

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

GEOTERMIA RASA EM BELÉM

Tese Apresentada por

RUTÊNIO LUIZ CASTRO DE ARAÚJO

como requisito parcial à obtenção do grau em

DOUTOR EM CIÊNCIAS

Na área de

GEOFÍSICA

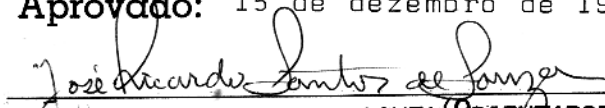
Conferido pelo Curso de Pós-Graduação em

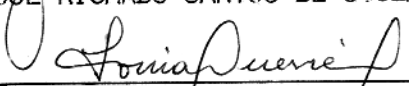
Geociências da

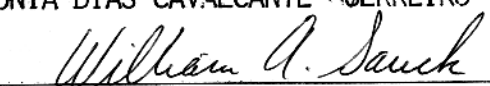
Universidade Federal do Pará

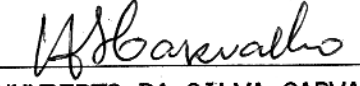
Aprovado: 15 de dezembro de 1987

Comitê de Tese


JOSE RICARDO SANTOS DE SOUZA (ORIENTADOR)


SONIA DIAS CAVALCANTE GUERREIRO


WILLIAM AUGUST SAUCK


HUMBERTO DA SILVA CARVALHO


ICARO VITORELLO

A meus pais

Jaime e Maria Lia

A minha esposa e filhos

Beatriz, Renata, Daniela e André

AGRADECIMENTOS

Desejo externar meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente a Deus pela vida, saúde e inspiração.

Ao Dr. José Ricardo Santos de Souza pela orientação, apoio e amizade.

A professora Midori Makino pelo auxílio prestado, incentivo e amizade.

A minha esposa e filhos pela paciência, interesse e abnegação.

Aos Drs. Humberto da Silva Carvalho, Ícaro Vitorello, Sônia Dias Cavalcanti Guerreiro e William August Sauck pelas críticas e sugestões importantes apresentadas.

Aos professores João dos Santos Protázio e Francisco de Assis Matos de Abreu pela ajuda dispensada.

A Universidade do Amazonas por permitir-me dedicação integral a este trabalho.

À direção e colegas do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará que possibilitaram o uso da infraestrutura de pesquisa disponível neste Centro.

Ao amigo Francisco Yukio Hiodo pelo auxílio e sugestões.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Financiadora de Estudos e Projetos e a German Agency for Technical Cooperation, que através de auxílios imprescindíveis apoiaram a realização deste trabalho.

A Geoser Perfurações e Sondagens Ltda e a Companhia de Saneamento do Estado do Pará que propiciaram amplo acesso aos poços utilizados.

Ao Laboratório de Climatologia Agrícola da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - CPATU - pelos dados fornecidos.

SUMÁRIO

	Pag.
DEDICATÓRIA	
AGRADECIMENTOS	
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	
RESUMO	1
ABSTRACT	3
 1. INTRODUÇÃO	 5
1.1 Objetivos	5
1.2 Relevância dos Estudos Realizados no Presente Trabalho, no Contexto da Geotermia	7
1.3 Estratigrafia da Região Metropolitana de Belém	9
 2. METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DOS DADOS	 12
2.1 Medidas de Temperatura	12
2.1.1 Termometria de Solo	12
2.1.2 Monitoramento Térmico	12
2.1.3 Perfilagens Geotérmicas	14
2.2 Medidas de Condutividade Térmica	16
2.3 Determinações de Difusividade Térmica	18
2.4 Outros Parâmetros Físicos Utilizados	19
2.4.1 Fluxo de Radiação Solar Incidente	20
2.4.2 Precipitação Pluviométrica Diária	21
 3. RESULTADOS DAS MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA	 22
3.1 Introdução	22
3.2 Valores de Condutividade Térmica Obtidos dos Testemunhos de Sondagem	22
3.2.1 Furo (1)	23
3.2.2 Furo (2)	29
3.2.3 Furo (3)	31
3.3 Valor Médio de Condutividade Térmica Para a Área em Estudo	33
3.4 Conclusões	39

4. GEOTERMIA PRÓXIMO À SUPERFÍCIE	41
4.1 Introdução	41
4.2 Condições Climatológicas da Região em Estu do	42
4.3 Deriva Anual da Temperatura	44
4.3.1 Variação Temporal da Temperatura a 1,0 m de Profundidade	44
4.3.2 Variação Anual dos Perfis de Temperatura Dentro da Zona de 0,02 a 10,0 m de Pro fundidade	47
4.4 Distribuição Vertical da Densidade, Calor Específico, Condutividade e Difusividade Tér micas	56
4.5 Distribuição do Fluxo de Calor no Intervalo de Profundidade de 0,02 a 6,0 m	58
4.6 Conclusões	66
5. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS PERFIS GEOTÉRMICOS RA SOS	69
5.1 Introdução	69
5.2 Descrição Acerca da Coleta dos Dados e Ca racterísticas dos Poços Estudados	69
5.3 Discussão Referente a Configuração e Evo lução dos Perfis de Temperatura	76
5.4 Configuração Térmica de Outros Poços Perfi lados	81
5.5 Possíveis Fontes de Perturbações Sobre os Perfis Geotérmicos Observados	88
5.5.1 Movimento de Água Subterrânea	88
5.5.2 Erro de Medida	97
5.5.3 Atividade de Perfuração	98
5.5.4 Deriva dos Termistores	99
5.6 Fluxo de Calor a Profundidade de 40 m	100
5.7 Conclusões	102
6. SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DO CALOR E SUA APLICAÇÃO EM GEOTERMIA RASA	104
6.1 Introdução	104

6.2	Formulação do Problema	105
6.3	Solução Numérica do Problema	106
6.4	Resultados e Discussão	114
6.5	Conclusões	117
7.	SINOPSE DAS CONCLUSÕES	121
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
ANEXO A: DESCRIÇÃO LITOLÓGICA DOS FUROS (1), (2) e (3) OBTIDA PELA ANÁLISE DOS TESTEMUNHOS DE SON DAGEM		130
ANEXO B: TABELAS		136

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

2.1	Descrição Esquemática do Furo Utilizado Para o Monitoramento Térmico	15
3.1	Distribuição dos Poços CG, IPASEP, UNA e MARITUBA e dos Furos (1) a (3) na Região Metropolitana de Belém	24
3.2	Medidas de Condutividade Térmica Referentes aos Testemunhos de Sondagem dos Furos (1) a (3)	27
3.3	Perfis de Raios-γ e Litológico Correspondentes aos Poços IPASEP e CG	35
3.4	Perfis de Raios-γ e Litológico Correspondentes aos Poços UNA e MARITUBA	36
4.1	Distribuição das Médias Mensais (Atinentes aos Períodos de 1896 a 1922, 1931 a 1960 e Março/85 a Fevereiro/86) da Precipitação Pluviométrica, Insolação e Temperatura do Ar	43
4.2	Distribuição das Médias Móveis de 5 Dias do Fluxo de Radiação Solar Incidente e Precipitação Pluviométrica; Valores de Temperatura Registrada a 1,0 m de Profundidade , às 9:00 h - Período: Março a Abril/85	46
4.3	Distribuição das Médias Móveis de 5 Dias do Fluxo de Radiação Solar Incidente e Precipitação Pluviométrica; Valores de Temperatura Registrada a 1,0 m de Profundidade , às 9:00 h - Período: Março/85 a Fevereiro/86	48
4.4	Perfis de Temperatura de 0,02 a 10,0 m, Referentes ao Período de Março a Setembro/85 às 9:00 h	50
4.5	Perfis de Temperatura de 0,02 a 10,0 m, Referentes ao Período de Setembro/85 a Fevereiro/86, às 9:00 h	51

4.6	Perfis de Temperatura de 0,02 a 10,0 m Referentes ao Período de Março a Setembro/85, às 18:00 h	52
4.7	Perfis de Temperatura de 0,02 a 10,0m, Referentes ao Período de Setembro/85 a Fevereiro/86, às 18:00 h	53
4.8	Distribuição dos Valores Referentes ao Fluxo de Radiação Solar Global Incidente, Relativa ao Período de Fevereiro/85 a Fevereiro/86, na Região Metropolitana de Belém	55
4.9	Distribuição dos Valores Referentes as Massas de Areia, Argila e Água, Densidade, Calor Específico, Condutividade e Difusividade Térmicas Pertinentes a Amostras do Furo (3)	57
4.10	Comportamento do Fluxo de Calor, no Intervalo de 0,02 a 6,0 m, Referentes ao Período de Março a Agosto/85, às 9:00 h	60
4.11	Comportamento do Fluxo de Calor, no Intervalo de 0,02 a 6,0 m, Referente ao Período de Setembro/85 a Fevereiro/86, às 9:00 h	61
4.12	Comportamento do Fluxo de Calor, no Intervalo de 0,02 a 6,0 m, Referente ao Período de Março a Agosto/85, às 18:00 h	62
4.13	Comportamento do Fluxo de Calor, no Intervalo de 0,02 a 6,0 m, Referentes ao Período de Setembro/85 a Fevereiro/86, às 18:00 h	63
4.14	Distribuição do Fluxo de Calor Médio nas Estações Seca e Chuvosa às: a) 9:00 h; b) 18:00 h	65
5.1	Perfis de Temperatura Referentes ao Poço (CG), no Período de Fevereiro/85 a Janeiro/86	71

5.2	Perfis de Temperatura Referentes ao Poço (IPASEP), no Período de Fevereiro/85 a Janeiro/86	73
5.3	Perfis de Temperatura Referentes ao Poço (UNA), no Período de Fevereiro/85 a Janeiro/86	75
5.4	Perfis de Temperatura Referentes ao Poço (MARITUBA), no Período de Fevereiro/85 a Janeiro/86	77
5.5	Perfis de Temperatura Referentes a Seis Poços Localizados na Região Metropolitana' de Belém	84
5.6	Perfis de Temperatura Referentes a Seis Poços Localizados na Região de Barcarena (PA) e um na Região de Mosqueiro(PA)	85
5.7	Perfis de Temperatura Publicados na Literatura	86
5.8	Perfis de Temperatura Publicados na Literatura	87
5.9	Evolução Temporal dos Perfis de Temperatura Referentes ao Furo (4), Estando a Bomba D'Água no Poço (CG) a) Ligada, b) Desligada	90
5.10	Evolução Temporal dos Perfis de Temperatura Referentes ao Furo (4), Estando o Compressor no Poço (CG) a) Desligado, b) Ligado e c) Sendo Ligado e Desligado Alternadamente em Intervalos de Uma Hora ...	91
5.11	Variação Diária do Fluxo de Radiação Solar Incidente e da Altura da Maré Relativa aos Meses de Setembro e Outubro/86	93
5.12	Perfis de Temperatura de um Poço, Antes e Após Seu Revestimento	93

5.13	Perfis de Temperatura, Referentes ao Pôço (CG) Alterados Devido ao Processo de Bombeamento	96
6.1	Perfis de Temperatura, Obtidos Via Modelamento, Período de Março/85 a Setembro/85, às 9:00 h	115
6.2	Perfis de Temperatura, Obtidos Via Modelamento, Período de Setembro/85 a Fevereiro/86, às 9:00 h	116
6.3	Perfis de Temperatura Obtidos Via Modelamento, Período de Março/85 a Setembro/85, às 18:00 h	118
6.4	Perfis de Temperatura Obtidos Via Modelamento, Período de Setembro/85 a Fevereiro/86, às 18:00 h	119

TABELAS

3.1	Medidas de Condutividade Térmica de Amostras Coletadas nos Furos (1) a (3)	26
5.1	Identificação dos Poços 1 a 31	83
B.1	Valores Totais Diários da Precipitação Pluviométrica na Região Metropolitana de Belém	137
B.2	Valores Diários da Insolação na Região de Belém	139
B.3	Valores Médios Diários da Temperatura do Ar em Belém	141
B.4	Valores Médios Mensais da Temperatura Médida a Profundidades de 0,02 a 10,0 m, no Período de Março/85 a Fevereiro/86, às 9:00 h	143
B.5	Valores Médios Mensais da Temperatura Médida a Profundidades de 0,02 a 10,0 m, no	

	Período de Março/85 a Fevereiro/86, às 18:00 h	144
B.6	Valores Diários Registrados do Fluxo de Radiação Solar Global Incidente, no Pe ríodo de Fevereiro/85 a Fevereiro/86	145
B.7	Valores Referentes as Massas de Areia, Ar gila e Água, Densidade, Calor Específico, Condutividade e Difusividade Térmicas Per tinentes a Amostra do Furo (3)	147
B.8	Valores de Fluxo de Calor, Referentes ao Furo (3), Atinentes ao Período de Março/ 85 a Fevereiro/86, às 9:00 h	148
B.9	Valores de Fluxo de Calor, Referentes ao Furo (3), Atinentes ao Período de Março/ 85 a Fevereiro/86, às 18:00 h	149

RESUMO

Um estudo detalhado de geotermia rasa foi realizado no intervalo de profundidade de 0,02 a 210,0 m, na região metropolitana de Belém.

As medidas de temperatura foram efetuadas com o uso de termômetros de mercúrio e termistor, enquanto as medidas de condutividade térmica foram feitas em testemunhos de sondagem, utilizando-se o aparato tipo agulha. O fluxo de radiação solar incidente foi registrado com um actinógrafo do tipo Robitzech.

O gradiente geotérmico médio obtido na região metropolitana de Belém foi de $0,0254 \pm 0,0007 \text{ }^{\circ}\text{C.m}^{-1}$. O valor médio de condutividade térmica dos testemunhos de sondagem coletados nesta região foi de $1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Por sua vez, o fluxo geotermal médio na região estudada é de $42,16 \pm 1,14 \text{ mW.m}^{-2}$.

A 1,0 m de profundidade ocorrem mudanças temporais nos valores de temperatura, as quais não podem ser consideradas como desprezíveis. Estas mudanças estão diretamente relacionadas com as variações do fluxo de radiação solar incidente na superfície. O maior incremento deste fluxo, observado de um dia para o outro, foi de cerca de 30 W.m^{-2} , o que correspondeu a um aumento de temperatura a 1,0 m de profundidade da ordem de $0,22 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os perfis de temperatura obtidos durante este trabalho apresentaram deriva em sentidos alternados, durante o ciclo de período de um ano.

Os perfis geotérmicos rasos são caracterizados por uma zona de fluxo de calor nulo, denominada "cotovelo", a partir da qual os valores de temperatura crescem com o aumento da profundidade. A profundidade do cotovelo é fundamentalmente influenciada pelo fluxo de calor gerado pela radiação solar incidente na superfície da área em estudo.

Elaborou-se um modelo de evolução temporal o qual representa a estrutura térmica e suas variações, da zona compreendida de 0,02 a 10,0 m de profundidade. Os resultados oriundos deste modelo de transferência de calor por condução foram comparados com os obtidos em trabalhos de campo. Observa-se uma boa concordância entre esses resultados. Porém, o ajuste numérico é

mais evidente para o período de setembro a fevereiro. Este modelamento poderá ser utilizado também para previsões de deriva dos perfis geotérmicos, desde que sejam conhecidos, a priori, os valores correspondentes às temperaturas médias mensais na superfície, o gradiente geotérmico regional e um dado perfil geotérmico.

Este trabalho comprova que o fluxo de radiação solar incidente na superfície é a principal fonte de influência sobre os perfis geotérmicos rasos. A profundidade máxima dessa influência depende principalmente da magnitude desse fluxo, do grau de proteção superficial à incidência direta da radiação e da litologia do local em estudo.

ABSTRACT

A detailed study of shallow geothermics was carried out at depth intervals of 0.02 to 210.0 m, in the metropolitan area of the city of Belém-Brazil.

The temperature measurements were performed by using mercury and thermistor thermometers, while the thermal conductivity measurements were made on core samples obtained from boreholes, by using a needle type apparatus. The incident solar radiation flux was recorded by a Robitzech type actinograph.

The average geothermal gradient obtained for the metropolitan area of the city of Belém was of 0.0254 ± 0.0007 °C. m⁻¹. The average value of the thermal conductivity of the core samples collected in this region was of 1.66 ± 0.52 W.m⁻¹.°C⁻¹. On the other hand the average geothermal flux observed within the studied region was of about 42.16 ± 1.14 mW.m⁻².

At 1.0 m depth one observes changes of the temperature values with time which can not be neglected. These changes are directly related to the incident solar radiation flux variations at the surface. The largest increment of this flux observed from one day to the other was about 30 W.m⁻², which corresponded to a temperature increment of the order of 0.22 °C at 1.0 m depth.

The temperature profiles obtained in this work, presented drifts in alternating directions during the one-year cycle of observations.

The shallow geothermal profiles are characterized by a zone of vanishing heat flux, so called "elbow zone", past which the temperature increases with depth. The depth of the elbow zone is mainly influenced by the heat flux generated by the incident solar radiation on the surface of the area under study.

A numerical model of the thermal structure evolution in time, was developed for the 0.02 to 10.0 m depth zone. The results generated from this model of heat transfer by conduction were compared with those obtained from the field work data. One observes good agreement between the two sets of data. However the numerical adjustment representation is closer to the field data in

the period of September to February. The model developed can be used for of profile drifts geothermal forecasts, as long as one knows a priori the corresponding values of the monthly averages of the soil temperatures at the surface, the regional geothermal gradient and one given geothermal profile.

This work demonstrates that the incident solar radiation flux at the surface is the main source of influence on the shallow geothermal profiles. The maximum depth of such influence depends mainly on the magnitude of such flux, on the degree of protection of the surface from the direct incidence of solar radiation and the lithology of the site under study.

1. INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Até o momento, a maior parte dos estudos científicos publicados referentes ao fluxo térmico terrestre visam obter a quantidade de calor na superfície terrestre, emanado de seu interior, a fim de possibilitar a realização de estudos concernentes a modelos e/ou processos geodinâmicos que estão correlacionados ao calor geotermal.

Em virtude, fundamentalmente, da influência das variações diurna e sazonal da temperatura causadas pelo fluxo de radiação solar incidente na superfície da área estudada e adicionalmente, da existência de possíveis movimentos de água subterrânea, a camada compreendida de zero até cerca de quarenta metros de profundidade é desprezada para o cálculo do fluxo térmico terrestre profundo. Assim, baseando-nos em dados representativos do resultado de uma perfilagem geotérmica profunda, podemos ressaltar que o calor geotermal assim calculado, não constitui o fluxo térmico na superfície terrestre, mas sim o correspondente ao emanado a profundidade de aproximadamente quarenta metros. O fluxo na superfície da Terra será então dado por:

$$Q = Q_0 + Q_1(t) \quad (1.1)$$

sendo,

Q = fluxo geotérmico na superfície terrestre

Q_0 = fluxo geotérmico a profundidade da ordem de 40 m

$Q_1(t)$ = fluxo térmico correspondente a camada de 0 a cerca de 40 m de profundidade.

Para uma dada região $Q_1(t)$ depende, fundamentalmente, de:

- . condutividade térmica do material geológico existente nas camadas envolvidas;
- . hora do dia;
- . estação do ano;
- . grau de proteção superficial a incidência direta do fluxo de radiação solar,

A determinação de Q_0 é mais importante que a de $Q_1(t)$, sendo esta desprezível, quando se desenvolvem estudos referentes a:

- . distribuição da concentração de elementos radioativos com a profundidade;
- . distribuição da temperatura nas camadas mais profundas da Terra;
- . convecção no manto superior;
- . convecção no núcleo externo;
- . variação da velocidade das ondas elásticas corpóreas com a profundidade;
- . energia geotérmica;
- . história geológica de dada região.

Esses estudos abrangem a maioria das pesquisas atuais no âmbito do fluxo térmico terrestre profundo.

A determinação de $Q_1(t)$ é mais importante que a de Q_0 , sendo esta desprezível, quando se desenvolvem estudos referentes a:

- . variações climáticas em uma dada região;
- . profundidade de influência das variações diurna e sazonal da temperatura causadas pelo fluxo de radiação solar incidente;
- . contribuição do fluxo de calor emanado do interior da Terra, Q , aos estudos meteorológicos e agrônômicos;

- . penetração de energia térmica no solo, durante as atividades de queimada;
- . efeito do aquecimento na formação de laterita no manto de in temperismo;
- . estimativa de evaporação local.

Estudos científicos dirigidos para a determinação de $Q_1(t)$ são, portanto, de real interesse para as Geociências.

