

APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE PROSPECÇÃO GEO-ELÉTRICOS NA PESQUISA DE AQUÍFEROS CÂRSTICOS*

Paulo Cyro Baptista Escodino**
Adelbani Braz da Silva**

* Trabalho realizado com auxílio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq

** Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais — CETEC

RESUMÉ

Dans la zone de Karst développée dans des roches carbonatées horizontales du Groupe Bambuí, située au nord de Minas Gerais, furent employées les méthodes de sondage électrique vertical (dispositif Schullumberger et de cheminement électrique (combinaisons bipôle-bipôle et pôle-bipôle) pour la recherche de structures Karstiques ayant pour objet l'évaluation de chaque méthode dans des conditions hydrogéologiques variées préalablement connues. La méthode de sondage électrique vertical, dans des dépôts détritiques, donne des résultats plus exacts en ce qui concerne l'épaisseur, au contraire de la méthode bipôle-bipôle qui donne des résultats exagérés, liés aux influences électriques de couches superficielles du sol. Les dispositifs bipôle-bipôle et pôle-bipôle dans les zones de dolines et de fractures donnent des résultats voisins pour la détection des grandes structures. Le dispositif bipôle-bipôle présente des résolutions meilleures, surtout quand il est employé avec un faible espacement; il a donné des résultats sans distorsions latérales liés aux influences électriques du sous-sol. En contre-partie, le pôle-bipôle présente des distorsions latérales lorsqu'il existe parmi les électrodes sources (A,B) d'importantes structures Karstiques dans le sous-sol, par ailleurs il donne une bonne résolution quand les électrodes de la source de courant sont mises dans des endroits où ne sont pas ressenties les influences électriques provoquées par ces structures géologiques.

INTRODUÇÃO

A pesquisa de água subterrânea em carste constitui um dos mais delicados problemas da hidrologia subterrânea. Embora existam muitas publicações e trabalhos sobre carste, a experiência mundial é ainda limitada em vista dos resultados práticos obtidos, uma vez que variam de um lugar para outro e, em cada caso, devem ser adaptadas todas as técnicas de prospecção às condições locais de geologia, hidrogeologia e hidrologia. Em muitas circunstâncias, a aplicação de técnicas "convencionais" no estudo de um carste não é suficiente para caracterizar o sistema hidráulico desse tipo de aquífero.

Com o objetivo de avaliar e definir novas técnicas de prospecção de água subterrânea em regiões cársticas, a Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC, em convênio com o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, está desenvolvendo um programa de pesquisa com utilização de sensores remotos. Essas técnicas não substituirão as convencionais, mas servirão como complemento ou em circunstâncias favoráveis as simplificarão, como no caso de estudos de grande detalhe ou em reconhecimento prévio de áreas muito extensas ou pouco acessíveis.

A zona de estudo abrange uma área de 10.800 km² e se situa entre os paralelos 14º30'S e os meridianos 43º30' e 44º30'WG compreenden

do as folhas topográficas, na escala 1:100.000, de Januária, Mata da Jaíba, Manga e Japoré, ao norte do Estado de Minas Gerais.

Dentro desse programa de pesquisa e com o objetivo de detectar zonas carstificadas, utilizando-se sensores, foram realizados levantamentos geofísicos por métodos elétricos. Os dispositivos aplicados foram o de sondagem elétrica vertical (S.E.V) com arranjo Schumberger e os de caminhamento elétrico arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo, com o objetivo principal de identificar qual apresenta melhores resoluções na detecção de estruturas cársticas favoráveis à água subterrânea. A pesquisa de água em zonas cársticas através da prospecção geofísica nem sempre apresenta resultados satisfatórios, em vista de que o meio não é contínuo, homogêneo e eletricamente isotrópico.

Utilizaram-se estes métodos em áreas selecionadas a partir da fotointerpretação e reconhecimento geológico superficial, além de dados da subsuperfície de poços tubulares existentes, para uma avaliação comparativa dos resultados qualitativos e quantitativos em cada dispositivo elétrico aplicado.

Esta pesquisa foi realizada sobre rochas carbonáticas Eocambrianas do Grupo Bambuí, sub-horizontais, que apresentam condições geológicas aproximadas às concebidas no estudo teórico destes métodos empregados. Estas rochas calcárias são recobertas, em alguns locais, por um capeamento detrítico Terciário-Quaternário e por aluviões recentes ao longo dos vales dos rios São Francisco e Verde Grande. A carstificação de idade Cenozóica produziu estruturas típicas, sendo a feição mais marcante, a concentração de dolinas orientadas segundo a direção das frações.

METODOLOGIA

Nos levantamentos geo-elétricos realizados foram empregados simultaneamente quatro eletrodos, sendo dois de fonte A,B (corrente elétrica em mA) e dois de diferença de potencial M,N (voltagem, em mV). A resistividade elétrica aparente (ρ_a) medida é dada pela equação $\rho_a = K \cdot \Delta V / I$, sendo K a constante calculada devido ao posicionamento geométrico relativo destes eletrodos no terreno.

Na sondagem elétrica vertical (S.E.V), segundo o dispositivo denominado quadripolo Schlumberger, os eletrodos são colocados em linha, em que A,B são externos e equidistantes do centro (0) e M,N internos próximos entre si e simétrico ao centro, de maneira que a distância A0 seja maior ou igual a cinco vezes M0. A profundidade de investigação é proporcional à distância AB e a constante geométrica é $K = \pi/2 (A0^2 - M0^2) M0$.

