/\text{s}$ and that a fall in the piezometric surface in the range of about a ten of metres can be foreseen for the northwest sector of the area only, while the rest of the domain will not fall substantially. The central-southern and eastern sectors of the area seem to have negligible drawdown: the mathematical model seems to confirm a direct link between these waters and those concerning the hydrogeological structure of the Valle del Sula (Chamelecon-Ulua system). Therefore, the area seems to have extremely high potentiality.

The detailed modelling has made evaluation of correct pumping rates possible. Particularly, in the Sunceri well field a critical situation was shown and proved by the progressive lowering of the hydraulic head in the area during the 2000-2003 period and the strong lowering of specific rate of flow (present specific rates of flow are 2-4 l/s while initial discharge rates were 10 l/s). The southern part of the area, near area 22 (Fig. 12) is an exception with its 107 l/s. In this area, the intersection of three flow lines from NNW, NE and SW, assure plenty water supply, thus resulting interesting for future water exploitation. The optimisation of the well field could be obtained by redistributing the present 195 l/s abstraction with 85% from two wells and the remaining 15% from a newly drilled well in the area 22. For this new well a 18 meter dynamic level has been calculated. This would mean a reduction in cone

pari a 18 m dal p.c.. Tale scelta permetterebbe di ridurre l'interferenza del cono di depressione con gli altri pozzi e di avere a disposizione 2 pozzi pronti ad essere messi in esercizio in caso di emergenza.

Differente è la situazione del campo pozzi Chamelecon in cui il flusso idrico sarebbe caratterizzato da un potenziale notevole a causa del rapporto con il sistema idrogeologico dell'Ulua-Chamelecon. Per l'area, è prevedibile un ulteriore sfruttamento della risorsa idrica non superiore a 125 l/s. La perforazione di un nuovo pozzo di emungimento potrebbe interessare l'area centro orientale della zona 21 (Fig. 12), in cui andrebbero a confluire due flussi idrici, da SW e da S. Ipotizzando una profondità del substrato idrogeologico costante, in mancanza di una campagna geofisica mirata, considerando che la potenzialità dell'area 21 è stimabile intorno ai 937 l/s, la modellazione indicherebbe per una portata di 100 l/s per il pozzo in questione, un livello dinamico pari a 26 m dal p.c..

L'esecuzione di future indagini, volte a determinare l'uscita idrica dal sistema nel settore lagunare sul bordo nord-orientale del dominio, permetterà di migliorare la conoscenza del sistema idrogeologico e di effettuare modellazioni più accurate al fine di valutare opportune strategie per una gestione ottimale degli emungimenti

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. G. Crema per i suoi utili suggerimenti, il Dr. S. Di Santo, il Dr. R. Menjivar, il Dr. L. Gasparri, il Dr. A. Rapisaldi, il Dr. L. Speranza e il Dr. A. Gennarini per la loro collaborazione e la società ASP (Agua De San Pedro) per aver permesso la pubblicazione di questo studio; anonimi revisori per aver migliorato la qualità della pubblicazione.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ASTM (1993) - *Standard Guide for Application of a Ground-Water Flow Model to a Site-Specific Problem*. ASTM Standard D 5447-93, West Conshohocken, PA, 6 pp.
- CARRUTHERS R.M. (1983) - *Geophysical surveys in Honduras to assist groundwater resource evaluation studies: October 1982-January 1983*. Institute of Geological Sciences, Overseas Development Administration, AGU report no. 148, London.
- DIMA & MONCADA G.L. (1994) - *Integración del sistema de abastecimiento de agua de los sectores norte y nor-este de San Pedro Sula-Cortes. Informe final*. DIMA informe, Vol.I.
- DIMA, HAZEN & SAWYER (1994) - *Estudio del Plan Maestro de alcantarillado de la ciudad de San Pedro Sula y el desarrollo de una primera etapa de ampliación y mejoras del sistema actual, Informe final*. DIMA informe, Vol.II, Base de planeamiento y diseño.
- DOHERTY J. (1994) - *PEST: Model-independent parameter estimation*. Watermark Numerical Computing, Brisbane, Australia.
- DONNELLY T.M., HORNE G.S., FINCH R.C., & LÓPEZ RAMOS E. (1991) - *Northern Central America: The Maya and Chortis Blocks: in The Geology of North America, H: The Caribbean Region*. Geol. Soc. Am., Boulder, Co. USA (Dengo, G. and J.E. Case, eds.): 37-76.
- ELVIR A. R. (1974) - *Mapa Geológico de la República de Honduras*. Instituto Geográfico Nacional.
- ELVIR A. R. (1976) - *Síntesis de la geología de Honduras, Informe y trabajos técnicos presentados en la IV Reunión de Geólogos de América Central*. Publicaciones Geológicas del ICAITI: 1-4.
- ENEE (EMPRESA NACIONAL DE ENERGIA ELECTRICA) (1988) - *Estudio de pre-factibilidad geotermica en la region central de Honduras, Informe Final*. V. 2, 2a. Tegucigalpa, Honduras.
- EPPLER D., FAKUNDINY R. & RITCHIE A. (1986) - *Reconnaissance evaluation of Honduran geothermal sites*. Los Alamos National Laboratory, 15 pp.
- FINCH R. C. (1981) - *Mesozoic stratigraphy of central Honduras*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **65**: 1320-1333.
- FINCH R. C. (1986) - *Catalog of known hot springs and thermal place names for Honduras*. Los Alamos National Laboratory, 13 pp.
- FOYE W. G. (1918) - *Notes on a collection of rocks from Honduras, Central America*. Journal of Geology, **26**: 524-531.

interference with adjacent wells and the possibility of having two spare wells for emergency situations.