Assim sendo, devido à imensa lacuna de dados geotérmicos rasos, principalmente no intervalo de um a quaren ta metros de profundidade, o presente trabalho tem como objeti vos principais:

- a. determinar os valores de Q_0 e $Q_1(t)$ para a região metropo litana de Belém;
- b. determinar a influência do aquecimento solar nas variações diária e sazonal dos perfis de temperatura para a região acima mencionada;
- c. determinar a evolução temporal dos perfis de temperatura ob tidos em poços tubulares;
- d. elaborar um modelo numérico que descreva a estrutura térmi ca e suas variações, para a zona na qual ocorram as maiores variações e magnitudes do fluxo de calor, dentro do interva lo de 0 a 40 m de profundidade.

1.2 Relevância dos Estudos Realizados no Presente Trabalho, no Contexto da Geotermia

O início dos estudos referentes ao fluxo térmi co terrestre coincide com o aparecimento de teorias concernen tes a origem, estrutura e comportamento do nosso planeta. Isto, dado ao fato de que tais teorias estão direta ou indiretamente relacionadas com o fluxo de calor oriundo do interior da Terra.

Na superfície terrestre, a energia geotermal não se manifesta de maneira tão evidente como outras fontes de

energia, exceto em áreas particulares. No entanto, ela apresenta uma magnitude relativa considerável, quando comparada com as principais fontes de energia que afetam a Terra (Smith, 1973; Kappelmeyer e Haenel, 1974), ou seja:

Fonte de Energia	Fluxo de Energia Média (W.m ⁻²)
. Energia Solar Incidente	146,3
. Fluxo Térmico Terrestre	66,9 x 10 ⁻³
. Radioatividade da Terra	50,2 x 10 ⁻³
. Atrito das Marés	1,3 x 10 ⁻³
. Vulcanismo	0,6 x 10 ⁻³
. Terremotos	(0,1 a 6,3) x 10 ⁻³

Em virtude do acima citado, torna-se de grande importância para as Geociências a realização de estudos relativos ao fluxo térmico terrestre. Porém, devido a diversos fatores, os trabalhos de termometria de solo e de fluxo térmico terrestre geralmente não abrangem a zona situada desde um até cerca de quarenta metros de profundidade. Nas duas últimas décadas, no entanto, esta zona vem recebendo alguma atenção, no que tange as pesquisas geotérmicas. Citamos, por exemplo, os trabalhos realizados para a prospecção geofísica (Astier, 1975), no mapeamento para o fluxo térmico terrestre profundo (Lee, 1977; Lesquer et al, 1983), no estudo das mudanças climáticas ocorridas na superfície terrestre (Roy et al, 1971; Beck, 1982) e, também, para a prospecção petrolífera (Zielinski et al, 1985). Todavia, existe ainda imensa lacuna de dados geotérmicos referentes às camadas superficiais, embora dado ao fato de que flutuações geotérmicas em tais camadas tenham consequência direta na biosfera terrestre, como ainda, ser tal zona de grande interesse na prospecção mineral. Assim sendo, estudos no âmbito da geotermia rasa são de real interesse científico, tecnológico e social.

A grande lacuna de dados geotérmicos na região Amazônica, a necessidade de se conhecer a sua estrutura térmica

rasa e os mecanismos de transporte de calor nas camadas mais superficiais, bem como a influência do último fator nas estimativas de evaporação local, constituem motivação suficiente para o desenvolvimento de inúmeros projetos de geotermia rasa na Amazônia.

O presente trabalho mostra os resultados e análises concernentes, oriundos dos estudos de geotermia rasa realizados na região metropolitana de Belém. Estes estudos fornecem importantes informações sobre o estado térmico atual das camadas mais superficiais dessa área.

O trabalho em pauta, além de descrever o comportamento e as variações da estrutura térmica das camadas superficiais, durante um ciclo de período de um ano, possibilita a realização de previsões geotérmicas concernentes.

Os dados provenientes destes estudos propiciam, também, o entendimento acerca do comportamento no transporte de calor nessas camadas.

Os estudos realizados são, portanto, relevantes no contexto da geotermia pois, diminuem a lacuna de dados geotérmicos na Amazônia, fornecem resultados e análises geotérmicas referentes às camadas superficiais, determinam o valor relativo ao fluxo térmico terrestre profundo da área estudada e, ainda, tornam possível efetuar-se previsões geotérmicas.

Assim sendo, o presente trabalho representa uma contribuição para o conhecimento e respostas para os problemas acima apresentados.

1.3 Estratigrafia da Região Metropolitana de Belém

Perfurações e Sondagens (1986) a coluna litoestratigráfica da região metropolitana de Belém é constituída, da base para o topo, da seguinte maneira: Embasamento Cristalino, Formação Pirbas, Formação Barreiras e Sedimentos Recentes.

Embasamento Cristalino

Este embasamento do Pré-Cambriano é formado por filitos, quartzitos, micaxistos, gnaisses, granitos e pegmatitos.

Formação Pirabas

Esta Formação da época do Mioceno Inferior, da base para o topo é composta pelos Membros Olaria e Capanema. Há um terceiro Membro, Fortaleza, que não ocorre na região de Belém.

O Membro Olaria é constituído de calcário de granulometria fina, pouca sílica e elevado teor de CaO. apresentando também intercalações de argila rica em fósseis.

O Membro Capanema é formado por uma intercalação de camadas de calcário, argila e areia; estas camadas apresentam cores variadas, sendo as camadas de calcário enriquecidas de material fóssil.

A Formação Pirabas deve ter se formado em um ambiente de mar calmo, raso e quente. Durante o período de sua formação ocorreram várias transgressões e regressões marinhas durante as quais foram erodidas e até destruídas camadas inicialmente formadas. Pelas características apresentadas, esta Formação deve ter permanecido por apenas curto intervalo de tempo exposta aos processos intempéricos.

Formação Barreiras

Esta Formação da época do Mioceno ao Plioceno foi desenvolvida em ambiente fluvial a lacustre, após a última regressão do mar de Pirabas. É composta de argilas (de coloração diversa) e areias. Nas partes elevadas desta Formação observa-se a ocorrência de camadas com elevado teor de ferro, formando um arenito denominado regionalmente por "Grés do Pará". A Formação Barreiras foi fortemente erodida, ao ponto de que em algumas áreas esta Formação foi totalmente destruída.

Sedimentos Recentes

Estes sedimentos, de período Quaternário, são compostos de areias claras, de granulação fina a média e argilas. Uma grande quantidade dessas areias é proveniente da desagregação da Formação Barreiras. Devido ao elevado grau de erosão a que foi submetida a Formação Barreiras, em algumas áreas estes sedimentos quaternários estão diretamente sobrepostos a Formação Pirabas.

2. METODOLOGIA DE OBTENÇÃO DOS DADOS

2.1 Medidas de Temperatura

2.1.1 Termometria de Solo

As medidas de temperatura no solo, a profundidades de 0,02, 0,1, 0,2, 0,3 e 0,5 m, foram realizadas utilizando-se uma bateria de termômetros de mercúrio com precisão da ordem de $\pm 0,2$ °C. Entretanto, esta baixa precisão não implica em um erro relativo elevado nas medidas efetuadas, devido a magnitude das variações de temperatura a tais profundidades.

Tais medidas compreendem um período de vinte e dois meses e foram efetuadas junto à Estação Meteorológica, localizada no campus da Universidade Federal do Pará.

No processo de leitura dos valores de temperatura, que durou doze meses, as leituras foram feitas das nove às vinte e uma horas, em intervalos de três horas; as campanhas foram efetuadas diariamente.

2.1.2 Monitoramento Térmico

A partir de 1,0 m de profundidade, os valores de temperatura foram obtidos utilizando-se termômetros de termistor. A leitura da resistência elétrica do termistor foi efetuada com o emprego de uma ponte resistiva, tipo Wheatstone. A ponte resistiva foi adaptada para operar com um regulador de corrente contínua que permitiu o ajuste da corrente aplicada em 20 μ A, durante todas as medidas. O baixo valor da corrente aplicada possibilitou que a ponte permanecesse ligada por algumas horas ininterruptas sem, entretanto, aquecer de forma detectável o sensor térmico. Este procedimento tornou possível a leitura da resistência elétrica do termistor com precisão de $\pm 2,0$ ohm e resolução de $\pm 0,5$ ohm.

Os termistores foram previamente calibrados, usando-se um termômetro digital padrão com precisão de $\pm 0,02$ °C, da seguinte forma: ambos os termômetros foram imersos em um banho térmico digital de precisão de $\pm 0,01$ °C, com temperatura regulável, e as resistências elétricas do termistor, às diferentes temperaturas, foram medidas usando-se a mesma ponte resistiva supra mencionada. Dessa forma, foi possível a elaboração de uma curva de calibração que permitiu a conversão dos valores medidos da resistência elétrica do termistor em valores precisos de temperatura. As variações da temperatura foram registradas com precisão de $\pm 0,02$ °C.

A atividade concernente ao monitoramento térmico foi realizada simultaneamente com a atividade referente a termometria de solo. Neste estágio, de duração de doze meses, as medidas de temperatura foram realizadas as nove e as dezoito horas local do mesmo dia, porém, as campanhas de medidas foram espaçadas de cinco dias. Estas horas de observação foram selecionadas devido ao fato de que, nesta região tropical, em dias claros, às 9:00 h, o fluxo de radiação solar incidente já começou a elevar a temperatura da superfície e às 18:00 h esta fonte de energia pode ser considerada desprezível.

Os trabalhos relativos ao monitoramento térmico foram efetuados utilizando-se um furo com profundidade da ordem de dezessete metros, com diâmetro em torno de vinte e cinco milímetros, denominado Furo (3), o qual foi especialmente preparado para este objetivo.

A fim de minimizar as variações da temperatura produzidas pelas flutuações do nível freático, o Furo (3) foi revestido com tubo metálico de 25 mm de diâmetro e lacrado em sua extremidade inferior. Em seu interior foi inserida uma fina vara de alumínio onde foram fixados três termistores a profundidades de 1,0, 3,0 e 6,0 m. A seguir, este furo foi preenchido com água potável e fechada sua extremidade superior, para se evitar perda d'água via evaporação. Uma descrição esquemática

desse procedimento é apresentada na figura 2.1.

Dois outros furos, 4 e 1 respectivamente, distantes de cerca de 500 m do Furo (3), e em torno de 7 m entre si, também foram utilizados na atividade de monitoramento da temperatura, porém, apenas por um período aproximado de dois meses.

O Furo (4), com profundidade de 18 m e diâmetro de 25 mm, foi revestido com tubo metálico e recebeu o mesmo tratamento descrito na figura 2.1. Os termistores foram posicionados a profundidades de 1,0, 2,0 e 12,0 m.

O Furo (1), com profundidade de 30 m e diâmetro de 102 mm, foi revestido com tubo metálico apenas no intervalo de profundidade da superfície até 1,0 m. Suas extremidades permaneceram abertas. Os termistores foram posicionados, segundo a maneira descrita na figura 2.1, ora a profundidades de 10,0 e 20,0 m, ora a profundidades de 4,0 e 6,0 m.

2.1.3 Perfilagens Geotérmicas

As perfilagens geotérmicas foram realizadas em poços tubulares com diferentes diâmetros e tipos de revestimento.

As medidas de temperatura foram efetuadas usando-se um termômetro de termistor, o qual foi calibrado segundo a maneira descrita no item 2.1.2. As leituras das resistências elétricas do termistor, a diferentes profundidades, foram feitas com o auxílio da mesma ponte resistiva, também descrita no item 2.1.2.

As variações da temperatura foram registradas com precisão de $\pm 0,02$ °C e resolução de $\pm 0,005$ °C.

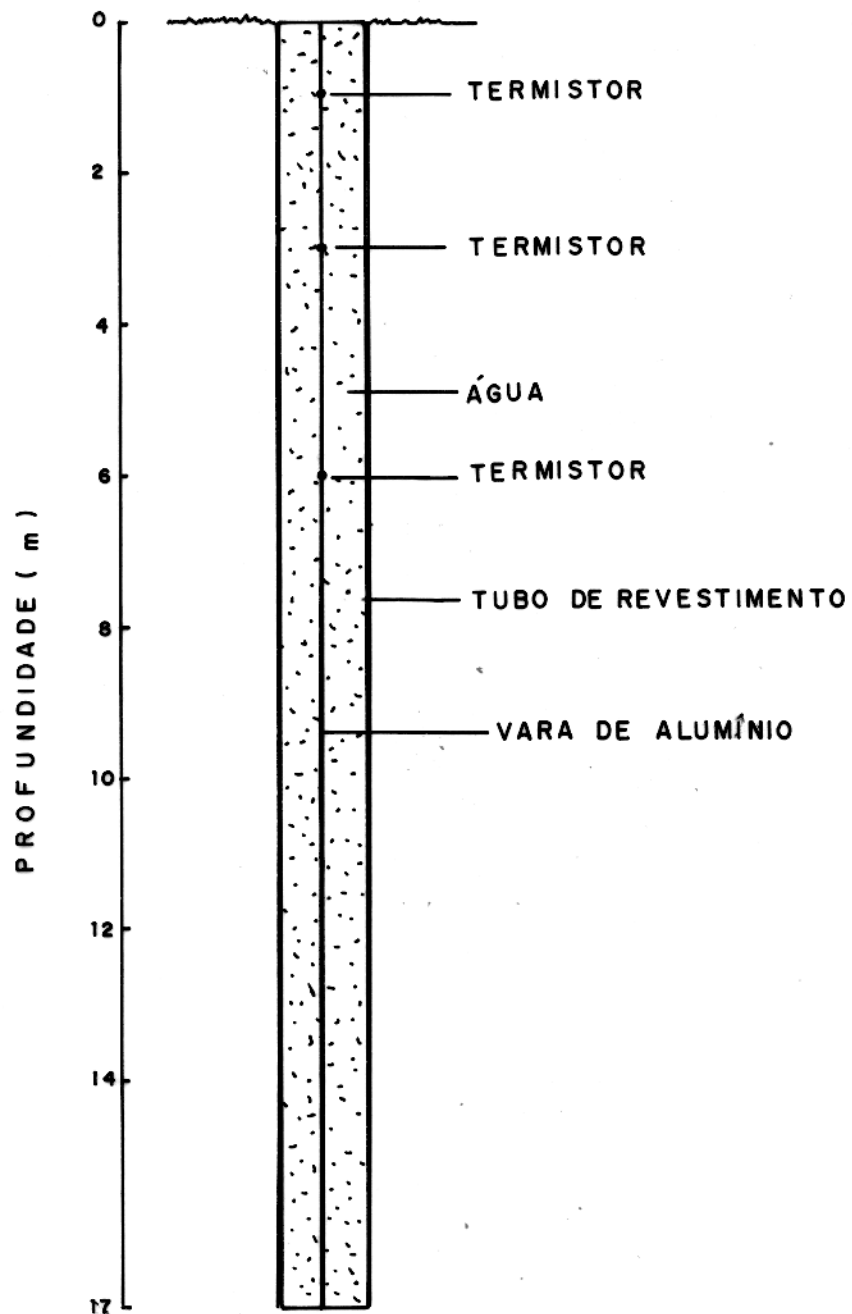


FIGURA 2.1 - DESCRIÇÃO ESQUEMÁTICA DO FURO (3), UTILIZADO PARA O MONITORAMENTO TÉRMICO.

As perfilagens geotérmicas foram realizadas em intervalos discretos de profundidade.

Em quatro poços distribuídos na região metropolitana de Belém, denominados CG, UNA, MARITUBA e IPASEP, foram efetuadas reperfilagens de temperatura durante um período de um ano, sendo que o intervalo de tempo decorrente entre as perfilagens foi de um mês.

Cada medida de temperatura foi efetuada deixando-se o sensor térmico à profundidade desejada por período de sessenta segundos.

Devido à ordem de grandeza medida e precisão almejada, cuidados especiais no campo foram tomados, como por exemplo, proteger a ponte resistiva contra a insolação direta. Tal procedimento reveste-se de vital importância, pois sem tais cuidados poderiam ocorrer mensuráveis flutuações nos valores de temperatura mascarando, assim, o perfil térmico verdadeiro.

2.2 Medidas de Condutividade Térmica

Todas as medidas de condutividade térmica referentes ao presente trabalho foram realizadas através do método transiente, utilizando-se o aparato tipo agulha.

O aparato tipo agulha usado neste trabalho é similar aos descritos por Von Herzen e Maxwell (1959), Langseth (1965), Smith (1973) e Carvalho (1981). Este aparato consiste em uma fonte de corrente contínua, uma fina agulha hipodérmica e um multímetro digital; no interior da agulha há um fio aquecedor e um termistor localizado em seu ponto médio.

Para se efetuar as medidas de condutividade térmica, a agulha é inserida na amostra a ser analisada e após ter sido atingido o equilíbrio térmico do sistema (agulha-

amostra) é ligada a fonte de corrente contínua. Isto provocará o aquecimento da sonda cuja temperatura, registrada pelo termistor, varia com o tempo segundo a relação (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$T_s = \frac{Q_s}{4\pi\lambda} \ln(t) + C \quad (2.1)$$

onde,

T_s - temperatura da sonda

t - tempo

Q_s - fluxo de calor, por unidade de comprimento, produzido dentro da agulha pelo fio aquecedor

λ - condutividade térmica da amostra analisada

C - constante

O gráfico dos valores registrados de temperatura em função de $\ln(t)$ resultará em uma relação linear cuja inclinação é dada por:

$$D = \frac{Q_s}{4\pi\lambda} \quad (2.2)$$

Assim sendo, desde que seja conhecido o valor de Q_s , a condutividade térmica da amostra analisada pode ser determinada pela equação (2.2).

O aparato tipo agulha utilizado neste trabalho apresenta as seguintes características:

$R = 361 \text{ ohm}$

$V_{cc} = 15 \text{ V}$

$L = 6,3 \text{ cm}$

sendo,

R - resistência do fio aquecedor

V_{cc} - diferença de potencial aplicada entre os termi
nais do fio aquecedor

L - comprimento da agulha

Assim, pela equação (2.2) temos que:

$$[Q_s] = [\lambda] [D] = \frac{W}{m}$$

Sendo:

$$\frac{V_{cc}^2}{R} = W \text{ (potência dissipada pela agulha)}$$

Para os parâmetros indicados de R , V_{cc} e L , temos que:

$$Q_s = 9,89 \text{ W.m}^{-1}$$

2.3 Determinações de Difusividade Térmica

Para a obtenção dos valores de difusividade térmica, realizamos, além das medidas de condutividade térmi
ca, determinações de densidade e cálculos referentes ao calor específico.

As densidades foram obtidas utilizando-se os resultados das medidas de volume e massa das amostras analisa
das. O volume foi determinado pelo deslocamento do nível de água em uma proveta após a imersão de uma amostra. A proveta era graduada com intervalos de 1,0 ml. A massa foi medida utilizando-se uma balança digital, com precisão de $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Os valores ponderados de calor específico foram calculados usando-se a seguinte equação:

$$C_{am} = \frac{m_{ag} \times C_{ag} + m_{arg} \times C_{arg} + m_{ar} \times C_{ar}}{m_{ag} + m_{arg} + m_{ar}} \quad (2.3)$$

sendo,

m_{ag} , m_{arg} e m_{ar} - as massas de água, argila e areia respectivamente presentes na amostra analisada

C_{am} , C_{ag} , C_{arg} e C_{ar} - os valores médios do calor específico correspondentes a amostra analisada, água, argila e areia.

Para o cálculo da equação (2.3) foram tomados os seguintes valores:

$$C_{ag} = 4,186 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1} \quad (\text{Rzhevsky e Novik, 1971})$$

$$C_{arg} = 0,963 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1} \quad (\text{Kézdi, 1974})$$

$$C_{ar} = 0,837 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1} \quad (\text{Kézdi, 1974})$$

Os valores correspondentes às massas de água, argila e areia foram obtidos da seguinte maneira e sequência:

- a. determinação da massa da amostra a ser analisada;
- b. secagem da amostra em estufa a 110 °C;
- c. determinação da massa da amostra no estado seco;
- d. cálculo da massa de água;
- e. separação dos grãos de areia e argila através de peneiras apropriadas com aberturas de 250 mesh;
- f. determinação das massas dos grãos de areia e argila.

2.4 Outros Parâmetros Físicos Utilizados

2.4.1 Fluxo de Radiação Solar Incidente

Os valores diários do fluxo de radiação solar incidente foram registrados por um actinógrafo bimetálico, tipo Robitzsch, de precisão em torno de 8%.

Este instrumento é essencialmente constituído de uma superfície receptora e de uma unidade registradora.

A superfície receptora é formada por três lâminas metálicas, sendo duas revestidas de cor branca e uma de cor negra, estando esta lâmina entre as outras duas. Cada lâmina é formada pela justaposição de duas placas metálicas com coeficientes de dilatação diferentes. A superfície receptora é acondicionada em uma cúpula de vidro a qual protege as lâminas contra chuvas, ventos, etc..., permitindo a passagem apenas da radiação solar.