O dispositivo dipolo-dipolo consiste na aplicação de dois pares de eletrodos (AB e NM) equidistantes entre si (AB = NM) e colocados em linha. A distância BN que separa estes dois eletrodos é que determina aproximadamente a profundidade sondada. A medida que se estabelece o aumento da equidistância $x = AB = NM$, também se aumenta a profundidade de pesquisa, sendo possível efetuar-se medidas com profundidades pré-fixadas no perfil geo-elétrico. A constante geométrica calculada $K = \pi \cdot x (i^3 + 3i^2 + 2i)$, sendo $i = BN/x$ o número de passos "x" em relação a BN. Na confecção do perfil, o lançamento da resistividade obtida situa-se no ponto médio entre os eletrodos B e N. O nível teórico de profundidade pesquisado é calculado segundo a equação $P = (x + ix)/2$.

O dispositivo polo-dipolo também baseia-se no caminhamento elétrico dos pares de eletrodos A,B de fonte e N,M de potencial. Difere apenas do dipolo-dipolo por estar o eletrodo A fixo e posicionado a uma distância igual ou superior a 8 vezes o espaçamento constante de $x = NM$. A constante geométrica calculada tem a equação geral $K = 2\pi \cdot x \cdot (i^2 + i)$. Na confecção do perfil geo-elétrico, a resistividade elétrica é lançada no ponto médio entre os eletrodos B e N como no dipolo-dipolo. O lançamento da profundidade é efetuado segundo a equação $P = i \cdot x/2$.

Para execução dos levantamentos foi empregado o resistímetro portátil ER-300 de fabricação nacional com uma fonte de 12 volts de corrente contínua, potência máxima de 80W. Este aparelho permite leituras analógicas, de intensidade de corrente elétrica injetada no solo, de diferença de potencial e de resistividade elétrica aparente obtidas através de medição direta.

Na apresentação e análise dos dados, estes não sofreram tratamento matemático, utilizando-se tão somente os resultados sob leitura

analógica, excetuando-se apenas o tratamento estatístico efetuado para a determinação adequada dos valores das isolinhas de resistividade aparente, apresentados nas cartas geo-elétricas.

Foram executadas também algumas sondagens sísmicas de refração (CETEC, 1978) em pontos onde haviam sido efetuadas sondagens elétricas verticais, objetivando definir quantitativamente a espessura do capamento detrítico e comparar com os resultados dos métodos elétricos.

TRABALHOS REALIZADOS

As áreas selecionadas apresentam as seguintes características:

- 1 - Área de Mocambinho - situada na margem direita do rio São Francisco, próxima desta localidade, em zona de cobertura detrítica Terciário-Quaternária. Apresenta uma topografia aplainada com desnível aproximado de 30 metros em relação ao rio. Nesta área existem 6 poços tubulares, alinhados a proximadamente segundo a direção leste oeste. Estes poços atingiram a rocha carbonática alterada ou sã, após atravessar uma cobertura detrítica de até 64 metros. A superfície piezométrica nesta área está aproximadamente a 30 metros de profundidade. Foram empregados os dispositivos Schlumberger e o dipolo-dipolo em dois perfis geo-elétricos. Um perfil com 10,5 km paralelo às aluviões do rio São Francisco e outro com 13 km perpendicular a este rio (figura 1). Realizaram-se 49 S.E.V distantes entre si de 500 metros, com AB de 1000 metros e cobertura operacional linear de 49km. Em 11 destas S.E.V também foram efetuadas sondagens sísmicas de refração. No dispositivo dipolo-dipolo aplicou-se o espaçamento (AB) igual a 40 metros, para penetrações teóricas de 40 a 120 metros de profundidade.
- 2 - Área Colônia da Jaíba - Localizada a 4 km a noroeste desta localidade. Trata-se de uma dolina de forma irregular situada na intersecção de duas grandes lineações, com eixo maior desenvolvido ao longo da fratura principal, bastante evidenciadas em fotografias aéreas na escala 1:50.000. Esta dolina é preenchida por rocha decomposta e material detrítico e em algumas partes de suas bordas aflora calcário sã. Sua área aproximada é de 150.000m². Além de informações de superfície, dispunha-se de dados de dois poços tubulares situados dentro da dolina (MA-151 e MA-400) de perfis geológicos conhecidos. O poço MA-151 com uma profundidade de 102 metros, tem nível estático de 15,9 metros e nível dinâmico de 22,5 metros, com vazão de 148.000 l/h para um rebaixamento de 6,6 metros, ou seja, vazão específica igual a 22.424 l/h/m. O poço MA-400 situado a 360 metros de distância do anterior tem uma profundidade de 100 metros, nível estático de 14,0 metros, nível dinâmico de 30,2 metros, com vazão de 33.300 l/h, indicando uma menor vazão específica (2055 l/h/m). As entradas de água principais situam-se nos primeiros 60 metros em relação à superfície. Nesta área empregaram-se os dispositivos dipolo-dipolo e polo-dipolo em 15 linhas paralelas equidistantes de 30 metros, transversais às duas lineações observadas. Foram medidas 5000 leituras de resistividade em uma área de cobertura operacional de 280.200m². Nos levantamentos por polo-dipolo aplicou-se o espaçamento de 20 metros, investigando-se 5 níveis teóricos de 10 a 50 metros de profundidade. No dispositivo dipolo-dipolo empregaram-se os espaçamentos de 20 e 40 metros. Estes levantamentos elétricos realizaram-se em duas etapas (épocas seca e úmida) quando foram investigados 10 níveis entre 20 e 120 metros de profundidade. No ponto médio entre os poços MA-151 e MA-400 foi realizada uma sondagem sísmica de refração rasa, para aferimento quantitativo do material inconsolidado.