The Chamelecon well field shows a different situation because of its relation with the underground system of Ulua-Chamelecon. It presents major potentialities with a maximum of other 125 l/s abstraction possible. A new well could be drilled in the area 21 (Fig. 12) where an intersection of two different flow lines from SW and S is present. With no geophysical surveys and postulating a constant impermeable basement, the model indicates a 937 l/s potentiality for the area 21, a 100 l/s discharge for the new well and a dynamic level of 26 meters from ground level.

Future planned surveys could help finding flow outputs towards the lagoon area in the northern boundary of the area, thus optimising the understanding of the hydrogeologic system and making more reliable simulations possible.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their thanks to Prof. Giancarlo Crema for the useful advices, Dr. S. Di Santo, Dr. R. Menjivar, Dr. L. Gasparri, Dr. A. Rapisaldi, Dr. L. Speranza and Dr. Antonio Gennarini for their most useful collaboration; thanks to ASP (Agua De San Pedro) society for allowing the publication of this study; thanks to anonymous reviewers for improving this manuscript.

**HYDRODYNAMIC NUMERICAL MODEL AIMED AT WATER MANAGEMENT AND WITHDRAWAL OF SUB-TROPICAL ALLUVIAL AQUIFER
IN SAN PEDRO SULA AREA (HONDURAS)**

- HARBAUGH A.W. (1990) - *A Computer Program for Calculating Subregional Water Budgets Using Results from the U.S. Geological Survey Modular Three-dimensional Finite-difference Ground-water Flow Model*. U.S. Geological Survey. Open File-Report 90-392, 46 pp.
- HORNE G. S., CLARK G. S. & PUSHKAR P. (1976) - *Pre-Cretaceous rocks of north-western Honduras: basement terrains in Sierra de Omoa*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, **60**: 566-583.
- C. LOTTI & ASSOCIATI (2002) - *Estudio para la proteccion ambiental e acuífero del valle de Sula y de las fuentes de agua de la reserva forestal del Merendon, Informe final*.
- C. LOTTI & ASSOCIATI (2003) - *Plan Maestro de Alcantarillado Sanitario de San Pedro Sula, Honduras*.
- MCDONALD M.G. & HARBAUGH A.W. (1984) - *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey Open-File Report 83-875, 528 pp.
- MCDONALD M.G., HARBAUGH A.W., BANTA E.R., HILL M.C. (2000) - *MODFLOW 2000, The US Geological Survey Modular Ground-Water Model - User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey, Open File-Report 00-92, 121 pp.
- MCKENZIE ANDREW A. (1995) - *A hydrogeological database for Honduras*. Geological Society Special Publications. **97**: 157-162, Geological Society of London. London, United Kingdom.
- MILLS RICHARD A. (1991) - *Honduras. Bulletin*, Houston Geological Society. **34**; 2, Pages 16-17, 19, 21, 23.
- PATINO L.C. (1993) - *Geochemical traverse across Honduras*. Tesis de Masters inedita, Rutgers, The State University of New Jersey, 71 pp.
- PIERCE HERBERT A. & RIVERA-MONTES J.C. (1991) - *Preliminary bibliography of the geology and mineral deposits of Honduras*. Open-File Report - U. S. Geological Survey. OF 91-0102 47 pp.
- NORPLAN (1986a) - *Estudio Hidrogeológico, San Pedro Sula, Cortes. Reporte final*.
- NORPLAN (1986b) - *Informe de estudio hidrogeológico, pruebas cortas de bombeo en 17 pozos existentes*.
- NORPLAN (1987) - *San Pedro Sula, Estudio hidrogeológico, Reporte final*.
- NORPLAN (1990) - *Informe de estudio hidrogeológico, investigación de agua subterráneas y resultados de 15 perforaciones exploratorias en el área de San Pedro Sula*.
- PINDER G.F. (1970) - *A digital model for aquifer evaluation*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 7, Chapter C1.
- POMPER (1999) - *The groundwater situation in and around San Pedro Sula. Reporte final*.
- PRICKETT T.A. & LONNQUIST C.G. (1971) - *Selected digital computer techniques for groundwater resource evaluation*. Illinois State Water Survey Bulletin **55**: 62 pp.
- TRESCOTT P.C. (1975) - *Documentation of finite-difference model for simulation of three-dimensional ground-water flow*. U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438, 32 pp.
- TRESCOTT P.C., PINDER G.F. & LARSON S.P. (1976) - *Finite-difference model for aquifer simulation in two dimensions with results of numerical experiment*. U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigation, Book 7, Chapter C1, 116 pp.
- WARD D.F., BUSS D.R., MERCER J.W. & HUGHES S.S. (1987) - *Evaluation of a groundwater corrective action at the Chem-Dyne hazardous waste site using a telescopic mesh refinement modelling approach*. Water Resources Research, **23** (4): 603-317.
- WILLIAMS H. & MCBIRNEY A.R. (1969) - *Volcanic History of Honduras*. University of California, Publications in Geological Sciences, **85**: 101 pp.
- ZINIGA IZAGUIRRE & MARCO ANTONIO (1975) - *Gravity and Magnetic Survey of the Sula Valley, Honduras, Central America*. PhD, The University of at Austin.

Received October 2005 - Accepted September 2006