A unidade registradora é constituída por um sistema de alavancas que aciona uma pena sobre o tambor de registro o qual é posto em movimento por um sistema de relojoaria.

O fluxo de radiação solar ao incidir sobre a superfície receptora provoca um aquecimento e, consequentemente, dilatação das lâminas metálicas. Devido a excelente capacidade do corpo negro em absorver a radiação incidente, a placa de cor negra experimentará mensuravelmente maior efeito de dilatação, em relação às placas de cor branca. Essa diferença de dilatação se transmite, através do sistema de alavancas, ao mecanismo registrador. Deste modo, se obtém um gráfico através do qual torna-se possível a determinação dos valores diários do fluxo de radiação solar global incidente.

Os valores diários do fluxo de radiação solar incidente, pertinentes a área em estudo, foram obtidos para todo o período relativo a este trabalho.

2.4.2 Precipitação Pluviométrica Diária

As alturas diárias de precipitação pluviométrica foram medidas através de um pluviômetro, tipo Ville de Paris com precisão da ordem de $\pm 0,1$ mm.

O valor correspondente da altura da precipitação pluviométrica diária é obtida pela medida da quantidade de água armazenada durante o intervalo de tempo de 24 h. Essa medida é feita com o auxílio de uma proveta graduada em milímetros e décimos de milímetro.

Com o objetivo de minimizar os erros de medida, cuidados especiais são tomados, tais como a locação do pluviômetro em lugar aberto e a uma altura de 1,20 m sobre o solo.

Durante todo o período concernente a este trabalho, foram obtidos os valores diários da precipitação pluviométrica na área em estudo.

3. RESULTADOS DAS MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

3.1 Introdução

A determinação de valores precisos de condutividade térmica é de importância fundamental para o pleno desenvolvimento de qualquer estudo acerca do estado e comportamento do fluxo de calor em determinada área. Isto, obviamente, dado ao fato de que o fluxo geotérmico pode ser definido pelo produto dos parâmetros gradiente e condutividade térmicas representativos da área em estudo (Beck, 1965; Smith, 1973; e outros).

As medidas de condutividade térmica, efetuadas em laboratório, podem ser realizadas utilizando-se técnicas diferentes tanto do estado estacionário quanto do transiente de fluxo. O aparato tipo agulha constitui um dos sistemas mais usados e precisos para medidas de condutividade térmica, via método do estado transiente, enquanto que o aparato tipo barra dividida constitui um dos sistemas mais usados e precisos para medidas desse parâmetro físico, via método do estado estacionário. Conforme Von Herzen e Maxwell (1959), medidas de condutividade térmica efetuadas sobre as mesmas amostras, utilizando-se os sistemas dos estados transiente e estacionário acima mencionados, apresentam resultados que diferem entre si em apenas cerca de 3%.

As medidas de condutividade térmica constantes no presente trabalho foram realizadas via método transiente, utilizando-se o aparato acima mencionado. Embora contássemos com ambos os aparatos citados, nossa escolha por aquela técnica deveu-se fundamentalmente, ao baixo grau de consolidação das amostras medidas.

3.2 Valores de Condutividade Térmica Obtidos dos Testemunhos de Sondagem

Durante a execução do presente trabalho fo

ram realizadas medidas de condutividade térmica em 94 amostras representativas da litologia de três furos localizados na área metropolitana de Belém. Todas as amostras analisadas foram retiradas de testemunhos de sondagem. As amostras apresentaram forma cilíndrica, com 10,0 cm de altura e 2,0 cm de raio.

O valor medido de condutividade térmica depende mensuravelmente, do conteúdo e qualidade do fluido existente na amostra analisada. Devido a este fato, os testemunhos de sondagem, logo que obtidos, foram acondicionados em sacos de plástico, protegidos contra a insolação direta e em poucas horas transportados para sala mantida a temperatura ambiente da ordem de 24 °C. O intervalo de tempo decorrido entre a obtenção dos testemunhos, no campo, e a realização das respectivas medidas de condutividade térmica, em laboratório, foi de cinco a oito horas. Tais procedimentos tiveram como finalidade minimizar o efeito de evaporação do fluido contido nas amostras.

A seguir apresentaremos os resultados concernentes aos três furos medidos, cuja localização é mostrada na figura 3.1.

3.2.1 Furo (1)

Este furo foi executado, fundamentalmente, para a coleta do material geológico destinado ao estudo de condutividade térmica.

A profundidade atingida foi de 30 m, com diâmetro de 10 cm.

A descrição litológica do material amostrado é apresentada no anexo A.1.

Foram realizadas medidas de condutividade térmica

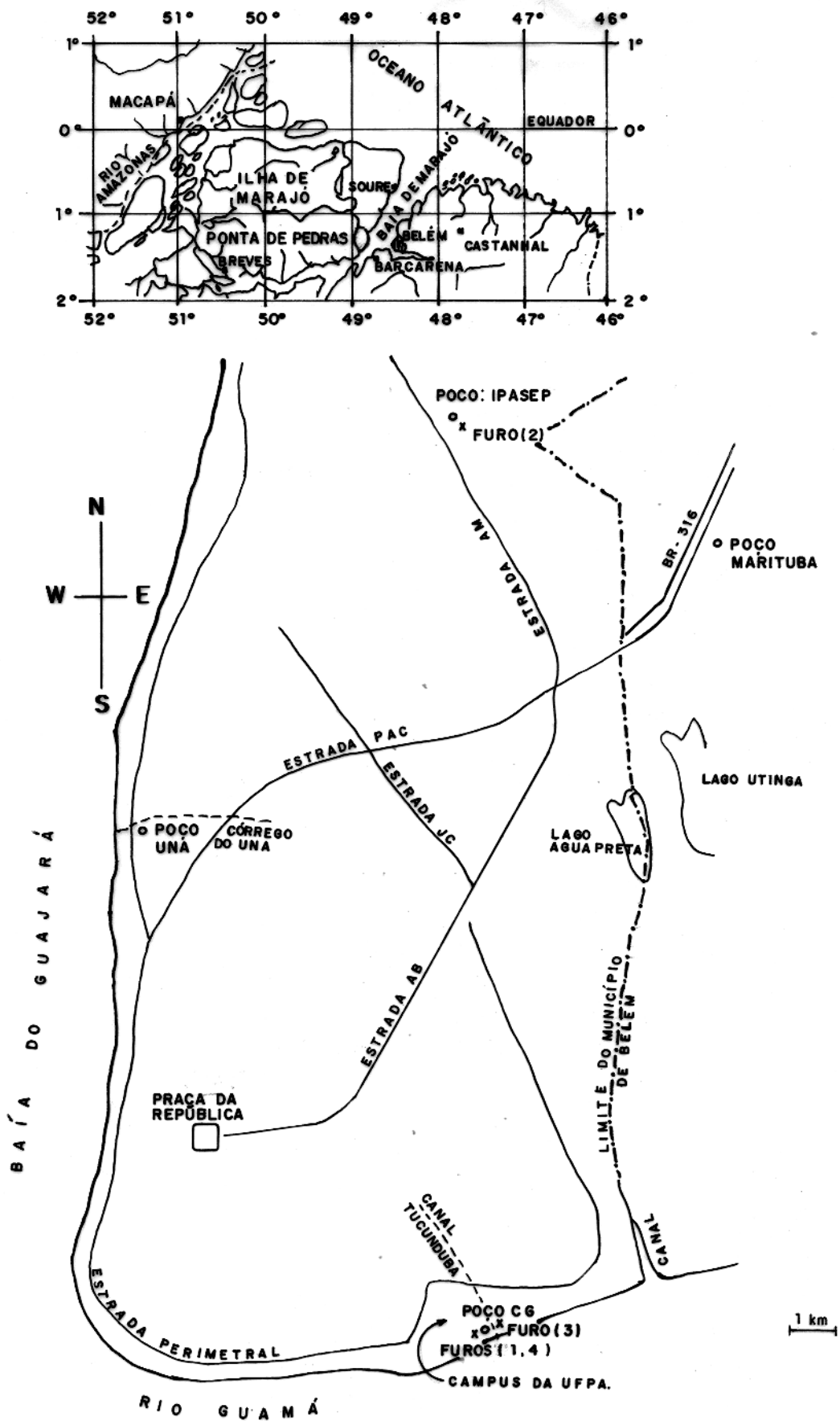


FIGURA : 3.1 - DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS CG, IPASEP, UNA E MARITUBA E DOS FUROS (1) A (3) NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM.

mica em trinta e sete amostras representativas da litologia do Furo (1), cujos resultados são apresentados na tabela 3.1 e figura 3.2.a.

Fato interessante a ser observado na figura 3.2.a refere-se às bruscas mudanças nos valores de condutividade térmica em um curto intervalo de profundidade. Isto, a princípio, nos sugere que a zona amostrada seja constituída de inúmeras camadas com material geológico diferente. Entretanto, observando a descrição litológica deste furo, constante no anexo A.1, verificamos que a zona em estudo é composta, preponderantemente, de material argilo arenoso, havendo, alternadamente, predominância ora de uma camada mais argilosa, ora de uma camada mais arenosa. Este fato explica as bruscas mudanças dos valores da condutividade térmica observadas na figura 3.2.a, como também a distribuição desse parâmetro físico em torno de determinados valores médios, pois o mesmo tipo de material geológico ocorre em diferentes intervalos de profundidade.

Outro fato interessante na figura 3.2.a refere-se a certos intervalos de profundidade em que a feição do gradiente de condutividade térmica nos sugere que há uma mudança litológica gradativa. A feição mais marcante é a constante no intervalo de profundidade de 13,6 a 18,0 m; há outras feições situadas entre 11,2 a 12,8 m, 21,0 a 22,5 m e 28,0 a 30,0 m. Entretanto, analisando a descrição litológica desses intervalos de profundidade verificamos que não há mudança gradativa do material geológico amostrado e sim, mudança brusca. Os valores intermediários são então explicados pela presença de milimétricos níveis de areia fina inclusos em uma matriz fundamentalmente argilosa ou a presença de níveis milimétricos de argila em uma matriz preponderantemente arenosa. Em outros intervalos de profundidade nos quais não se observa a presença dos níveis acima citados, os valores medidos de condutividade térmica indicam nitidamente o tipo do material geológico correspondente, ou seja, preponderantemente argiloso ou arenoso. Um exemplo disto constitui a distribuição dos valores de con

Tabela: 3.1 - Medidas de Condutividade Térmica Referentes aos Furos (1), (2) e (3).

FURO(1)		FURO(2)		FURO(3)	
Z (m)	λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Z (m)	λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)	Z (m)	λ (W.m ⁻¹ .°C ⁻¹)
0,7	1,21	0,5	2,23	0,0	3,15
1,2	1,70	1,0	2,31	0,45	2,19
1,7	2,77	1,5	1,83	1,0	2,54
2,2	2,43	2,0	1,25	1,8	1,27
2,7	1,12	2,5	1,71	2,5	1,33
3,2	1,43	3,0	1,31	3,2	1,27
3,8	1,36	3,5	1,23	4,0	1,14
4,2	1,04	4,0	1,38	4,5	1,11
5,0	1,08	4,25	1,48	5,3	1,11
5,8	1,11	5,0	1,64	6,1	1,08
6,5	1,26	5,5	1,75	6,8	1,12
7,3	1,17	6,0	2,06	7,8	1,02
8,0	1,04	6,5	1,92	8,5	1,06
8,8	1,09	6,75	1,31	9,5	1,00
9,6	1,11	7,25	1,54	10,5	0,95
10,4	1,11	8,5	2,25	11,5	1,71
11,2	1,87	9,5	2,46	13,0	1,19
12,0	1,64	10,5	1,71	14,0	2,02
12,8	1,29	11,5	1,51	15,0	2,19
13,6	2,62	12,5	1,57	16,0	1,38
14,4	1,97	13,5	2,46	17,0	1,36
15,2	2,13	14,5	1,16		
16,5	1,57	15,5	1,92		
18,0	1,38	16,5	1,97		
19,0	2,32	17,5	1,83		
20,0	2,54	18,5	1,97		
21,0	1,38	19,5	1,92		
22,0	1,92	20,5	2,07		
22,5	2,32	21,5	1,79		
23,0	1,33	22,5	1,48		
24,0	2,81	23,5	2,19		
25,0	1,10	24,5	2,81		
26,0	1,25	25,5	1,51		
27,0	1,21	26,5	1,79		
28,0	2,25	27,5	1,41		
29,0	1,36	28,5	2,31		
30,0	1,13				

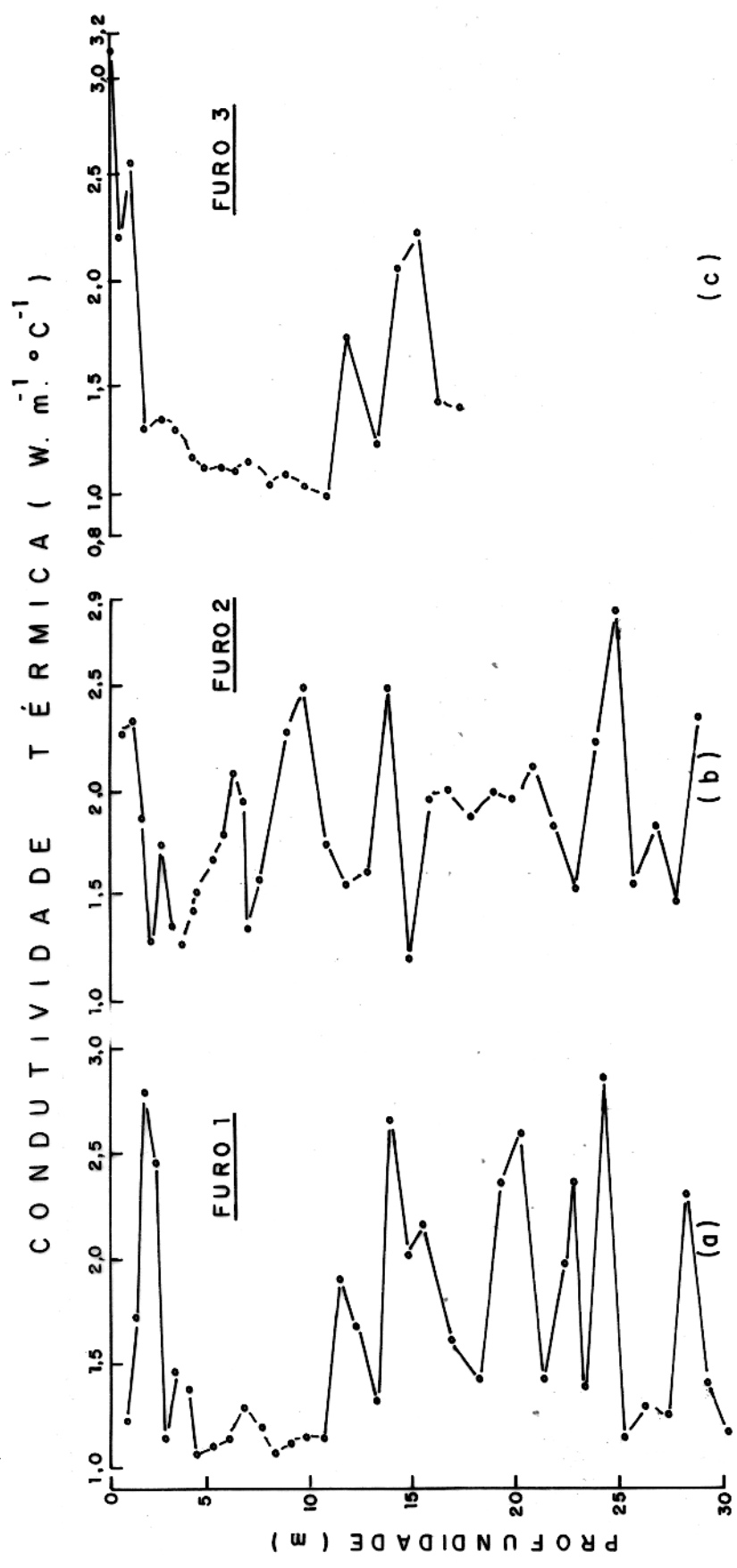


FIGURA : 3.2 - MEDIDAS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA REFERENTES AOS Furos "1" A "3"

utividade térmica no intervalo de profundidade de 2,7 a 10,4 m, cujo material geológico existente é fundamentalmente argiloso. Outro exemplo similar representa o intervalo de profundidade de 25,0 a 27,0 m.

Um outro fato de real importância é a presença de concreções ferruginosas distribuídas aleatoriamente no material geológico amostrado. Tais concreções de tamanho milimétrico a centimétrico, forma arredondada, apresentam uma matriz constituída de areia fina a grossa cimentada com óxido de ferro. Devido ao tipo de material constituinte e, ainda, ao grau de cimentação, a presença dessas concreções em determinada amostra provoca um aumento no valor de condutividade térmica da mesma. Assim sendo, alguns valores constantes na tabela 3.1 e figura 3.2.a os quais poderiam ser interpretados como representativos de uma amostra constituída de material argilo arenoso, em verdade representam uma amostra formada essencialmente de material argiloso enriquecido de concreções ferruginosas. Como exemplo, citamos os valores de condutividade térmica registrados a profundidades de 11,2 e 15,2 m, ou seja, 1,87 e 2,13 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, respectivamente. A influência dessas concreções é, entretanto, mais espetacular quando inseridas em uma camada que seja basicamente arenosa. Nestes casos o valor resultante de condutividade térmica medida sobre uma amostra representativa desta camada será mensuravelmente elevado. Como exemplos, apresentamos os valores de condutividade térmica concernentes às profundidades de 13,6 e 24,0 m, ou seja, 2,62 e 2,81 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, respectivamente.

Tomando como base a descrição litológica contida no anexo A.1 e a distribuição dos valores de condutividade térmica mostrada na figura 3.2.a, podemos considerar que, para o Furo (1), as camadas preponderantemente argilosas apresentam valores de condutividade térmica variando entre 1,04 a 1,26 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, enquanto que as camadas essencialmente arenosas são caracterizadas por valores de condutividade térmica variando entre 2,13 a 2,54 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Os valores intermediários a essas faixas de variações, como os superiores a 2,54 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, são

explicados conforme já mencionado. As faixas de variações dos valores de condutividade térmica, relativas ao Furo (1), estão em acordo com outras obtidas por diferentes autores, como por exemplo: Marangoni e Hamza (1983) obtiveram para amostras sedimentares arenosas o valor médio de $2,09 \pm 0,21 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$; Astier (1975) obteve para amostras argilosas valores variando de 0,84 a $1,25 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e para amostras arenosas uma série de valores que variam entre 1,67 a $2,51 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Heiland (1940) obteve para material argiloso valores variando entre 1,05 a $1,46 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, enquanto que para material arenoso obteve valores de até $3,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

Obteve-se para o Furo (1) um valor médio de condutividade térmica da ordem de $1,61 \pm 0,55 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

3.2.2 Furo (2)

Este furo foi programado com o objetivo de apenas coletar testemunhos de sondagem a fim de possibilitar a continuidade dos trabalhos acerca da condutividade térmica na área em estudo.

A profundidade máxima atingida foi por volta de 29 m, tendo este furo sido perfurado com diâmetro em torno de 6 cm.

A descrição litológica dos testemunhos de sondagem amostrados é apresentada no anexo A.2.

Do material geológico coletado foram retiradas 36 amostras sobre as quais foram realizadas as medidas de condutividade térmica. Os resultados destas medidas são apresentados na tabela 3.1 e figura 3.2.b.

Na figura 3.2.b observamos que os valores de condutividade térmica estão distribuídos entre 1,16 a 2,81

$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$. Este intervalo de variação é quase que o mesmo con
cernente ao Furo (1), ou seja, de 1,04 a 2,81 $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$. Por
este fato, adicionado ao aspecto da figura 3.2.b e, ainda, a
descrição litológica contida no anexo A.2, podemos afirmar que
o material geológico constituinte do Furo (2) é do mesmo tipo
do coletado no Furo (1), ou seja, fundamentalmente argilo are
noso. Por esses mesmos fatos podemos também afirmar que no
Furo (2), assim como no Furo (1), há uma alternância de cama
das ora essencialmente argilosas, ora preponderantemente areno
sas ou, ainda, com valores próximos de areia e argila.