- 3 - Área Jaíba - Gado Bravo - Situada a cerca de 11 km ao norte da Colônia do Jaíba em direção ao povoado de Gado Bravo. É uma área plana onde foi identificada (por fotointerpretação) uma fratura com direção N39°W. Ao longo do trecho pesquisado nesta fratura não existia nenhuma dolina, nem afloramento de rocha sã. Nesta área existe um poço tubular (MA-130) situado a 500 metros da fratura, com nível estático médio de 17 metros. Empregou-se o dipolo-dipolo com espaçamento de 40 metros, e penetrações teóricas de 40 a 120 metros de profundidade. Foram realizados 4 perfis geo-elétricos com 1200 metros de comprimento, perpendiculares ao fraturamento e distantes entre si de 200 metros. Registraram-se 520 leituras de resistividade elétrica aparente.
- 4 - Área do rio Peruaçu - A área pesquisada situa-se no Vale do rio Peruaçu, a 30 km sudoeste da cidade de Itacarambi, na localidade denominada Janelão. Neste local, existe um sumidouro (caverna) a partir do qual o rio percorre um trecho subterrâneo de aproximadamente 600 metros. Esta caverna tem uma forma semi-elipsoidal, largura de 40 metros e altura de 84 metros. O pacote de rocha acima desta caverna tem espessura de 70 metros. As camadas de calcário nesta área apresentam-se com planos de estratificação horizontais. Observa-se que a carstificação que originou a caverna desenvolveu-se sob influência desses planos de estratificação. Existe também um desenvolvimento cárstico secundário vertical, proveniente da dissolução das rochas carbonáticas através de águas pluviais infiltradas em zona de fraturamento. A superfície piezométrica atual encontra-se a 154 metros de profundidade, em relação ao nível do terreno prospectado, (uma área plana sobre o trecho subterrâneo do rio). A prospecção foi realizada ao longo de três seções transversais ao rio Peruaçu, com direção N68°W. Empregou-se o espaçamento de 10 metros para ambos os dispositivos (polo-dipolo e dipolo-dipolo) investigando-se penetrações teóricas de até 55 metros de profundidade. Para maiores profundidades utilizou-se o espaçamento de 20 metros para polo-dipolo e 30 metros no dipolo-dipolo, com níveis teóricos de investigação máxima de 120 metros (dipolo-dipolo) e 60 metros (polo-dipolo). Os caminhamentos elétricos foram realizados no sentido NW-SE e SE-NW para se verificar possíveis distorções laterais devido a influências elétricas do sub-solo. Assim executaram-se 18 perfis geo-elétricos com 4265 leituras de resistividade elétrica.

RESULTADOS OBTIDOS

O dispositivo Schlumberger apresentou melhores resultados, na determinação de espessura do capeamento do carste, que o dipolo-dipolo. Este apresenta valores exagerados devido às influências elétricas das camadas subsuperficiais do solo, como se observa na Figura 2. Em ambos os métodos, o nível da água não foi claramente detectado, provavelmente devido ao efeito da capilaridade existente nos sedimentos.

Os fraturamentos e as estruturas cársticas foram bem detectados pelos dispositivos dipolo-dipolo e polo-dipolo, tanto nas áreas onde o nível de água era próximo à superfície (que permite a penetração de corrente elétrica) como naquelas zonas insaturadas. As figuras 3, 4, 5, 6 e 7 mostram os resultados de cada dispositivo empregado nas áreas selecionadas. Observa-se que na figura 3 os resultados obtidos nos dispositivos dipolo-dipolo (50m) e polo-dipolo (40m) apresentam-se semelhantes. As zonas mais resistivas correspondem às bordas da dolina e as de baixa resistividade correspondem às lineações de fraturamento. Na figura 4, nota-se que, no nível saturado de 40 metros, encontram-se menores valores de resistividade onde existem fraturamentos. Estes valores baixos bem correspondem às duas fraturas principais fotointerpretadas. Na figura 5, esta correspondência é bem evidenciada entre as estações 10 e 23. Entre estas estações localiza-se a zona de fraturamento. Na figura 6 observa

-se que no dipolo-dipolo a inversão do sentido de operação, não provocou distorção lateral das resistividades. Os picos de altas resistividades correspondem aos vazios (ar) existentes na rocha. A figura 7, com maior penetração de corrente elétrica, apresenta correspondência dos resultados obtidos em ambos os dispositivos de caminhamento elétrico. Entre as estações 37 e 49 encontra-se a caverna principal. Entre as estações 13 e 23 existe um "Karst" secundário também detectado eletricamente. Os resultados quantitativos obtidos na S.E.V são semelhantes aos do método sísmico de refração.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Analisando-se os resultados obtidos, pode-se destacar:

- Os fraturamentos fotointerpretados foram bem detectados pelos métodos elétricos.
- Os resultados obtidos nas épocas seca e úmida foram semelhantes, principalmente nos níveis mais profundos.
- Os métodos dipolo-dipolo e polo-dipolo apresentam melhores resoluções principalmente quando utilizados pequenos espaçamentos e para penetração teórica de até 50 metros de profundidade.
- O método dipolo-dipolo tem maiores influências elétricas das camadas superficiais. Estas influências acarretam distorções em profundidades, principalmente quando se utilizam espaçamentos maiores. Este método não apresenta grandes distorções laterais, independentemente do sentido de operação.
- O método polo-dipolo parece dar melhores resoluções quantitativas de profundidade, apresentando contudo algumas distorções laterais, devido às influências elétricas da rocha situada entre os eletrodos fontes (A e B).
- O método polo-dipolo apresenta valores de voltagem superiores aos valores detectados pelo dipolo-dipolo, o que facilita a operação em solos insaturados altamente resistivos, quando se utilizam resistivímetros de baixa potência.
- Para ambos os métodos de caminhamento elétrico, as maiores distorções apresentaram-se nos níveis mais superficiais. As menores distorções e melhores analogias foram observadas nos níveis mais profundos e saturados de água.

Levantamentos em dolinas e zonas de fraturamento, com os dispositivos dipolo-dipolo e polo-dipolo, apresentaram boa resolução. As estruturas previstas por geologia de superfície e por dados litológicos de poços foram detectadas eletricamente, quando o perfil elétrico atravessa uma sequência de bom contraste, como uma rocha não fissurada e seca (bordo de dolina, por exemplo) e a rocha fraturada saturada de água nas fendas.

Estes métodos elétricos oferecem boa resolução tanto para rochas fraturadas ou carstificadas com água, como para aquelas com fraturamentos ou carstificações preenchidas por material detrítico úmido.

Para levantamentos em áreas cársticas cobertas de rochas detríticas, seria conveniente a superposição dos métodos de S.E.V., caminhamento elétrico e sísmico de refração.

Em áreas cársticas sem cobertura detrítica é aconselhável a aplicação dos dispositivos polo-dipolo e dipolo-dipolo com espaçamentos de $AB = 10$ metros e arranjos para penetração de até 50 metros. Assim, seriam obtidos melhores detalhes de resolução, principalmente nas áreas com nível piezométrico situado entre 20 e 30 metros.

Os resultados obtidos eletricamente devem ser analisados juntamente com dados geológicos e hidrogeológicos.

BIBLIOGRAFIA

- ASTIER, J.L., 1975 - Geofísica aplicada a la hidrogeologia, 1a. Edição, Ed. Paraninfo, Madrid.
- CETEC, 1978 - Prospecção geosísmica na área do projeto Karst. Nota Técnica TRRS-03/78, Belo Horizonte, MG.
- COGGON, J.H. 1973 - A comparison of IP electrode arrays. Geophysics, Vol. 38, nº 4 (August 1973), pp. 737 - 761.
- CUSTODIO, E.G; e LLAMAS, M.R., 1976 - Hidrologia subterrânea, 1a. Edição, Ed. Omega, Barcelona.
- ESTEVES, J.M., 1968 - Prospecção geo-elétrica para pesquisa de águas no sul de Angola, alguns casos típicos. LNEC, Memórias nº 313, Lisboa.
- ESTEVES, J.M., 1971 - Aplicação das cartas de resistividades elétricas aparentes no estudo de barragens. LNEC, Memória nº 396, Lisboa.
- GHOSH, D.P., 1971 - The application of line filter theory to the direct interpretation of geoelectrical resistivity sounding measurements, Geophysical Prospecting 19, 192-217.
- GHOSH, D.P., 1971 - Inverse filter coefficients for the computation of apparent resistivity standard curves for a horizontally stratified earth, Geophysical Prospecting 19, 769-775.
- KIRK, K.G. e RAUCH, H., 1976 - The application of the tri-potential method of resistivity prospecting for ground-water exploration and land use planning in Karst terrains. Pensilvania, U.S.A.
- KOVACEVIC, S. and KRULC, A., 1978 - Some aspects of geoelectrical Investigation for ground-water in the Yugoslav Karst Region. Memoires A.I.H., VIII pp. 463-474.
- LAST, B.J. and REASBERRY, E.J., 1976 - Geophysical Investigation for ground-water at horefede (JIJIGA).
- PELTON, W.H., RIJO, L. and SWIFT, C.M., 1978 - Inversion of two-dimensional resistivity and induced - Polarization Data. Geophysics, vol. 43 (June 1978); P. 788-803.