Outro aspecto interessante observado na figu
ra 3.2.b, e ratificado pelo anexo A.2, é que neste furo há in
tervalos de profundidade os quais podem ser caracterizados por
uma evidente gradação litológica. Estes intervalos de profundi
dade são de 3,5 a 6,0 m, de 6,75 a 9,5 m e de 11,5 a 13,5 m,
onde os valores de condutividade térmica variam de 1,23 a 2,06,
de 1,31 a 2,46 e de 1,51 a 2,46 $W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$, respectivamente .
Em todos estes casos a gradação litológica ocorre de uma cama
da essencialmente argilosa para uma arenosa.

No intervalo de profundidade compreendido de
15,5 a 20,5 m podemos observar uma feição bastante interessan
te em relação a distribuição dos valores de condutividade tér
mica. Este intervalo de profundidade representa, apenas pela
análise da figura 3.2.b, uma camada areno argilosa. Entretan
to, pela análise litológica, constante no anexo A.2, trata - se
de uma camada essencialmente argilosa com pequena porção de
areia, porém, com elevada quantidade de concreções ferruginosas.
Verificamos, mais uma vez, a mensurável influência de tais con
creções quando presentes em determinada camada geológica, au
mentando significativamente o valor de condutividade térmica
representativo da mesma. Feições semelhantes também foram ob
servadas quando da análise do Furo (1). Assim sendo, ratifica
mos a importância da descrição litológica das amostras usadas
para a realização das medidas de condutividade térmica, pois,
somente assim, torna-se possível efetivar-se um estudo eficien
te acerca do comportamento de condutividade térmica ao longo

de um furo. A fim de ratificar esta ponderação, apresentamos a distribuição dos valores de condutividade térmica referentes a profundidade de 2,5 e 28,5 m e ao intervalo de 22,5 a 24,5 m. Em todas estas profundidades, conforme o anexo A.2, o material geológico predominante é do tipo argiloso, porém, ocorre a presença de concreções. No intervalo de profundidade de 22,5 a 24,5 m há, apenas com a análise da figura 3.2.b, inclusive indicação de uma gradação litológica de uma camada argilosa para outra arenosa. O maior valor de condutividade térmica registrado na figura 3.2.b, $2,81 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, a profundidade de 24,5 m, também é um valor fortemente aumentado devido a presença de concreções.

Embora a litologia dos Furos (1) e (2) seja essencialmente argilo arenosa; conquanto os valores de condutividade térmica de ambos os furos estejam distribuídos quase que no mesmo intervalo de variação, e, ainda, embora o Furo (1) contenha maior quantidade de areia em relação ao Furo (2), este apresentou valores mais elevados de condutividade térmica. Aliás, dos três furos em que realizamos medidas deste parâmetro físico, o maior valor médio foi obtido para o Furo (2), $1,81 \pm 0,39 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Isto é explicado pelo fato de que dos três furos estudados, este foi o que apresentou a maior quantidade e distribuição de concreções.

3.2.3 Furo (3)

Este furo foi perfurado com dois objetivos distintos, quais sejam: a obtenção de amostras litológicas necessárias para intensificarmos o estudo sobre condutividade térmica e, adicionalmente, acondicionar três termistores, a diferentes profundidades, a fim de possibilitar a realização de um estudo sobre geotermia rasa.

A profundidade máxima atingida foi de aproximadamente 17 m.

A descrição litológica dos testemunhos de sondagem oriundos deste furo é apresentada no anexo A.3.

Dos testemunhos de sondagem foram selecionadas 21 amostras sobre as quais foram realizadas as medidas de condutividade térmica. Os resultados destas medidas são mostrados na tabela 3.1 e figura 3.2.c.

Uma das feições bastante interessante a ser observada na figura 3.2.c, concerne ao pacote sedimentar situado entre 1,8 a 10,5 m de profundidade, onde os valores de condutividade térmica decrescem sistematicamente de 1,27 a 0,95 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. A magnitude destes valores nos indica que trata-se de um pacote constituído de material essencialmente argiloso. Pelo decréscimo sistemático dos valores de condutividade térmica, ao longo desse intervalo de profundidade, podemos considerar que a quantidade de argila aumenta com o acréscimo da profundidade. A descrição litológica apresentada no anexo A.3 confirma as duas considerações feitas acerca da litologia desse pacote sedimentar. Fato importante a ressaltar é que essas considerações podem, então, ser obtidas apenas com a análise da figura 3.2.c, ou seja, há perfeita correlação entre o valor de condutividade térmica e o tipo litológico principal correspondente. Entretanto, verifica-se que essa correlação não é observada às profundidades de 11,5, 14,0 e 15,0 m, onde os valores de condutividade térmica indicam tratar-se de material essencialmente arenoso, enquanto que pela descrição litológica trata-se de material fundamentalmente argiloso, porém, com a presença de concreções ferruginosas. Mais uma vez observamos que a presença de tais concreções aumenta consideravelmente o valor de condutividade térmica do material geológico no qual elas encontram-se incrustadas. O exemplo mais proeminente, dentre todos aqueles oriundos da análise deste estudo acerca da condutividade térmica, refere-se ao valor deste parâmetro físico próximo a superfície. Conforme descrito no anexo A.3, o material ali existente constitui um arenito cuja matriz é composta de areia média a fina cimentada com óxido de ferro. Sobre uma amostra deste material é que obteve-se o maior valor de condutividade térmica concernente ao presente estudo, ou seja, 3,15 $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Este valor, embora elevado em relação aos outros valores medidos, está no entanto, perfeitamente de acordo com valores de condutividade térmica obtido por ou-

tros autores sobre amostras de arenito, a saber: Sharma (1976) obteve valores de até $3,2 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ enquanto que Heiland (1940) obteve resultados de até $3,4 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

Assim sendo, com base nas análises referentes a este furo e, adicionalmente, aos Furos (1) e (2), podemos considerar que: a presença de concreções em uma camada constituída de material essencialmente argiloso ou arenoso, implica em um aumento considerável do valor de condutividade térmica atinente a esta camada.

Os valores de condutividade térmica relativos a este furo, exceto o correspondente a superfície, estão distribuídos entre 0,95 a $2,54 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. O valor médio obtido para o Furo (3) é de $1,49 \pm 0,58 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

Dos três furos estudados este foi o que apresentou o menor intervalo de variação dos valores de condutividade térmica, como também, o menor valor médio deste parâmetro físico. Também se deve destacar que, dentre os três furos citados, conforme o anexo A, o Furo (3) foi o que apresentou o maior teor de argila.

O valor médio de condutividade térmica referente as 94 amostras oriundas desses três furos foi de $1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

3.3 Valor Médio de Condutividade Térmica Para a Área em Estudo

De posse dos testemunhos de sondagem foi possível tanto a confecção de amostras, as quais foram utilizadas para medidas de condutividade térmica, como a descrição litológica desses furos.

Seria interessante a obtenção de testemunhos de sondagem relativos a outros locais situados na área em estudo,

pois assim, além de ampliarmos a representatividade da amostragem, poderíamos com os resultados concernentes, ratificar ou retificar as análises já realizadas. Entretanto, devido aos custos operacionais envolvidos, difícil se torna a perfuração de outros tantos furos quanto desejado. Uma maneira de minimizar tal problema consiste na realização de perfilagem de raios- γ em poços já perfurados para outras finalidades. Através de análise desses perfis é possível, em princípio, a obtenção da descrição litológica dos poços perfilados (Heiland, 1940; Jakosky, 1940; Pirson, 1963; Schlumberger, 1972; Telford et al, 1976). Assim sendo, embora sem a coleta de testemunhos de sondagem, é possível a elaboração de uma descrição detalhada acerca dos diferentes tipos de material geológico existente e, ainda, como eles estão distribuídos ao longo do poço. Consequentemente, a partir dessa descrição litológica e, adicionalmente, conhecendo-se os valores médios de condutividade térmica de cada tipo de material existente nesta descrição, é possível estimar-se o comportamento deste parâmetro físico ao longo do poço em questão.

Foram realizadas perfilagens de raios- γ em 4 poços (CG, IPASEP, MARITUBA e UNA) os quais estão distribuídos na área em estudo, segundo mostra a figura 3.1. Em base na análise dos perfis de raios- γ podemos considerar que a área em estudo, no intervalo de profundidade referente ao presente trabalho, é constituída fundamentalmente de argila e areia. Podemos também considerar que esta área é caracterizada pela intercalação de camadas ora essencialmente argilosas, ora preponderantemente arenosas, ou, ainda, ora com valores aproximados de argila e areia, conforme mostram as figuras 3.3 e 3.4. Essas considerações são totalmente ratificadas pelas análises dos perfis de resistividade e de potencial espontâneo e, ainda, pela descrição litológica baseada em amostras de calha referentes aos poços UFPA N°1, MPEG e BRA. O poço UFPA N°1, de profundidade de 255 m, está situado a 800 m do poço CG. O poço MPEG, com profundidade de 120 m e o poço BRA, de profundidade de 201 m, estão locados próximo ao centro da área em estudo. Ainda podemos ratificar as supra mencionadas considerações, através da descrição litológica fundamenta-

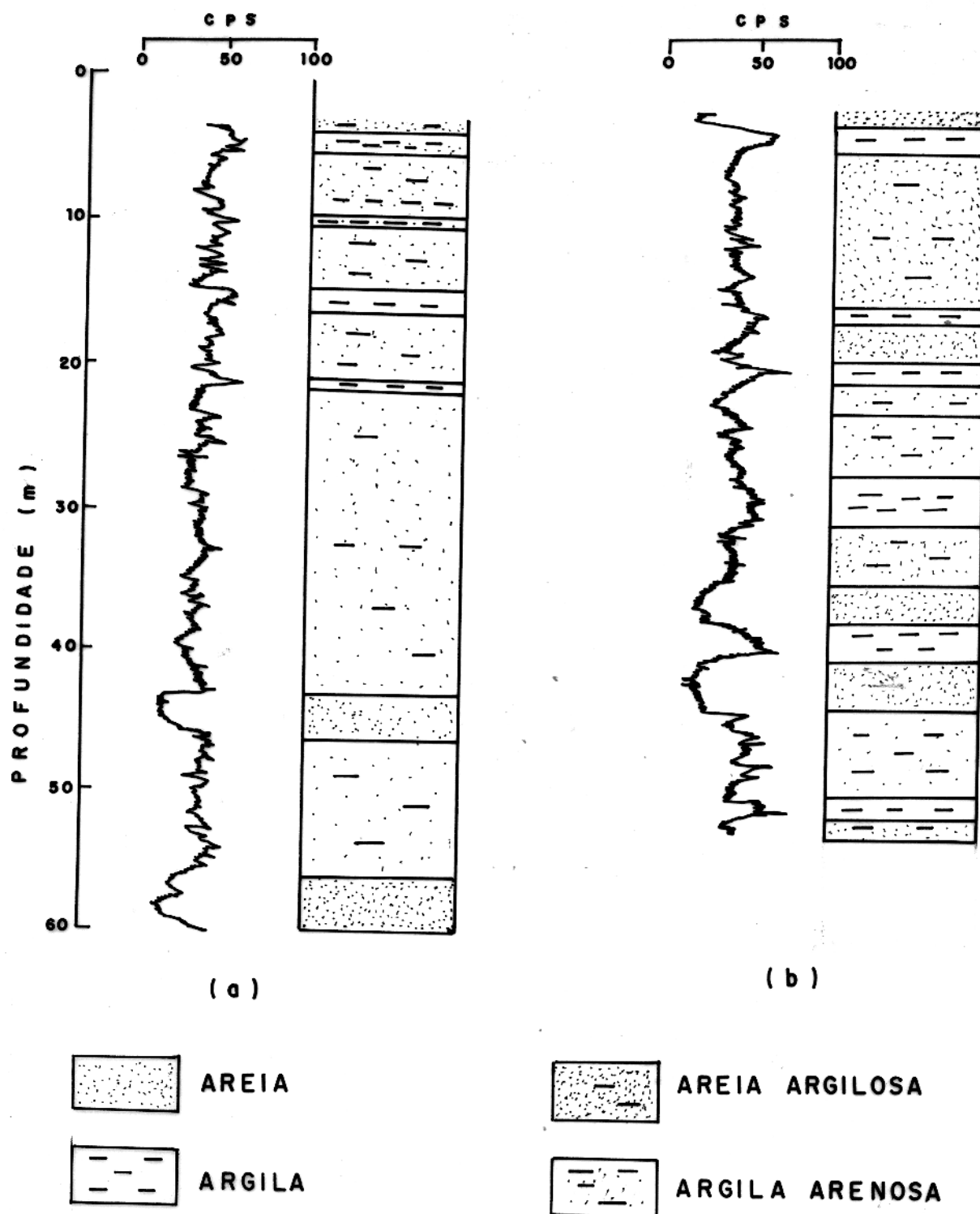


FIGURA : 3.3 - PERFIS DE RAIOS- γ E LITOLÓGICO CORRESPONDENTES AOS POÇOS ① IPASEP E ② C.G.

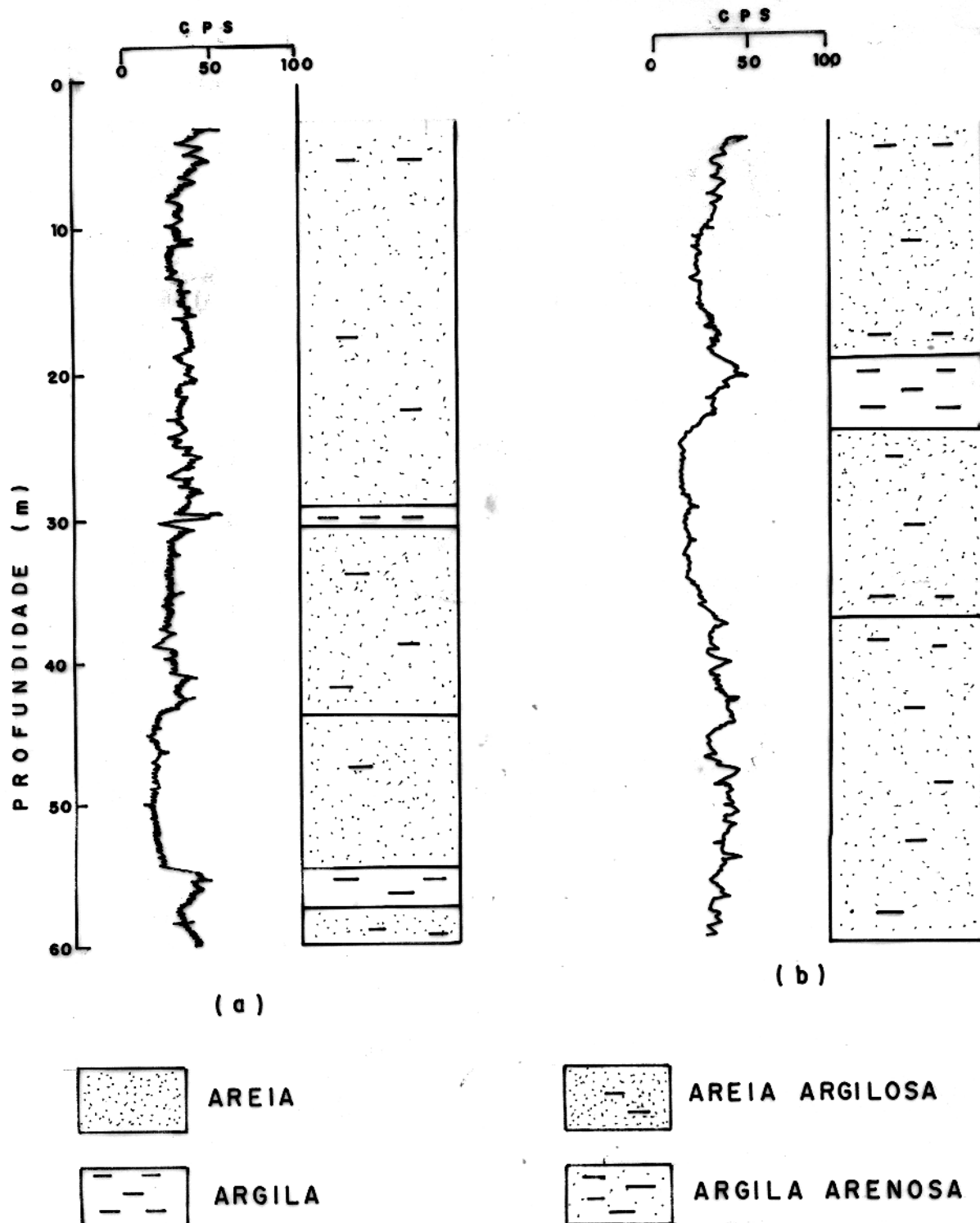


FIGURA : 3.4 - PERFIS DE RAIOS- γ E LITOLÓGICO CORRESPONDENTES AOS POÇOS (a) UNA E (b) MARITUBA.

da em amostras de calha oriundas de quinze poços perfurados para exploração de água subterrânea na região metropolitana de Belém (Relatórios internos da Geoser Perfurações e Sondagens Ltda).

As descrições litológicas dos poços estudados, perfurados até a profundidade de 270 m, baseadas tanto em análises dos perfis de raios- γ , resistividade e potencial espontâneo e, ainda, na descrição de amostras de calha, confirmam as considerações acima efetuadas, quais sejam:

- a. até a profundidade alcançada, a área em estudo é constituída essencialmente de material argilo arenoso;
- b. a área em estudo é caracterizada pela intercalação de camadas ora fundamentalmente arenosas, ora preponderantemente argilosas, ou ora com teores próximos de areia e argila.

É importante ressaltar que as descrições litológicas, baseadas em amostras de calha, informam sobre a presença de concreções ferruginosas nas camadas situadas no topo dos poços e, também, a existência de "concreções de arenito branco a creme" a maiores profundidades. Os relatórios da Geoser Perfurações e Sondagens Ltda registram a presença de tais concreções até a profundidade de 220 m. A descrição litológica referente ao poço UFPA-Nº 1 mostra a sua presença até o assadinho do mesmo. A descrição do poço MPEG informa que observa-se tais concreções somente até a profundidade em torno de 76 m. No poço BRA foi verificado a presença de concreções até a profundidade de 185 m.

Ressaltamos, ainda, que a intercalação de camadas, conforme especificado no item b acima, é perturbada pela presença de camadas com elevada quantidade de calcário, quando o poço atinge profundidades em que ocorre a Formação Pirabas. Na área em estudo, esta Formação encontra-se a profundidades superiores a 75 m (Werner Truckenbrodt, 1978 - Comunicação Oral).

Por esses fatos podemos inferir que o valor médio de condutividade térmica atinente a 94 amostras oriundas dos Furos (1) a (3), $1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$, pode ser considerado como o valor médio deste parâmetro físico na área em estudo.

A princípio, tomando apenas como base a descrição litológica pertinente a cada poço estudado, poderíamos até delinear o perfil referente a distribuição dos valores de condutividade térmica ao longo destes poços. Entretanto, para a área em estudo, consideramos que tal perfil será fortemente influenciado pela presença de concreções, as quais estão distribuídas aleatoriamente ao longo de diversas camadas. Tais concreções, repetimos, aumentam mensuravelmente o valor de condutividade térmica do material no qual elas encontram-se incrustadas. A determinação da profundidade exata em que ocorrem tais concreções, torna-se bastante difícil sem a existência de testemunhos de sondagem, ou seja:

- I. pela análise em amostras de calha, a profundidade inferida pode não ser verdadeira, pelo fato de ser possível que concreções posicionadas a profundidades distintas possam ser arrancadas e conduzidas ao mesmo instante à boca do poço pelo fluido refrigerador da broca perfuratriz;
- II. pelas perfilagens geofísicas aplicadas, a pequena quantidade envolvida e o diminuto tamanho de tais concreções dificultam bastante a sua detecção.

Consideramos que, devido a presença das concreções ferruginosas não é possível esboçar a distribuição dos valores de condutividade térmica ao longo do poço, apenas com a descrição litológica da área em estudo, estimada segundo as análises das perfilagens geofísicas e das amostras de calha. A fim de ratificarmos esta ponderação, tentamos comparar a distribuição dos valores de condutividade térmica, obtidos através de medidas diretas sobre testemunhos de sondagem, com a distribuição dos valores deste parâmetro físico, obtido indireta -

mente através da descrição litológica baseada nos perfis de raios- γ . Isto, em virtude de contarmos tanto com os testemunhos de sondagem como com os perfis- γ referentes aos poços CG e IPASEP. Tal comparação, no entanto, não foi possível dado ao fato de que por ocasião da obtenção dos perfis- γ , tais poços já se encontravam com tubos de revestimento. Após análise detalhada, verificamos que o perfil- γ concernente a um poço revestido registra muito bem as zonas arenosas porém, seu registro é fortemente atenuado nas zonas argilosas. A comparação dos perfis- γ referentes ao poço BRA, efetuados antes e após seu revestimento, mostrou que a atenuação do sinal obtido em zonas argilosas é de cerca de até 50%, enquanto que a atenuação deste sinal foi insignificante em zonas arenosas. Assim sendo, não foi possível lograr o escopo desta atividade.

3.4 Conclusões

Foram realizadas medidas de condutividade térmica em 94 amostras representativas dos testemunhos de sondagem oriundos de três furos programados, fundamentalmente, para este escopo. As medidas foram efetuadas usando-se o aparato tipo agulha que constitui um dos sistemas mais usados e precisos do método do estado transiente.

O Furo (1) apresentou um valor médio de condutividade térmica de $1,61 \pm 0,55 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. O Furo (2) registrou um valor médio de $1,81 \pm 0,39 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$; enquanto que o Furo (3) apresentou o valor médio de $1,49 \pm 0,58 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. Para as 94 amostras envolvidas, obteve-se o valor médio de condutividade térmica da ordem de $1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

Com base na feição gráfica representativa dos valores medidos de condutividade térmica e no intervalo de variação destes, consideramos que os três furos em questão são constituídos do mesmo tipo de material litológico. Esta consideração é corroborada pela descrição litológica dos testemunhos de sondagem. Desta descrição consideramos ainda, que os furos estão locados em uma área preponderantemente argilo arenosa.

sa, sendo constituída por uma intercalação de camadas ora essencialmente arenosas, ora preponderantemente argilosas ou ora com teores aproximados de areia e argila. Tais considerações são ratificadas pelas análises dos perfis de raios- γ referentes a 4 poços, perfis de resistividade e potencial espontâneo relativos a 2 poços e, ainda, a descrição litológica baseada em amostras de calha atinentes a quinze poços. Em virtude disto, o valor médio de condutividade térmica concernente as 94 amostras oriundas dos testemunhos de sondagem, ou seja, $1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, é considerado como o valor médio de condutividade térmica correspondente a região metropolitana de Belém.

Verificou-se, frequentemente, uma excelente correlação entre o valor de condutividade térmica e o tipo principal de material geológico correspondente. Entretanto, para a área em estudo, tal correlação não é observada em diversos intervalos de profundidade. Isto é perfeitamente explicado pela presença, nestes intervalos, de concreções constituídas essencialmente de areia grossa a fina cimentada com óxido de ferro. Devido ao tipo de material constituinte destas concreções, como também ao grau de consolidação das mesmas, elas provocam um aumento substancial nos valores de condutividade térmica das camadas nas quais encontram-se incrustadas de forma aleatória. Devido a presença de tais concreções não consideramos adequado, para a área em estudo, traçar-se o perfil da distribuição dos valores de condutividade térmica baseado na descrição litológica elaborada segundo as análises dos perfis geofísicos realizados e amostras de calha.

4. GEOTERMIA PRÓXIMO À SUPERFÍCIE

4.1 Introdução

Até o início do presente trabalho, os estudos geotérmicos realizados na região metropolitana de Belém eram baseados, apenas, em observações com termômetros de mercúrio efetuidas até a profundidade de 1 m. Todavia, a geotermia extensiva a maiores profundidades pode constituir-se em um importante fator para os estudos sobre o intemperismo das rochas e mudanças microclimáticas, principalmente, quando a cobertura vegetal superficial é removida. Com esta preocupação ambiental, demos início a um programa de monitoramento térmico do solo e subsolo utilizando o Furo (3) e o Poço (CG), separados por cerca de 500 m e distantes em torno de 400 e 200 m, respectivamente, da margem do rio Guamã (ver figura 3.1). Ambos localizam-se na borda da cidade de Belém e no interior do campus da Universidade Federal do Pará, o qual tem mais de cinquenta hectares não pavimentados e com vegetação esparsa.

Durante a execução deste trabalho, as medidas de temperatura, no intervalo de profundidade de 0,02 a 0,5 m foram realizadas através de uma bateria de termômetros de mercúrio. A partir de 1,0 m de profundidade os registros de temperatura foram efetuados utilizando-se termômetros de termistor.

Tem sido frequentemente registrado na literatura que as influências geotermiais, devido ao aquecimento solar diário na superfície, são fortemente atenuadas com o aumento da profundidade e podem ser desprezadas a profundidades da ordem de 1,0 m (Carslaw e Jaeger, 1959; Jaeger, 1965; Kézdi, 1974; Sellers, 1974; Courtillot e Francheteau, 1976). Estes autores indicam, também, que as variações térmicas sazonais podem atingir profundidades em torno de 30 m; entretanto, é importante ressaltar que seus estudos não foram conduzidos em áreas localizadas no trópico úmido. As observações da temperatura a 1,0 m de profundidade, na área escolhida, indicaram mudanças diárias consideráveis; este fato encorajou a extensão

do programa de monitoramento térmico a maiores profundidades . Os perfis de temperatura obtidos no Furo (3) foram acoplados aos perfis geotérmicos determinados no Poço (CG); isto foi possível devido a similaridade litológica de ambos, como também no que se refere a cota, nível freático e condições meteorológicas.

4.2 Condições Climatológicas da Região em Estudo

O fluxo de radiação solar incidente na superfície terrestre é parcialmente absorvido pelos materiais sólidos ou líquidos, resultando no aquecimento dessa superfície. A eficiência na transferência de calor para as camadas mais profundas depende, fundamentalmente, da amplitude das variações de temperatura na superfície, do índice de precipitação pluviométrica, do período de insolação, da cobertura vegetal superficial, da distribuição vertical da difusividade térmica e da perda de energia da superfície (através da radiação, fluxos de calor latente e sensível) para a atmosfera.

A região em estudo apresenta um regime pluviométrico bem definido, com a estação chuvosa ocorrendo entre os meses de janeiro e maio e a estação "seca" entre os meses de julho e novembro. Este regime tem apresentado apenas pequenas variações durante os últimos 80 anos de observações (Brasil, Ministério da Agricultura, 1968; Cunha e Bastos, 1973; Souza et al, 1984). O regime pluviométrico em questão é fortemente controlado pela presença da Zona de Convergência Intertropical (ITCZ) que passa periodicamente sobre esta região. As distribuições das médias mensais de pluviosidade atinentes aos períodos de 1896 a 1922 (Cunha e Bastos, 1973), de 1931 a 1960 (Brasil, Ministério da Agricultura, 1968) e a correspondente a este trabalho, ou seja, de março/85 a fevereiro/86, são mostradas na figura 4.1.a. Os valores diários medidos da precipitação pluviométrica, para o período relativo a este trabalho, estão listados na tabela B.1.

A figura 4.1b mostra a distribuição da normal climatológica referente às médias mensais da insolação du

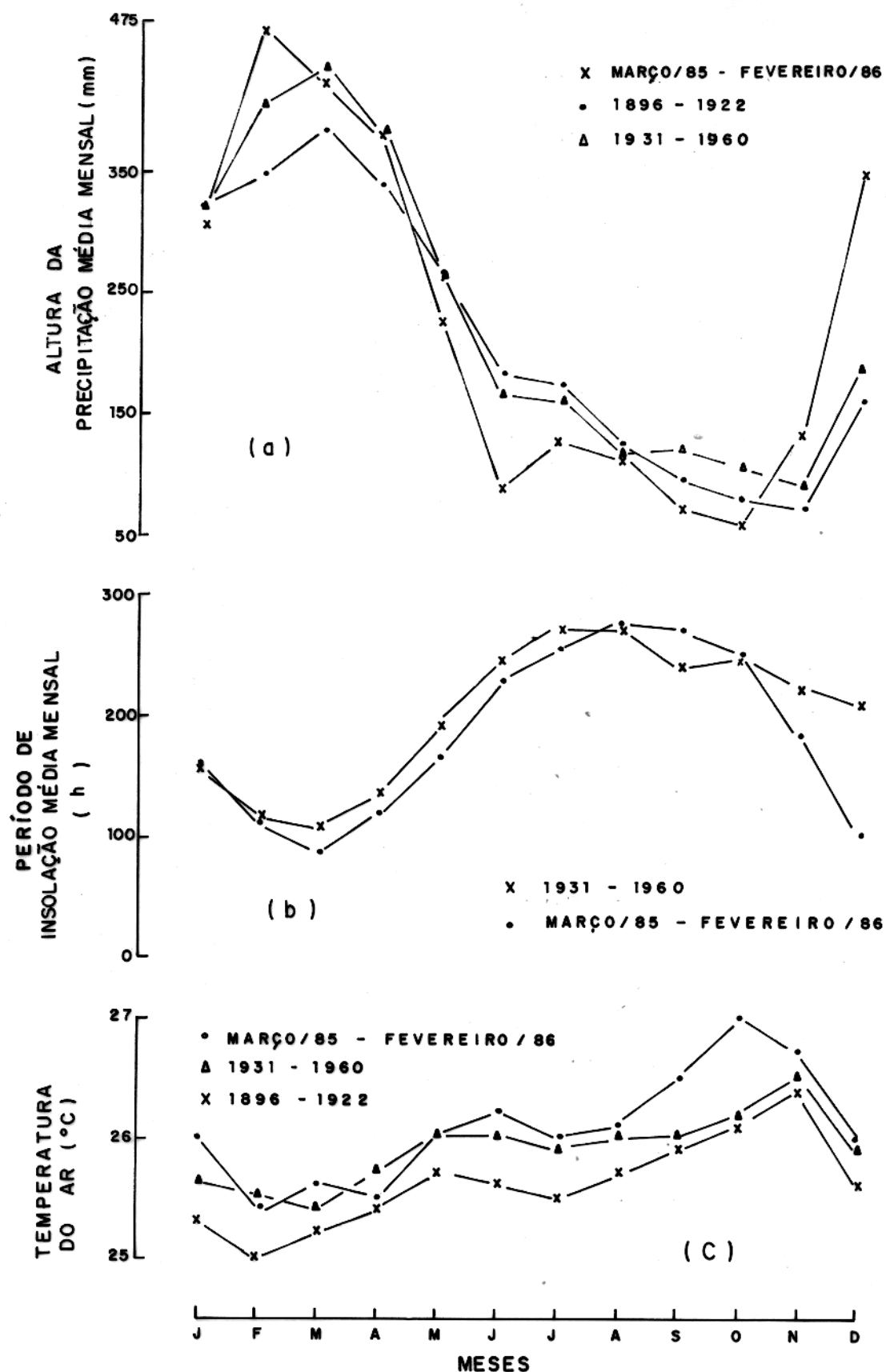


FIGURA 4.1 - DISTRIBUIÇÃO DAS MÉDIAS MENSALIS (ATINENTES AOS PERÍODOS DE 1896 A 1922, 1931 A 1960 E MARÇO/85 A FEVEREIRO/86) DA ① PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA; ② INSOLAÇÃO; ③ TEMPERATURA DO AR.

rante o período de 1931 a 1960 e a correspondente ao período de março/85 a fevereiro/86. Os valores diários medidos da insolação, para o período referente a este trabalho, são apresentados na tabela B.2.

A figura 4.1.c apresenta a distribuição das médias mensais da temperatura do ar concernente aos períodos de 1896 a 1922, 1931 a 1960 e março/85 a fevereiro/86. Pode mos verificar através desta figura que este parâmetro físico também tem sido pouco alterado nos últimos 80 anos. Os valores médios de temperatura do ar, para o período de março/85 a fevereiro/86, estão listados na tabela B.3.

Cunha e Bastos (1973) analisaram os dados meteorológicos de temperatura do ar, umidade do ar e precipitação pluviométrica referentes aos períodos de 1896 a 1922 e 1931 a 1960, para a região de Belém, e concluíram que "não houve alterações significativas no ambiente climático da região, entre os dois períodos estudados". Pela análise da figura 4.1 pode-se dizer que o ano estudado não se afastou muito da média climatológica do local.

Assim sendo, considerando a regularidade relativa das condições climáticas operantes na região metropolitana de Belém, os estudos geotérmicos realizados durante o ciclo de período de um ano podem fornecer uma idéia razoável da variabilidade e extremos a serem esperados nesta região tropical úmida.

4.3 Deriva Anual da Temperatura

4.3.1 Variação Temporal da Temperatura a 1,0 m de Profundidade

Do período de um ano de observações, selecionamos dois meses da estação chuvosa, março e abril/85, a fim de

mostrar e comparar o comportamento temporal detalhado dos seguintes parâmetros:

- a. as médias móveis de 5 dias do fluxo de radiação solar incidente na superfície da região em estudo;
- b. os valores de temperatura diariamente registrados a 1,0 m de profundidade, às 9:00 h local;
- c. as médias móveis de 5 dias da altura diária da precipitação pluviométrica.

Os valores referentes aos itens acima citados são apresentados na figura 4.2. Como podemos verificar nesta figura, a temperatura varia consideravelmente a 1,0 m de profundidade de um dia para outro. Dessa forma, na área em estudo, as variações diárias de temperatura na superfície não podem ser desprezadas a tais profundidades.

Pela análise da figura 4.2 torna-se evidente que há um relacionamento direto entre o fluxo de radiação solar incidente na superfície e a temperatura registrada a 1,0 m de profundidade. Pela figura 4.2 verifica-se, também, que existe um retardamento de aproximadamente 1 dia entre os valores máximo e mínimo da temperatura a 1,0 m com respeito àquelas do fluxo de radiação solar. Este retardamento pode ser explicado considerando-se que o pulso diário da energia térmica é transmitido até a profundidade de 1,0 m com uma velocidade média superior a 4 cm.h^{-1} .

É também evidente na figura 4.2 que a precipitação pluviométrica tem efeito significativo sobre as temperaturas observadas a 1,0 m de profundidade. Observa-se o persistente relacionamento inverso entre a precipitação e os dois parâmetros anteriormente mencionados. No período de observação considerado na figura 4.2, o qual inclui o equinócio e a ocorrência de elevados índices de nebulosidade e precipitação sobre a região em pauta, o maior incremento do fluxo de radiação solar observado de um dia para outro foi próximo de

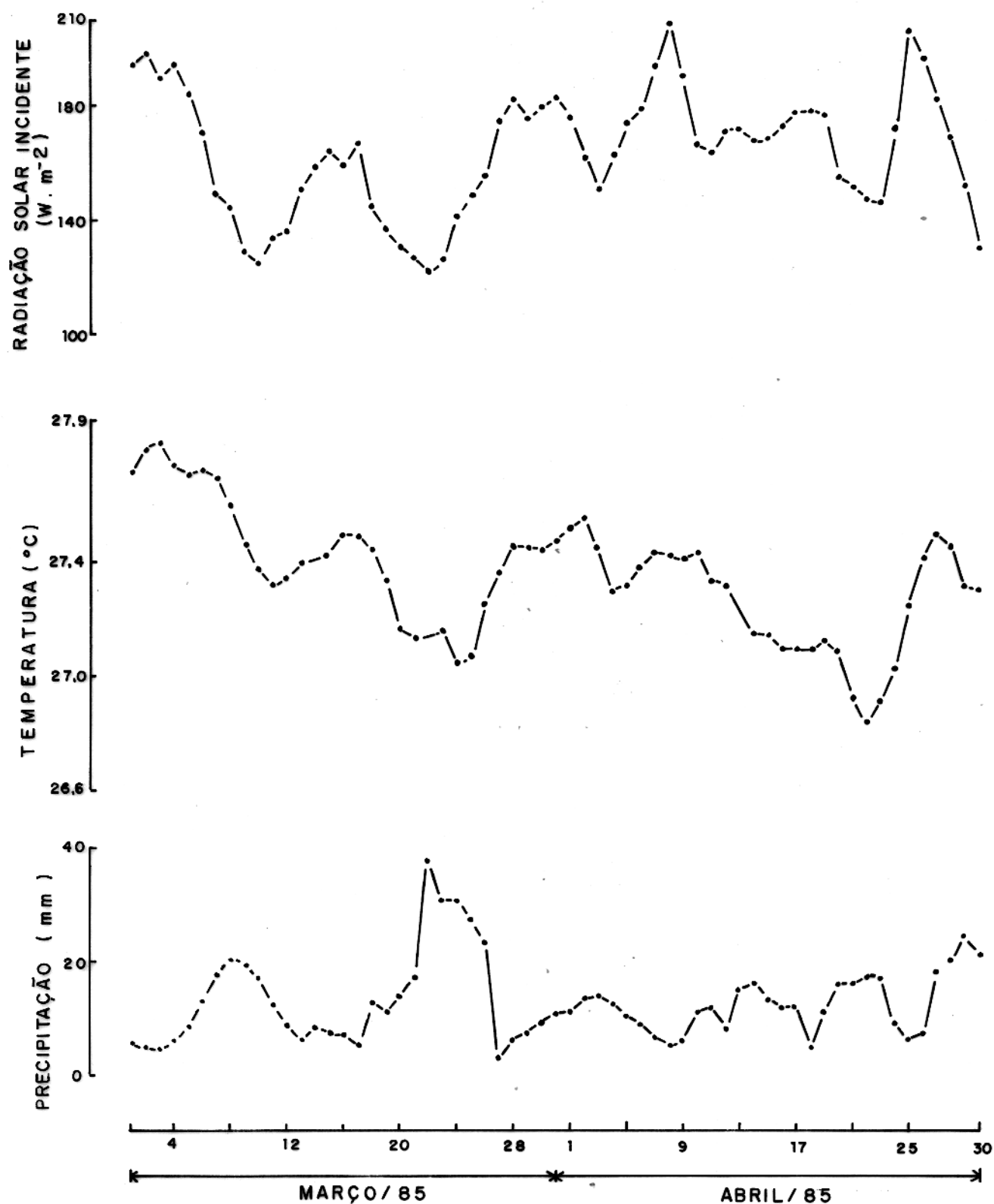


FIGURA : 4.2 - DISTRIBUIÇÃO DAS MÉDIAS MÓVEIS DE 5 DIAS DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE E PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA; VALORES DA TEMPERATURA REGISTRADA A 1m DE PROFUNDIDADE, ÀS 9:00h — PERÍODO: MARÇO A ABRIL / 85.

30 W.m^{-2} ; este incremento correspondeu a um aumento da ordem de $0,22^{\circ}\text{C}$ na temperatura registrada a 1,0 m de profundidade.

Os mesmos parâmetros mostrados na figura 4.2 são apresentados para todo o período concernente a este trabalho, em intervalos de 5 dias, na figura 4.3. Observa-se nesta figura que as maiores variações de curta duração do fluxo de radiação solar ocorrem de janeiro a maio nesta região de regime climático substancialmente regular. O fluxo de radiação variou de 126 a 264 W.m^{-2} , enquanto que a variação de temperatura a 1,0 m de profundidade foi de $27,08$ a $31,97^{\circ}\text{C}$.

A figura 4.3 mostra de forma evidente que o relacionamento direto entre o fluxo de radiação solar e a temperatura a 1,0 m de profundidade persiste por todo o ano. Entretanto, tal relacionamento é certamente melhor observado durante a estação seca. Isto é explicado pelo fato de que durante a estação chuvosa, a maior parte da energia da radiação solar absorvida é consumida como calor latente de evaporação na região tropical úmida (Sellers, 1974). Por outro lado, durante a estação seca, uma maior porção dessa fonte de energia pode ser usada para aquecimento do solo. Isto explica os elevados gradientes de temperatura observados durante os meses de setembro a novembro. Nos poucos casos em que não se observa uma resposta direta da temperatura a 1,0 m de profundidade em relação ao aquecimento solar, pode-se verificar o seguinte:

- a. o incremento do fluxo de radiação solar enquanto que a temperatura a 1,0 m de profundidade pode decrescer, caso exista um aumento simultâneo de precipitação pluviométrica;
- b. na ausência de precipitação pluviométrica e para elevados valores de energia solar absorvida, a temperatura a 1,0 m de profundidade pode continuar aumentando durante pequenos crescimentos do fluxo de energia solar incidente.

4.3.2 Variação Anual dos Perfis de Temperatura Dentro da Zona

de 0,02 a 10,0 m de Profundidade

Durante o período de março/85 a fevereiro/86 foram efetuadas medidas sistemáticas de temperatura, a profundidades de 0,02, 0,1, 0,2, 0,3 e 0,5 m conforme mencionado no item 2.1.1. Neste mesmo período foi realizado o monitoramento da temperatura, a profundidades de 1,0, 3,0 e 6,0 m, conforme descrito no item 2.1.2. Ainda durante o período de março/85 a fevereiro/86 foram executadas perfilagens de temperatura no Poço CG, distante aproximadamente de 500 m do furo utilizado no monitoramento térmico, conforme exposto no item 2.1.3. A coleta dos resultados oriundos dessas três atividades nos permitiu o registro e o acompanhamento da variação anual dos perfis de temperatura dentro da zona de 0,02 a 10,0 m de profundidade. Tais resultados são apresentados nas figuras 4.4 a 4.7 e listados nas tabelas B.4 e B.5.