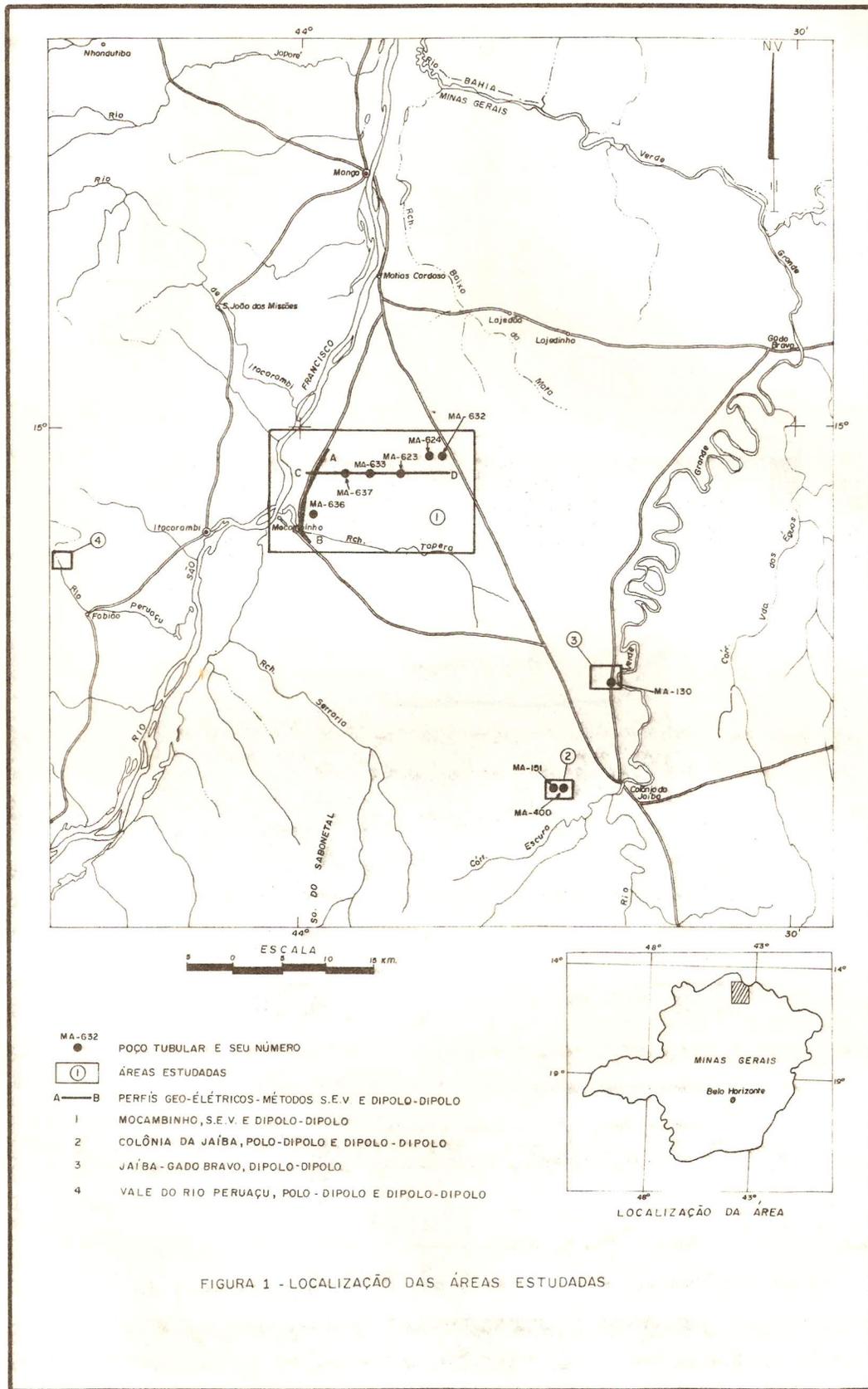
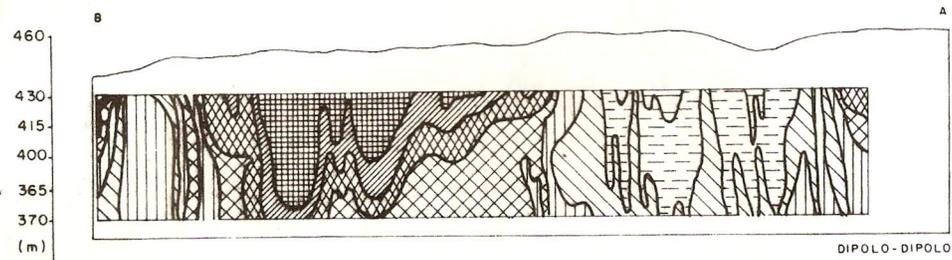
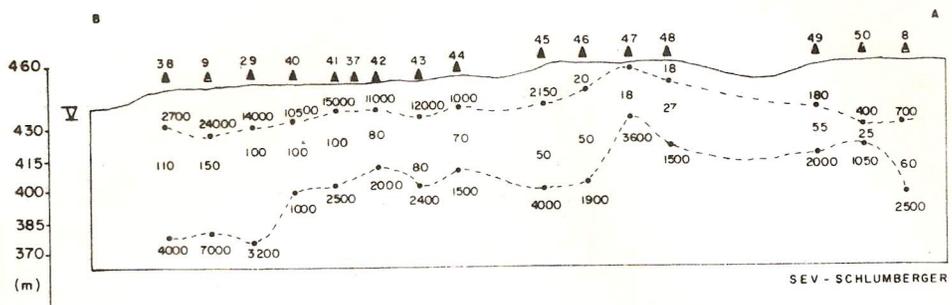
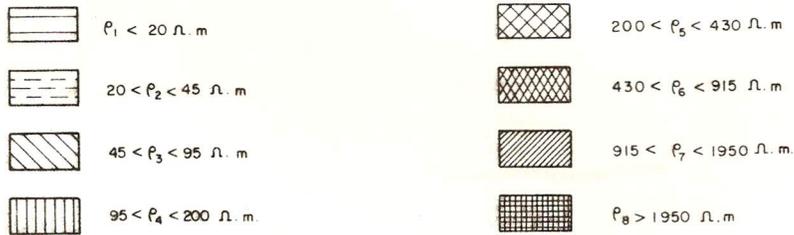


FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS



L E G E N D A



▲ 38 Sondagem Elétrica Vertical

▲ 8 Sondagem Elétrica Vertical e Sísmica de Refração

∇ Nível do Rio São Francisco

--- Limite da Zona isoressistiva

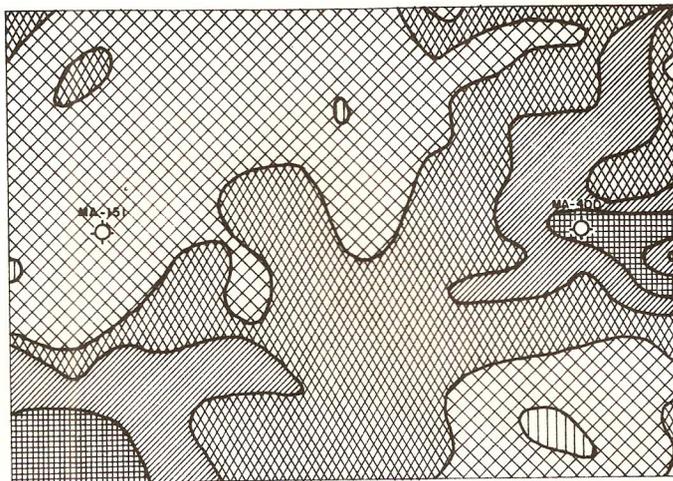
1000 Medida de Resistividade (em ohm.m) relativo a espessura

— Perfil topográfico

FIGURA 2 - COMPARAÇÃO DOS PERFIS GEO-ELÉTRICOS PARALELOS AO RIO SÃO FRANCISCO NA REGIÃO DE MOCAMBINHO

19

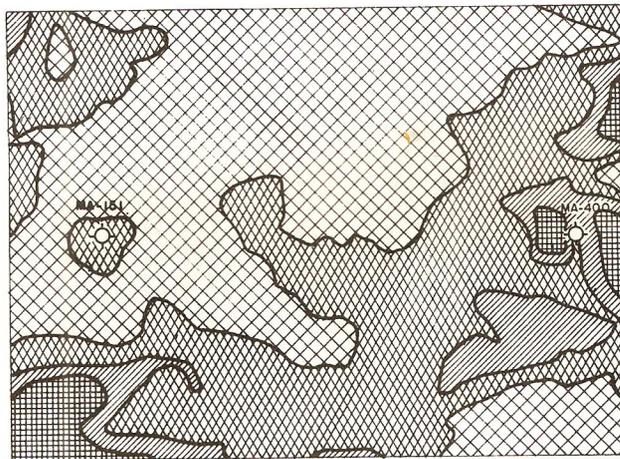
18 -
17 -
16 -
15 -
14 -
13 -
12 -
11 -
10 -
9 -
8 -
7 -
6 -
5 -
4 -
3 -
2 -



Polo - Dipolo
Prof. = 40 m
N.M = 20 m

A B C D E F G H I J K L M N O

19 -
18 -
17 -
16 -
15 -
14 -
13 -
12 -
11 -
10 -
9 -
8 -
7 -
6 -
5 -
4 -
3 -
2 -



Dipolo - Dipolo
Prof. = 50 m
N.M = 20 m

A B C D E F G H I J K L M N



L E G E N D A



$\rho_a < 90$



$230 < \rho_a < 370$



$\rho_a > 505 \Omega.m$

MA-400



Poço



$90 < \rho_a < 230$



$370 < \rho_a < 505$



Curvas de Isoresistividade

FIGURA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE OS DISPOSITIVOS POLO-DIPOLO E DIPLOLO-DIPOLO NA ÁREA DA COLÔNIA DA JAÍBA