Ao compararmos as figuras 4.4 a 4.7 verificamos um fato bastante interessante, ou seja, a deriva dos perfis de temperatura ao longo do ciclo de um ano. No período de março/85 a fevereiro/86 estes perfis oscilaram ora no sentido de acréscimo, ora no sentido de decréscimo dos valores da temperatura, porém, as oscilações médias mensais registradas no horário das 9:00 h ocorreram no mesmo sentido que o das observadas às 18:00 h. Assim sendo, podemos verificar que a uma determinada profundidade, dentro dos limites estabelecidos nas figuras 4.4 a 4.7, o valor médio da temperatura é alterado em conformidade ao horário no qual é efetuada tal medida, porém, o sentido do deslocamento médio mensal dos perfis geotérmicos in depende do horário de amostragem. No intervalo de 0,02 a 0,5 m, os valores médios mensais de temperatura sofrem mudanças tão bruscas e elevadas que os perfis geotérmicos, às 9:00 h, apresentam gradientes essencialmente positivos, enquanto que às 18:00h tais perfis caracterizam-se por gradientes fundamentalmente negativos. Isto mostra a complexidade desta zona, no que tange ao sentido do fluxo de calor, o qual em um mesmo dia é transportado fundamentalmente ora em um determinado sentido, ora em sen

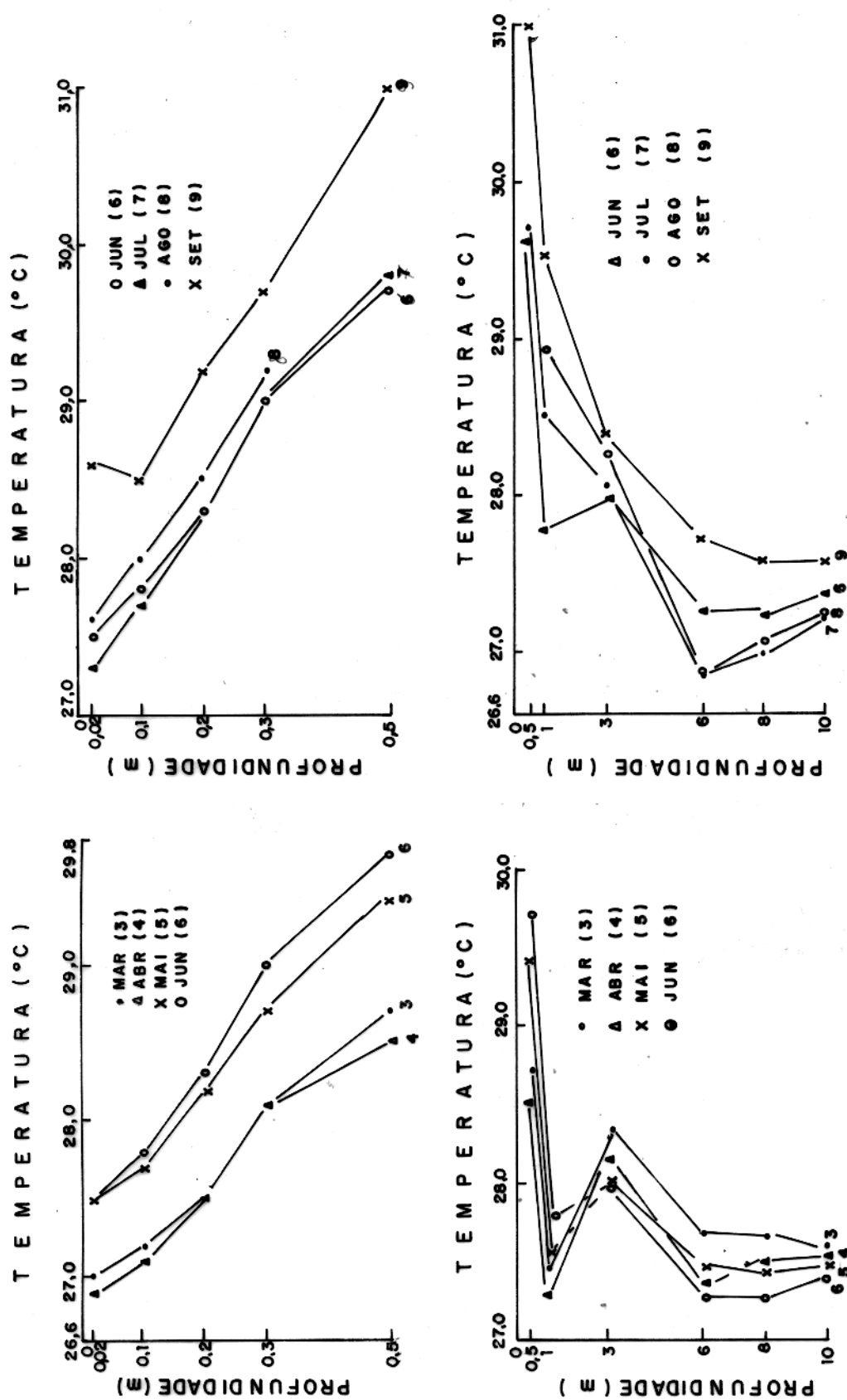


FIGURA: 4.4 - PERFIS DE TEMPERATURA DE 0,02 A 10,0m, REFERENTES AO PERÍODO DE MARÇO A SETEMBRO/85, ÀS 9:00 h.

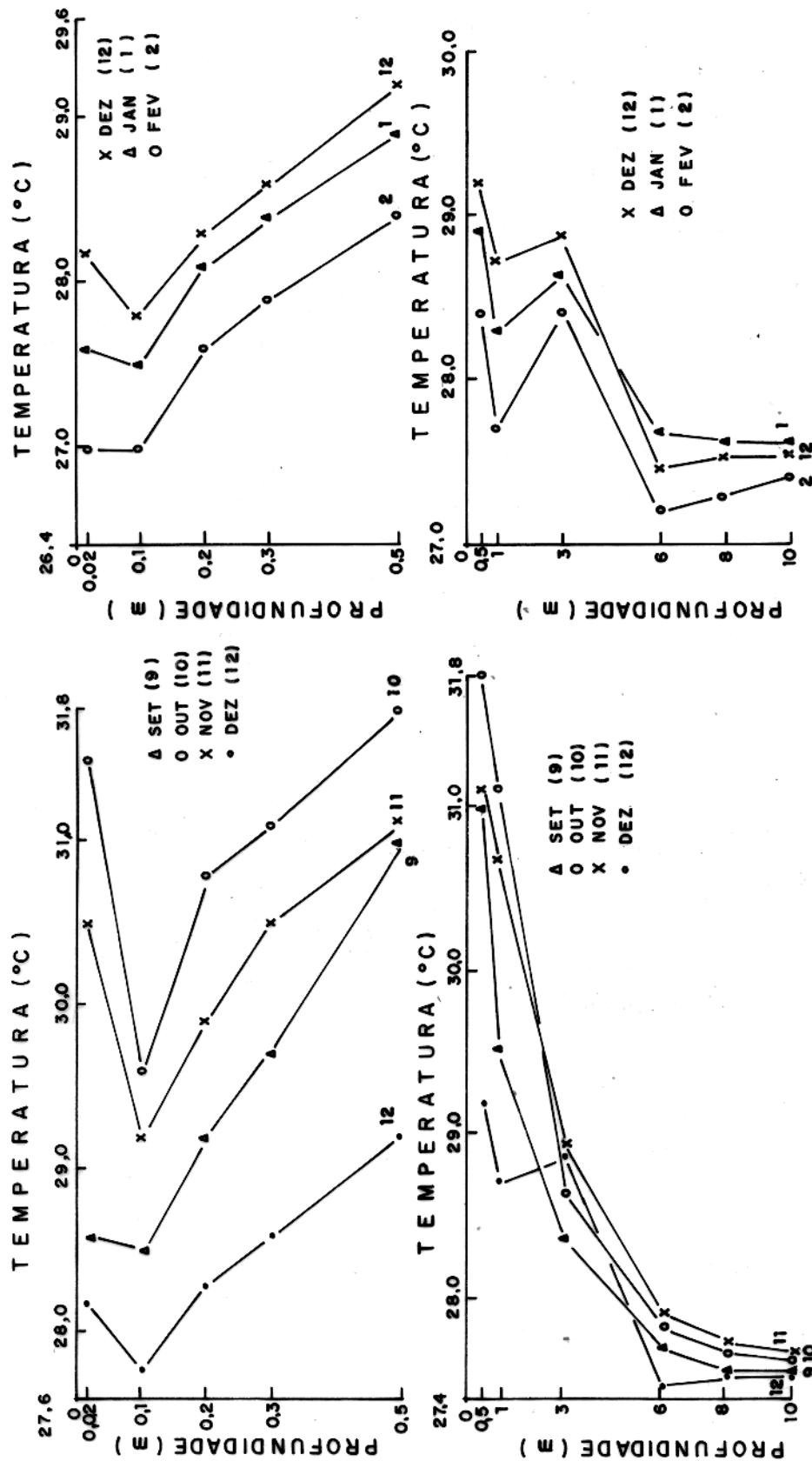
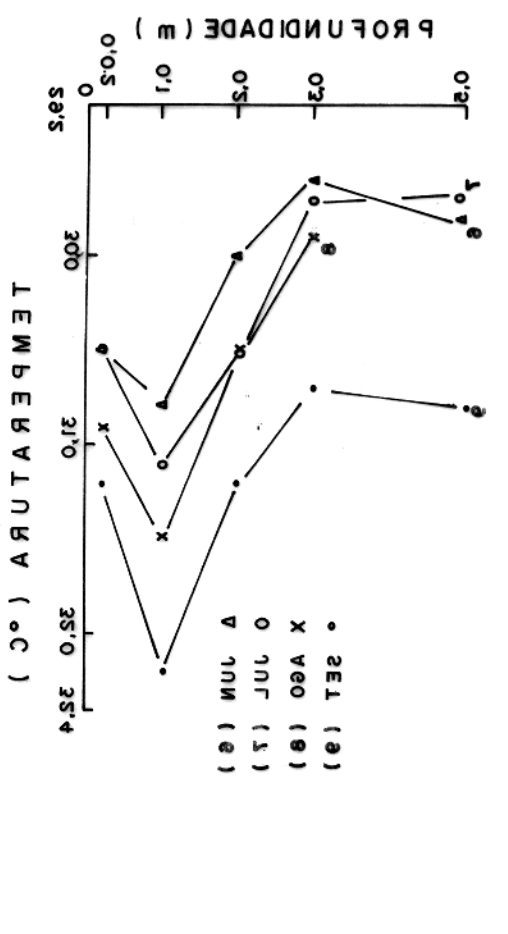
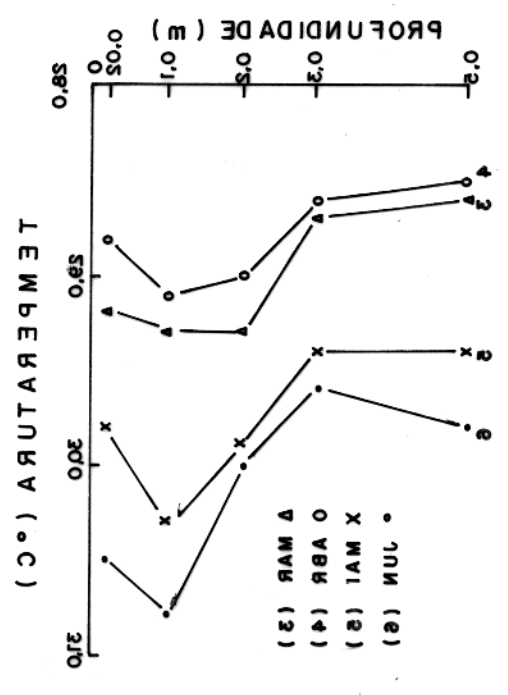
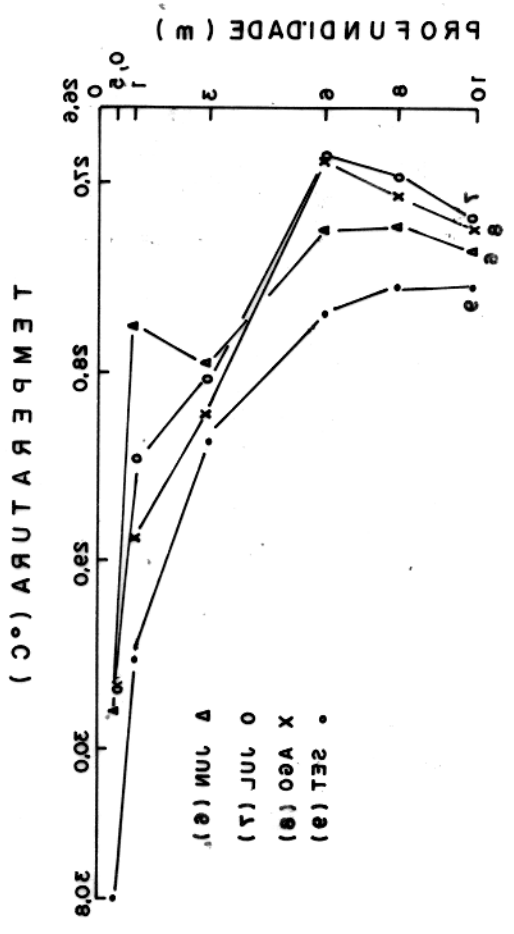
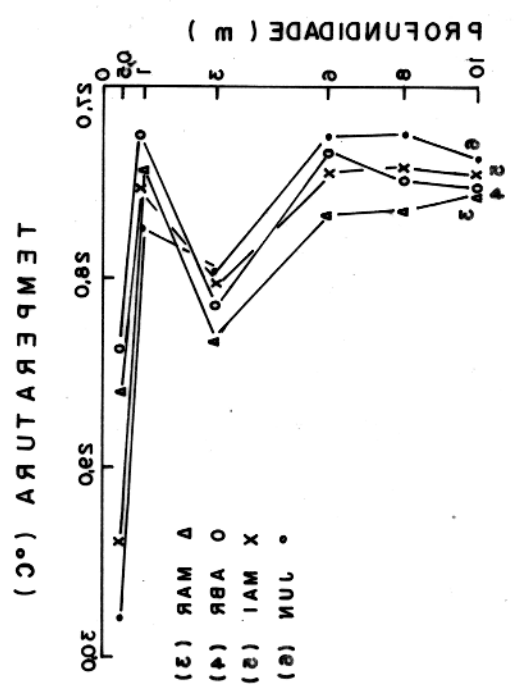


FIGURA 4.5 - PERFIS DE TEMPERATURA DE 0,02 m A 10,0 m, REFERENTES AO PERÍODO DE SETEMBRO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 9:00 h.

DE MARÇO A SETEMBRO \ 82, ÀS 18:00 H.
 FIGURA 4.6 - PERFILS DE TEMPERATURA DE 0'05 A 10'00" REFERENTES AO PERÍODO



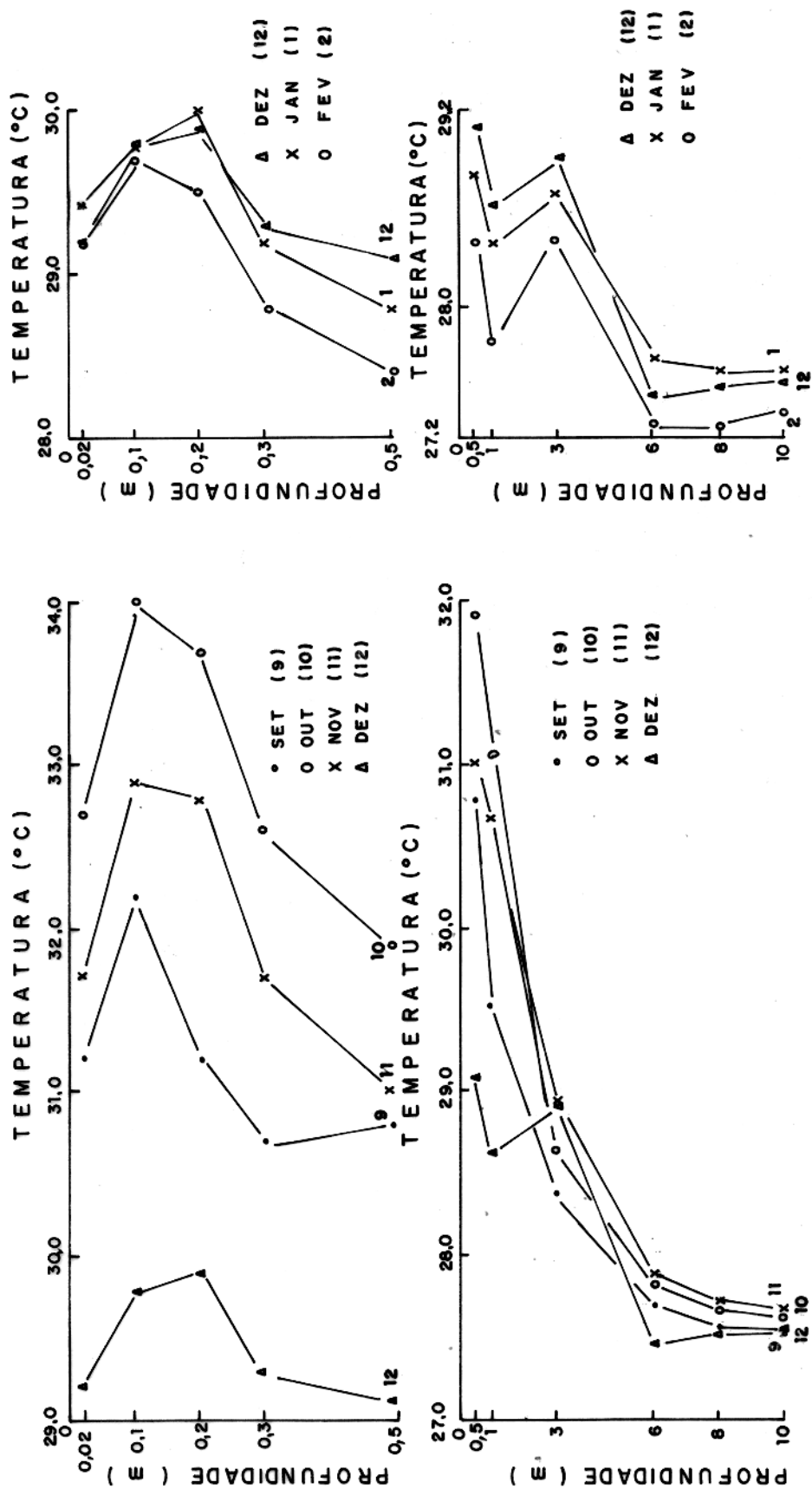


FIGURA : 4.7 - PERFIS DE TEMPERATURA DE 0,02 A 10,0 m, REFERENTES AO PERÍODO DE SETEMBRO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 18:00 h.

tido inverso.

A profundidades superiores a 1,0 m os valores médios mensais de temperatura, referentes aos dois horários em pauta, não apresentam fortes discrepâncias entre si. Assim sendo, conforme pode ser observado nas figuras 4.4 a 4.7, para o intervalo de profundidade de 1,0 a 10,0 m, as configurações dos perfis geotérmicos médios mensais relativos às 9:00h são idênticos àqueles concernentes aos perfis obtidos às 18:00 h. Isto é explicado pelo fato de que a energia térmica oriunda do fluxo de radiação solar que incide na superfície terrestre atinge essas profundidades de maneira bastante atenuada, porém, ratificamos, não desprezível.

Outro fato interessante a ser observado nas figuras 4.4 a 4.7 é que, para o intervalo de 0,5 a 10,0 m de profundidade, os perfis geotérmicos médios referentes aos meses de julho a novembro/85 caracterizam-se por gradientes essencialmente negativos, portanto, indicam que o fluxo de calor está sendo transportado fundamentalmente em direção as camadas mais profundas. Este período, no entanto, conforme pôde ser visto na figura 4.1, corresponde ao de maior índice de insolação e de menor índice de precipitação pluviométrica na região em estudo. A figura 4.8 nos mostra os valores do fluxo de radiação solar incidente na superfície para o período de março/85 a fevereiro/86, para a região em pauta. Nesta figura, os índices mais elevados correspondem ao período de maio a novembro. Os valores diários desse fluxo de radiação (EMBRAPA/CPATU, 1986, comunicação escrita) são apresentados na tabela B.6. Podemos considerar que a deriva dos perfis geotérmicos constantes nas figuras 4.4 a 4.7 é provocada fundamentalmente pela influência da energia térmica gerada pelo fluxo de radiação solar global incidente. Estas figuras nos indicam, ainda, que tais influências persistem a maiores profundidades.

A análise dos dados constantes nas figuras 4.1 e 4.8 comprovam que o período no qual o presente trabalho

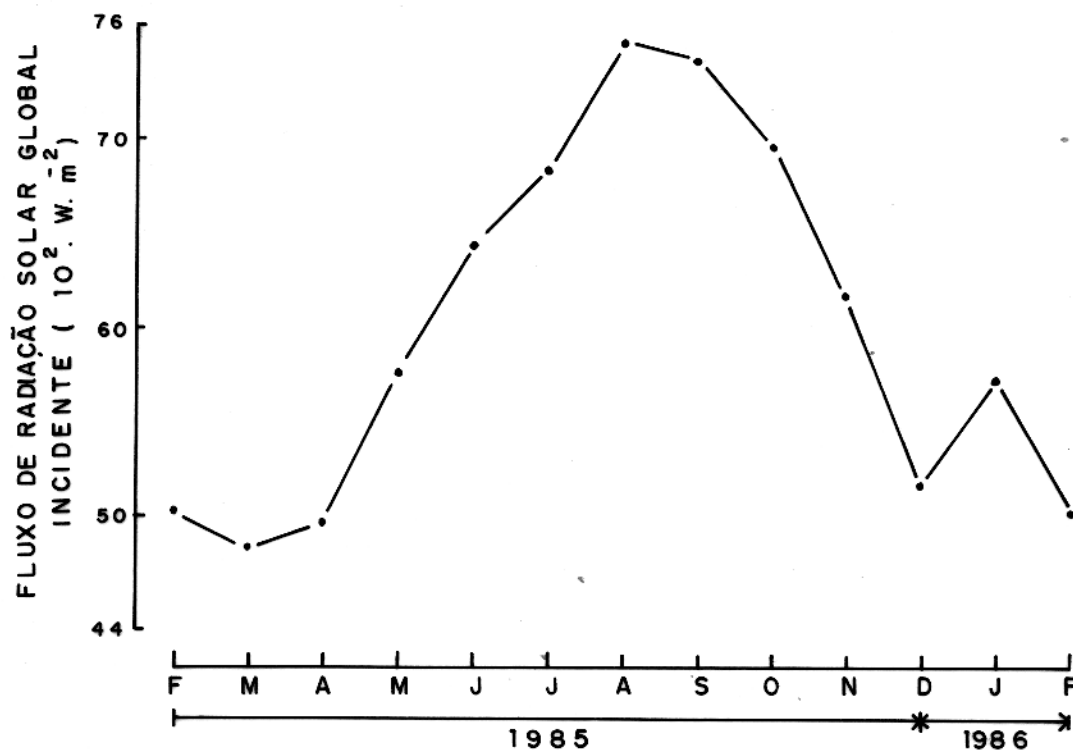


FIGURA : 4.8 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES REFERENTES AO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE, RELATIVA AO PERÍODO DE FEVEREIRO/85 A FEVEREIRO/86.

foi realizado pode ser considerado como um período climatologicamente normal. Portanto, podemos afirmar que, para a região em estudo, no período de julho a novembro, a maior parte da energia térmica que atinge a zona situada entre 1,0 a 10,0 m de profundidade é transportada preferencialmente para as camadas mais profundas, nos horários observados.

É interessante notar que as variações do intervalo de temperatura nos perfis mensais decrescem rapidamente com a profundidade até 3,0 m. Por exemplo, a excursão da temperatura neste ano de observações foi de aproximadamente $4,6^{\circ}\text{C}$ a 0,02 m, $3,9^{\circ}\text{C}$ a 1,0 m e $1,0^{\circ}\text{C}$ a 3,0 m. Entretanto, abaixo de 3,0 m a amplitude da deriva de temperatura muda para uma taxa menor. Isto é evidente do fato de que a excursão da temperatura foi de cerca de $0,7^{\circ}\text{C}$ a 6,0 m e $0,5^{\circ}\text{C}$ a 10,0 m, para ambas horas selecionadas. Isto explica porque as perturbações da temperatura ocorrentes na superfície podem ser facilmente observadas além de 10,0 m de profundidade em uma escala de tempo sazonal.

4.4 Distribuição Vertical da Densidade, Calor Específico, Condutividade e Difusividade Térmicas

Dos testemunhos de sondagem oriundos do Furo (3) foram selecionadas nove amostras, representativas da litologia local, a fim de serem utilizadas para determinação da distribuição vertical de difusividade térmica. Para tanto, foram realizadas além das medidas de condutividade térmica, determinações de densidade e cálculos de calor específico, conforme descrito nos itens 2.2 e 2.3. Os resultados, juntamente com as quantidades de areia, argila e água presentes nessas amostras, são apresentados na figura 4.9 e tabela B.7. É interessante notar na figura 4.9 o comportamento inverso das curvas referentes a densidade e calor específico, ou seja; o acréscimo nos valores de um destes parâmetros implica na diminuição do outro. Entretanto, conforme esta figura, há uma excelente correlação direta entre os parâmetros de condutividade e difusividade

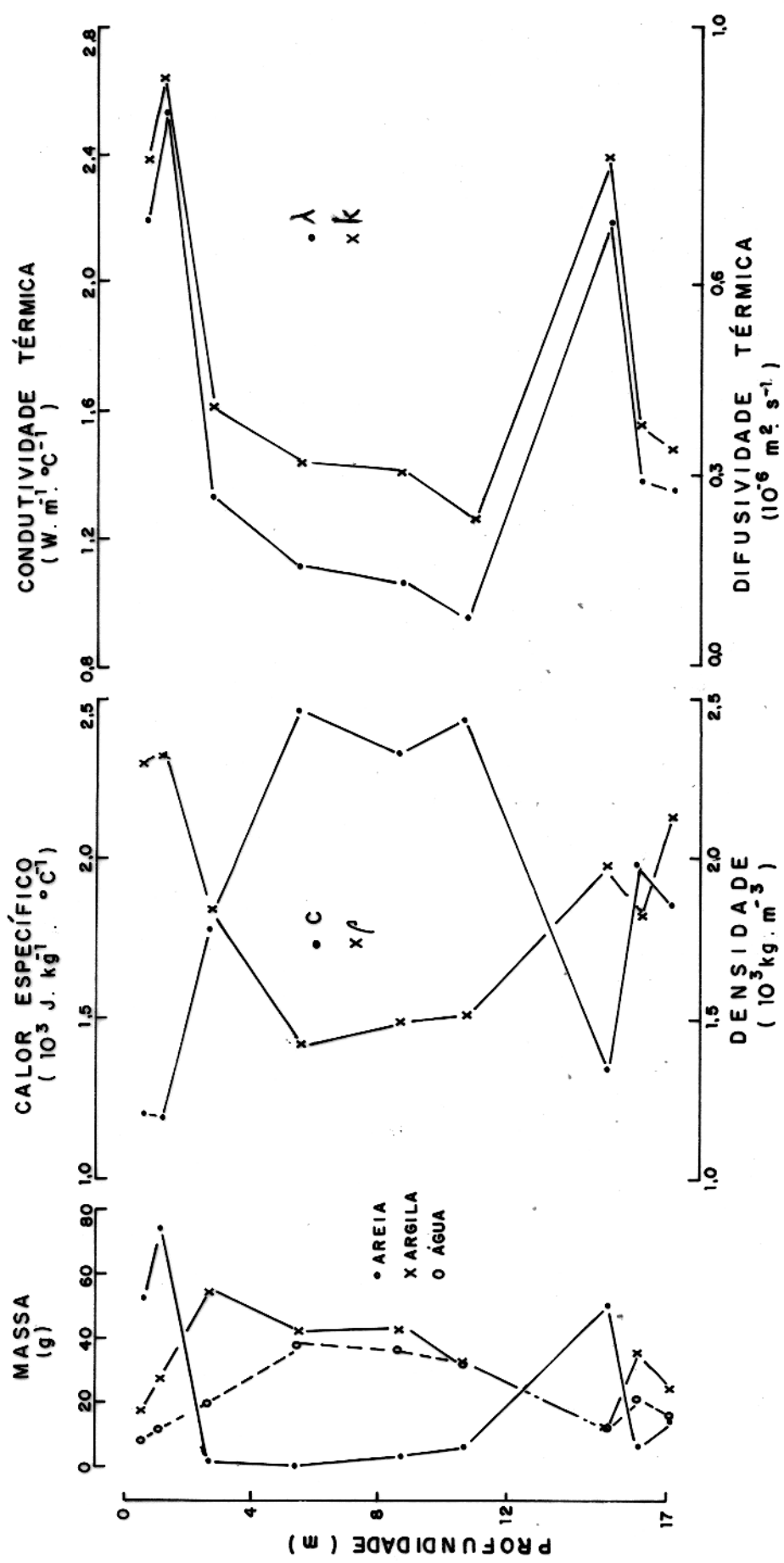


FIGURA : 4.9 - DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES REFERENTES AS MASSAS DE AREIA, ARGILA E ÁGUA, DENSIDADE, CALOR ESPECÍFICO, CONDUTIVIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICAS PERTINENTES A AMOSTRAS DO FURO (3).

de térmicas. Isto era de se esperar, pois a condutividade térmica nos indica a rapidez com que o calor flui num determinado material, enquanto que a difusividade térmica nos informa acerca da facilidade com que este material sofrerá determinada mudança de temperatura. Assim sendo, a configuração da distribuição dos valores de condutividade térmica ao longo de um poço deve nos indicar o perfil da distribuição dos valores atinentes a difusividade térmica, na área em estudo.

A figura 4.9 nos mostra, ainda, um interessante relacionamento desses quatro parâmetros supra citados com as quantidades de areia, argila e água presentes na amostra analisada. Quanto menor for a massa de areia contida na amostra, menores serão os valores resultantes de densidade, condutividade e difusividade térmicas, porém, maior será o valor resultante de calor específico. Consequentemente, há uma relação direta entre a massa de argila presente na amostra e o valor resultante de calor específico, todavia, existe um relacionamento inverso desta massa com os outros três parâmetros físicos citados. A distribuição do calor específico está diretamente relacionada ao conteúdo de água da amostra. As amostras com elevadas percentagens de argila retêm mais água, como é mostrado pelas diferenças de massas entre os estados "natural" e "seco" das amostras. Deste modo, isto explica o relacionamento anteriormente mencionado entre a distribuição de massa de argila e o calor específico.

4.5 Distribuição do Fluxo de Calor no Intervalo de Profundidade de 0,02 a 6,0 m

O presente capítulo apresenta a distribuição do fluxo de calor apenas para o intervalo de 0,02 a 6,0 m. Isto se deve a dois fatores: o primeiro é o fato de que as maiores flutuações geotérmicas observadas ocorrem até a profundidade de cerca de 6,0 m; o segundo, refere-se ao escopo deste capítulo.

Com os dados até então obtidos nos foi possível

vel calcular o fluxo de calor concernente ao intervalo de profundidade de 0,02 a 6,0 m, cujos resultados são apresentados nas figuras 4.10 a 4.13 e tabelas B.8 e B.9, correspondentes aos horários das 9:00 e 18:00 h local.

Conforme era de se esperar, as feições das figuras 4.10 a 4.13 estão em perfeita concordância com as registradas nas figuras 4.4 a 4.7.

A análise das figuras 4.10 a 4.13, para o intervalo de 0,02 a 0,5 m de profundidade, nos fornece importantes informações. Neste intervalo, para todo o período referente a este trabalho, às 9:00 h, o fluxo de calor é essencialmente negativo, exceto apenas na fina camada de 0,02 a 0,1 m no período de setembro/85 a janeiro/86. Entretanto, para o mesmo período, às 18:00 h, no intervalo de profundidade de 0,02 a 0,5 m, o fluxo de calor é preponderantemente positivo. Portanto, independente da estação do ano considerada, durante o dia há uma inversão do sentido do fluxo de calor na zona em pauta. Isto é analisado como um processo diário de aquecimento e resfriamento dessa zona, ou seja: às 18:00 h a contribuição térmica do fluxo de radiação solar incidente no dia flui preponderantemente em direção as camadas mais profundas, enquanto que às 9:00 h flui em direção a superfície terrestre o calor residual anteriormente armazenado. É interessante notar que no período de setembro/85 a janeiro/86 as influências térmicas do dia, oriundas da radiação solar incidente na superfície, já atingem, às 9:00 h, a profundidade próximo de 0,1 m. Tal comportamento é interpretado como devido ao fato de que no período em pauta é relativamente pequeno o índice de nebulosidade na área em estudo. Consequentemente, há grande quantidade de calor disponível para ser transmitido em direção às camadas mais profundas. A fim de ratificar esta ponderação, observemos na figura 4.11 que no período de setembro a novembro/85, onde há elevados valores de fluxo de radiação solar incidente e baixos valores de precipitação pluviométrica, o fluxo de calor na fina camada em discussão (0,02 a 0,1 m) atinge valores positivos

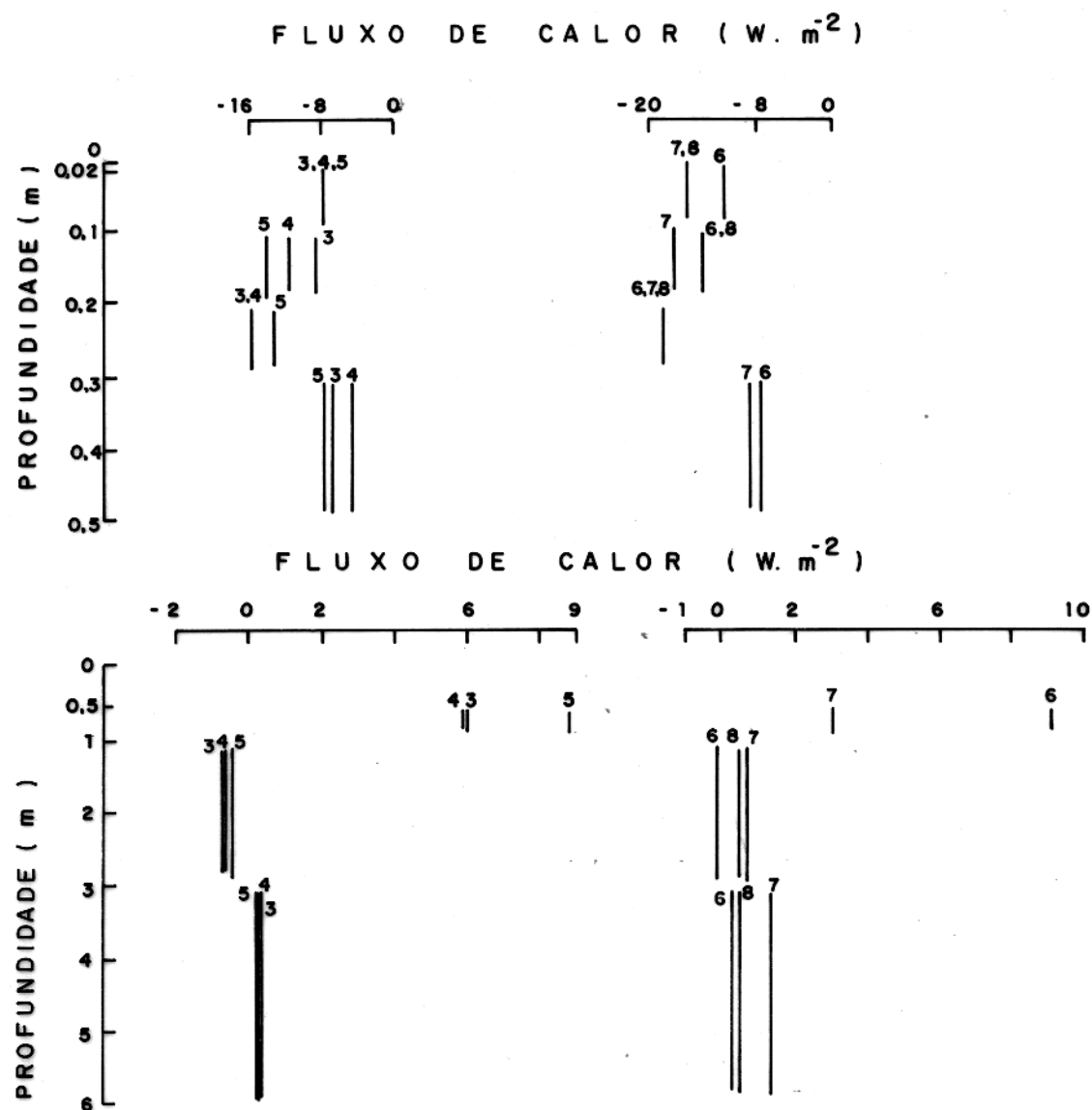


FIGURA : 4.10 - COMPORTAMENTO DO FLUXO DE CALOR, NO INTERVALO DE 0,02 A 6,0 m, REFERENTE AO PERÍODO DE MARÇO A AGOSTO / 85, ÀS 9:00h. (OS NÚMEROS CORRESPONDEM AOS MESES DO ANO).

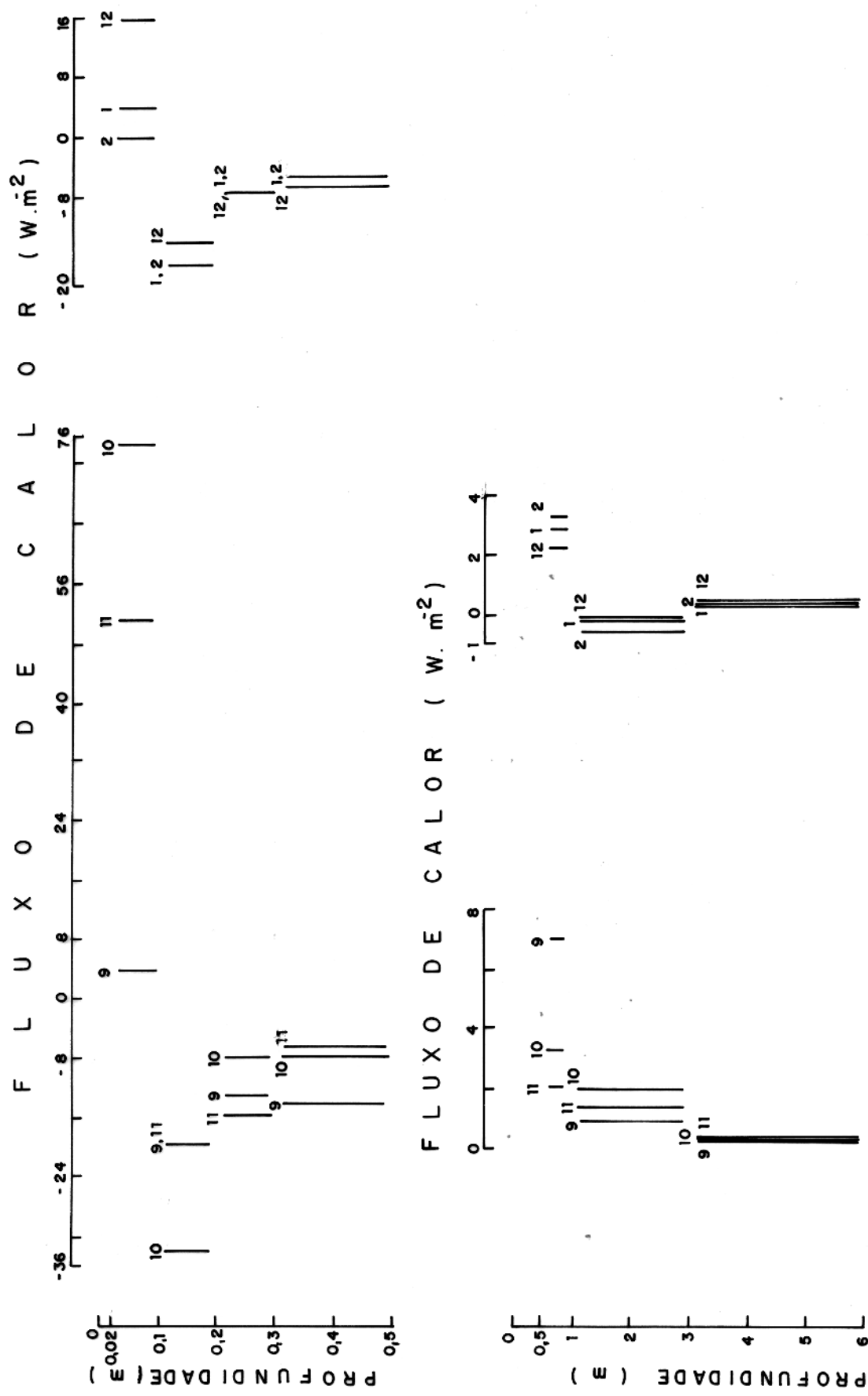


FIGURA: 4.11 - COMPORTAMENTO DO FLUXO DE CALOR, NO INTERVALO DE 0,02 A 6,0 m, REFERENTE AO PERÍODO DE SETEMBRO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 9:00h. (OS NÚMEROS CORRESPONDEM AOS MESES DO ANO).