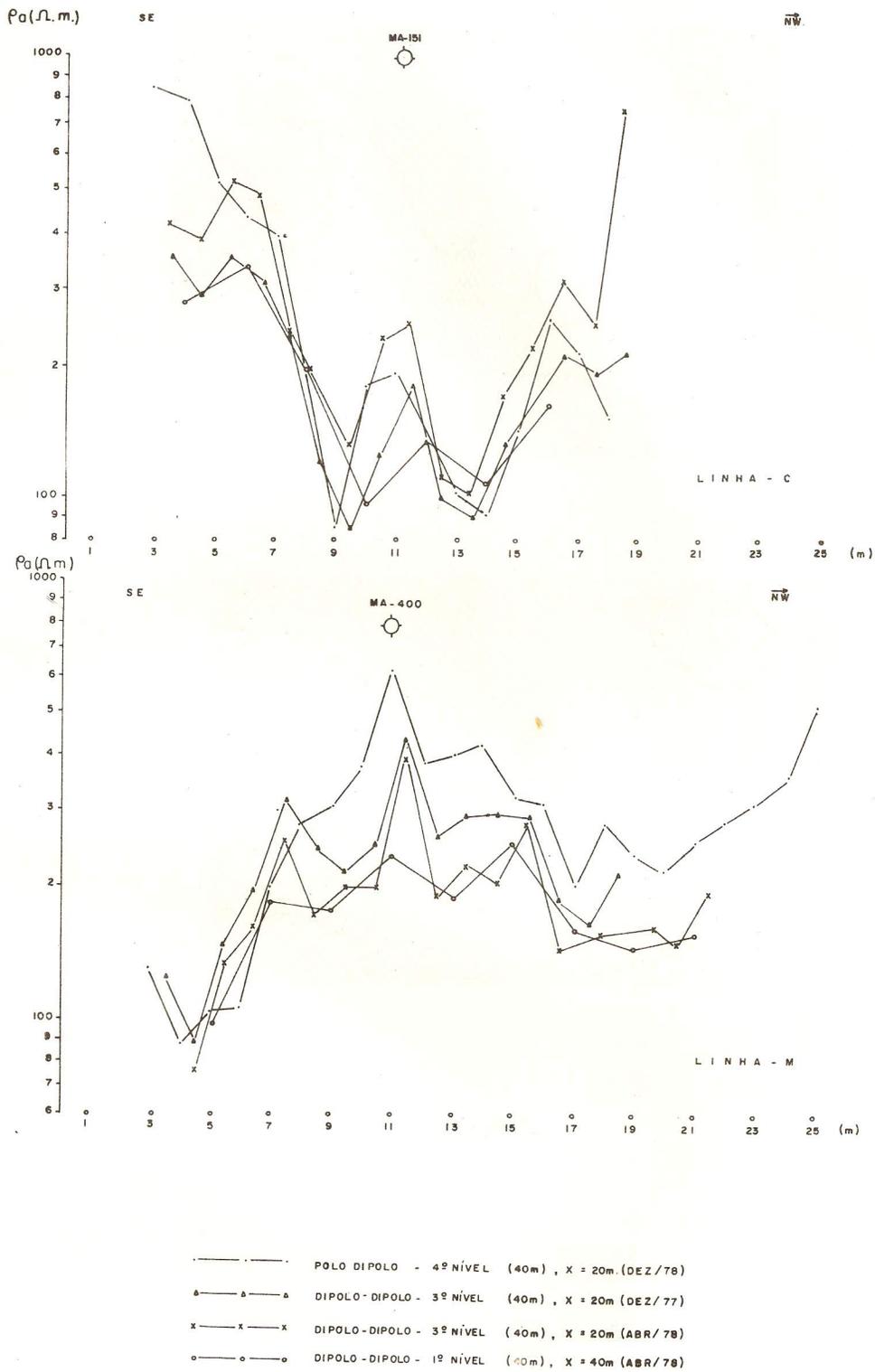
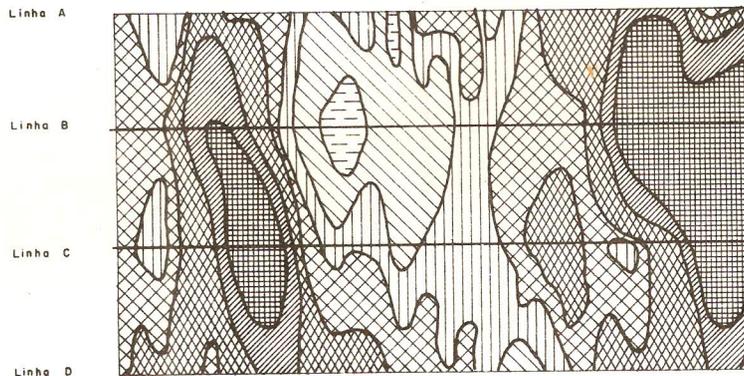
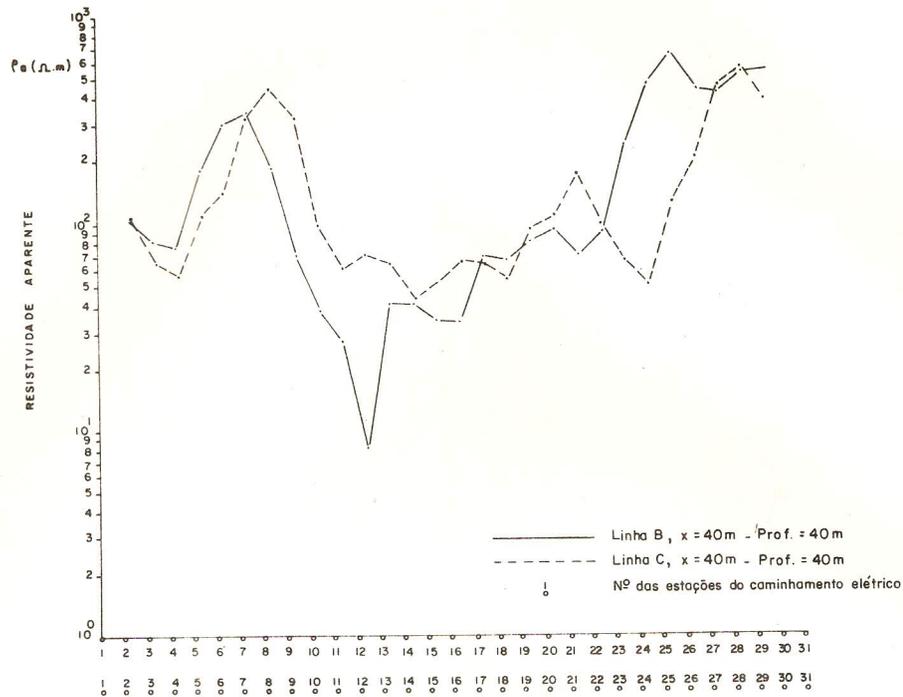
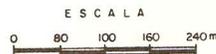


FIGURA 4 - VARIAÇÃO DAS RESISTIVIDADES AO LONGO DE PERFIS NA ÁREA DA COLONIA DA JAÍBA



PROFUNDIDADE TEÓRICA 40m
 $x = 40m$



L E G E N D A



FIGURA 5 - APLICAÇÃO DO DISPOSITIVO DIPOLO-DIPOLO EM ZONA DE FRATURAMENTO
 ÁREA JAÍBA - GADO BRAVO

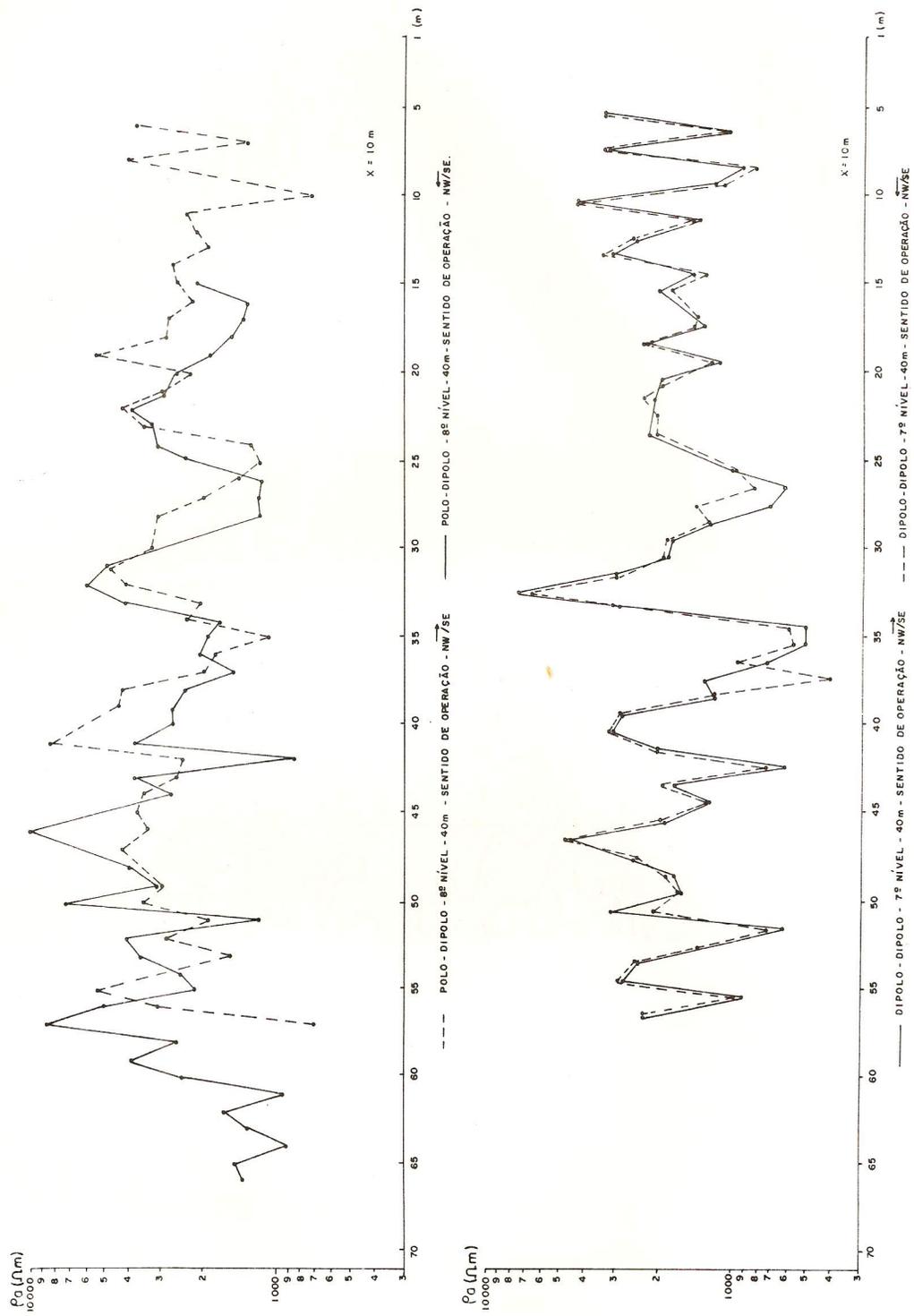


FIGURA 6 - COMPARAÇÃO DOS DISPOSITIVOS POLO-DIPOLO E DIPLO-DIPOLO NA ÁREA DO RIO PERUAÇU

FIGURA 7 - DETERMINAÇÃO DE ANOMALIAS DE ALTA RESISTIVIDADE EM TRECHO SUBTERRÂNEO DO RIO PERUAÇU