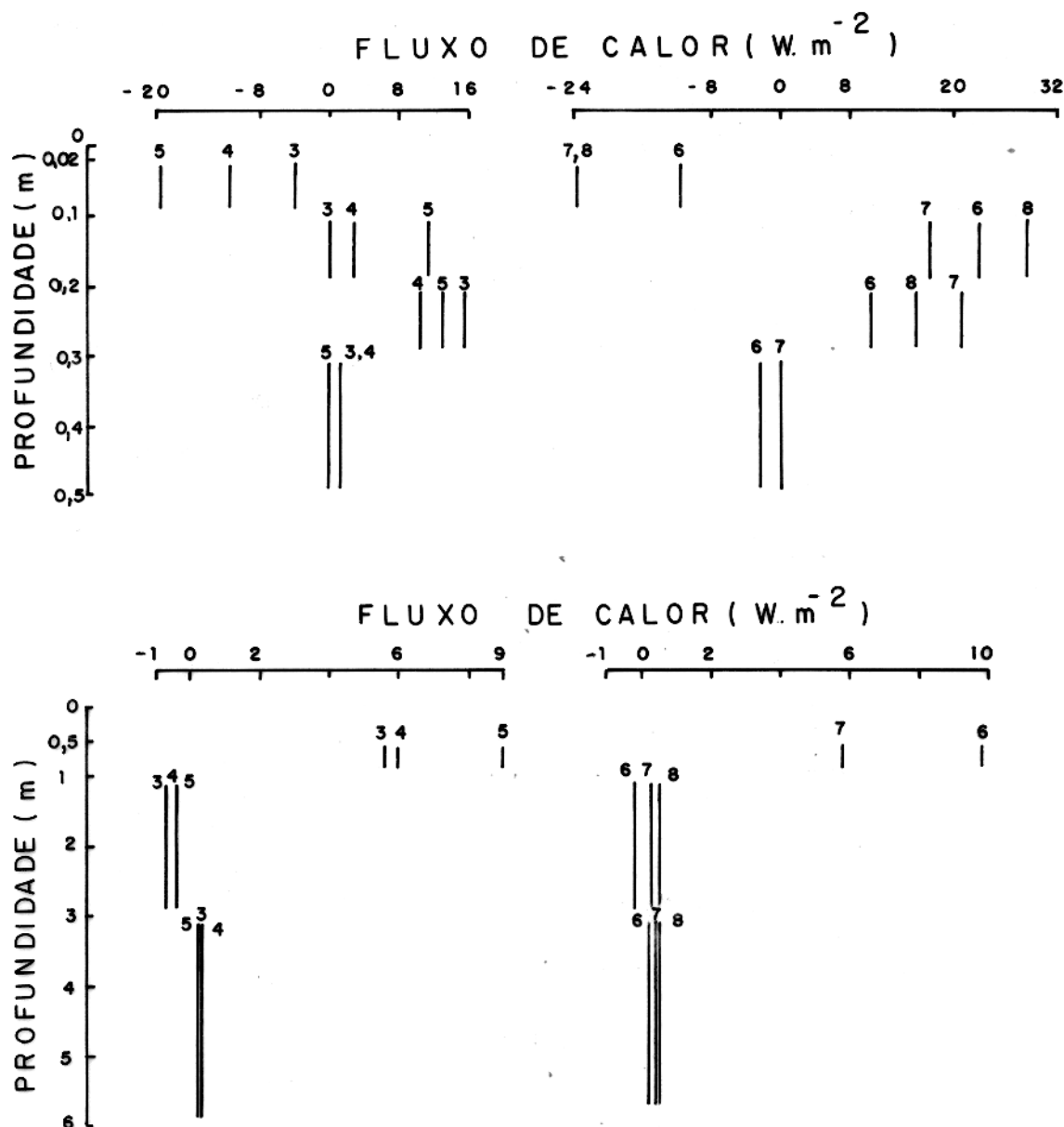


FIGURA 4.12 - COMPORTAMENTO DO FLUXO DE CALOR, NO INTERVALO DE 0,02 A 6,00 m, REFERENTE AO PERÍODO DE MARÇO A AGOSTO/85, ÀS 18:00 HORAS (OS NÚMEROS CORRESPONDEM AOS MESES DO ANO).

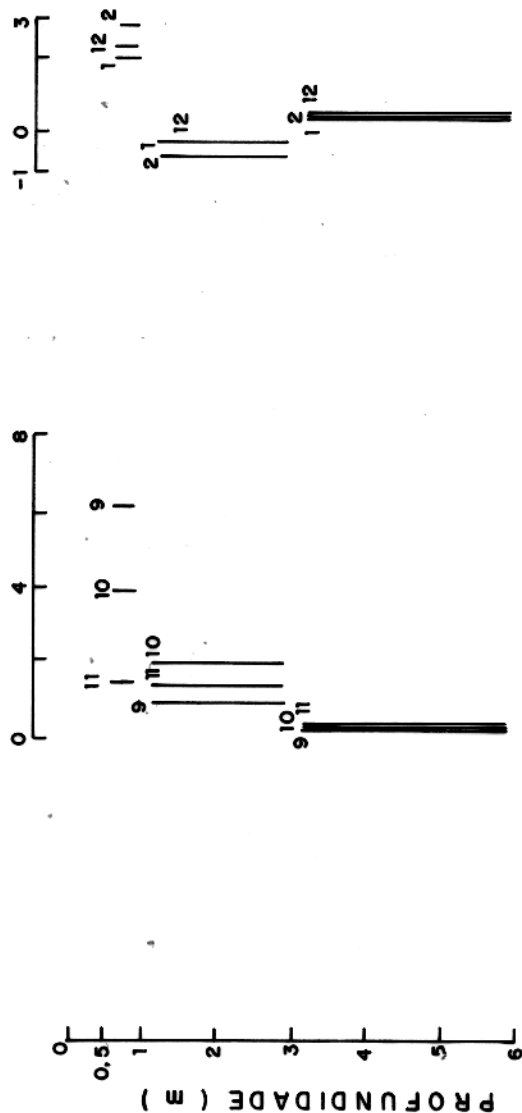
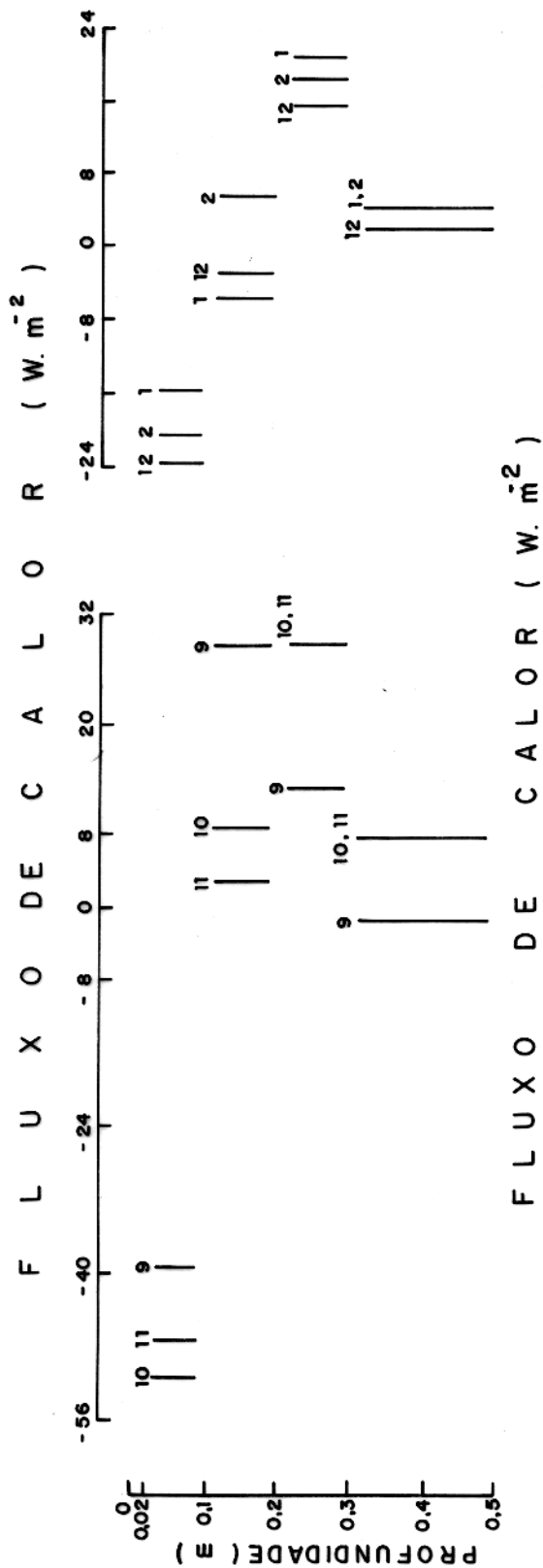


FIGURA: 4.13 - COMPORTAMENTO DO FLUXO DE CALOR NO INTERVALO DE 00:02 A 6:00 m, REFERENTE AO PERÍODO DE SETEMBRO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 18:00 h. (OS NÚMEROS CORRESPONDEM AOS MESES DO ANO).

da ordem de até $74,81 \text{ W.m}^{-2}$. Porém, no período de dezembro/85 a janeiro/86, com a brusca diminuição do fluxo de radiação solar e elevação da precipitação, os valores de fluxo de calor nesta camada também decresceram fortemente, atingindo o valor máximo de apenas $15,75 \text{ W.m}^{-2}$.

Quanto ao intervalo de 0,5 a 6,0 m de profundidade, conforme pode ser observado nas figuras 4.10 a 4.13, o fluxo de calor é essencialmente positivo, tanto no horário das 9:00 h quanto das 18:00 h. Inclusive, no período de julho a novembro/85, para ambos os horários estudados, o fluxo de calor é totalmente positivo. Isto nos indica que neste período, nos horários estudados, o fluxo de calor é preferencialmente transportado em direção às camadas mais profundas. As inversões no sentido do transporte do fluxo de calor, ainda observadas nesta zona, são interpretadas como causadas pela interferência do fluxo de calor residual armazenado em períodos anteriores nos quais a superfície terrestre esteve exposta a insolação na alternância de períodos diurnos e noturnos.

A figura 4.14 mostra de maneira resumida a distribuição do fluxo de calor dentro da zona rasa, sendo que cada barra nesta figura representa o fluxo médio nas estações seca ou chuvosa. Supõe-se que as camadas são planas, homogêneas e estratificadas. Os dados resultantes, tanto para as 9:00 h como para as 18:00 h, mostram consideráveis diferenças entre as distribuições do fluxo médio nas estações chuvosa e seca até 3,0 m de profundidade. Adicionalmente, as amplitudes das variações do fluxo são maiores na estação seca do que na estação chuvosa, ao menos em tal zona.

Observa-se que os fluxos computados variam substancialmente em amplitude e podem mudar de sinal pelo menos duas vezes dentro do intervalo de 6,0 m de profundidade. Os fluxos de calor são fortemente atenuados com a profundidade e no período atingiram extremos de $+74,8 \text{ W.m}^{-2}$ às 9:00 h e $-51,2 \text{ W.m}^{-2}$ às 18:00 h, na camada de 0,02 a 0,1 m; enquanto que na

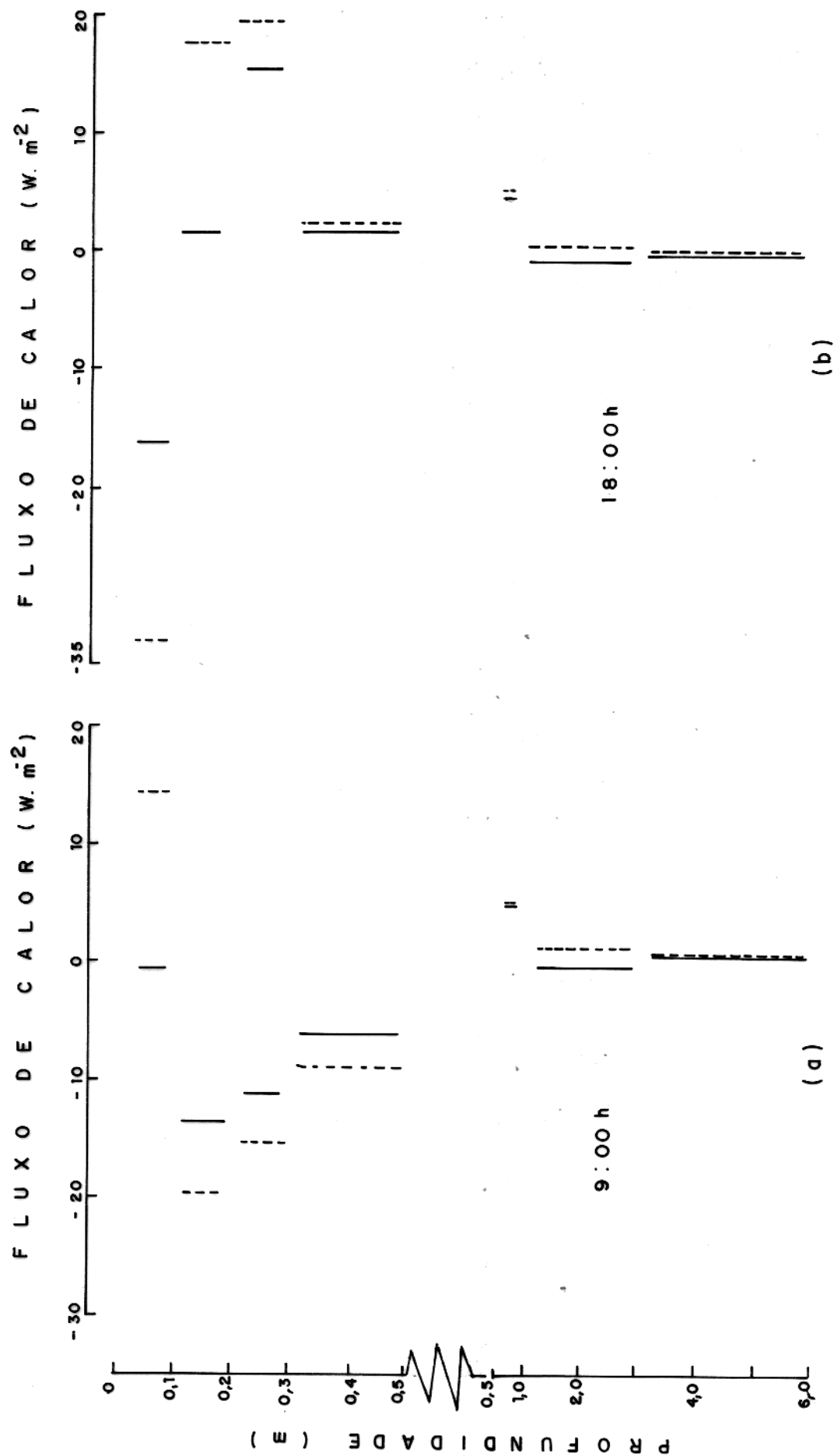


FIGURA : 4.14 - DISTRIBUIÇÃO DO FLUXO DE CALOR MÉDIO NAS ESTAÇÕES SECA (—) E CHUVOSA (---), ÀS (a) 9:00 h. E (b) 18:00 h.

camada de 3,0 a 6,0 m a variação foi de $+1,4 \text{ W.m}^{-2}$ e $+0,2 \text{ W.m}^{-2}$ naqueles horários. Os fluxos computados nessas horas selecionadas podem atingir, dentro da camada de 0,02 a 0,1 m, próximo de 30% do fluxo de energia solar incidente na superfície e cerca de 4% deste fluxo dentro da camada de 0,5 a 1,0 m. Por conseguinte, esses valores não podem ser desprezados no cálculo do balanço da energia na superfície da região em estudo.

Os aspectos simétricos da distribuição do fluxo, mostrados na figura 4.14, para as profundidades superiores a 0,5 m eram esperados, uma vez que por volta das 9:00 h o solo já iniciou seu aquecimento diário, enquanto que as 18:00 h sua perda de calor para a atmosfera já é apreciável, na região em estudo. É evidente para as horas selecionadas que, na camada de 1,0 a 3,0 m, um fluxo médio negativo prevalece durante a estação chuvosa, enquanto que durante a estação seca o oposto é verdadeiro. Isto indica que o armazenamento de calor pode ocorrer sazonalmente, abaixo de tal camada.

4.6 Conclusões

A comparação entre os dados meteorológicos da área em estudo referentes ao período de março/85 a fevereiro/86 com outros obtidos há cerca de 80 anos, nos indica que o presente trabalho foi desenvolvido em um período climatologicamente normal. Assim sendo, os estudos geotérmicos realizados durante esse ciclo de período de um ano, pode fornecer uma idéia razoável acerca do comportamento geotérmico e suas variações, referentes a região metropolitana de Belém.

Na região em estudo, a variação dos valores de temperatura a 1,0 m de profundidade não pode ser considerada como desprezível. Esta variação é causada pela influência do fluxo de radiação solar incidente na superfície terrestre. Observou-se uma relação direta entre as variações dos parâmetros temperatura e o fluxo de radiação solar incidente. Estes parâmetros também apresentaram uma correlação inversa com o in

dice de precipitação pluviométrica. No período de março/85 a fevereiro/86, os valores de temperatura a 1,0 m de profundidade variaram de 27,08 a 31,97°C, enquanto que o fluxo de radiação solar incidente na superfície variou de 126 a 264 W.m⁻². Observou-se que existe um retardamento em torno de um dia entre os valores máximo e mínimo da temperatura a 1,0 m de profundidade em relação aos seus correspondentes extremos de fluxo de radiação solar. Este retardamento é consequência do fato de que o pulso da energia térmica, gerado na superfície terrestre, é transmitido até a profundidade de 1,0 m com velocidade média superior a 4 cm.h⁻¹.

No intervalo de 0,02 a 0,5 m de profundidade, os gradientes geotérmicos, às 9:00 h, são essencialmente positivos, enquanto que às 18:00 h são preponderantemente negativos. Isto mostra que, ao longo do dia, os valores de temperatura registrados nesta zona são fortemente alterados e que, também, o calor é transportado ora em direção à superfície terrestre, ora em direção às camadas mais profundas.

No período de março/85 a fevereiro/86, os perfis geotérmicos, referentes ao intervalo de profundidade de 0,02 a 10,0 m, derivaram ora no sentido de acréscimo, ora no sentido de decréscimo dos valores da temperatura. Contudo o sentido desta deriva média mensal foi o mesmo para as observações feitas às 9:00 h e 18:00 h.

No intervalo de profundidade de 1,0 a 10,0 m, os perfis de temperatura, obtidos nos horários das 9:00 e 18:00 h, apresentam configurações similares. Isto nos indica, claramente, que a perturbação térmica, gerada na superfície pelo fluxo de radiação solar incidente, atinge tais profundidades de maneira bastante atenuada, porém, não desprezível. A 10,0 m de profundidade, o valor médio mensal da temperatura variou, durante o período concernente a este trabalho, de 27,20 a 27,67°C, o que nos indica que tais influências persistem a maiores profundidades. No período de julho a novembro, a energia térmica

ca que atinge a zona situada entre 1,0 a 10,0 m de profundida de é predominantemente transmitida em direção às camadas mais profundas.

Nas amostras estudadas, os valores de densida de variaram de maneira inversa aos referentes ao calor espe cífico, enquanto os valores de condutividade e difusividade tér micas apresentaram uma relação direta. Portanto, com o estudo acerca da condutividade térmica é possível a obtenção da con figuração dos valores de difusividade térmica ao longo de um perfil litológico raso na área considerada.

Os parâmetros físicos densidade, condutivi dade e difusividade térmicas apresentaram uma relação direta com a quantidade de areia presente na amostra analisada. Enquan to que a quantidade de argila apresentou uma relação inversa com os três parâmetros supra citados. O parâmetro físico o calor específico apresentou um relacionamento direto com a massa de argila e inverso com a massa de areia contidas na amostra ana lisada.

Os resultados mostram que a uma dada hora do dia o fluxo de calor para o solo deve ser considerado no ba lanço da energia na superfície. Por outro lado, em bases sazo nais, o calor armazenado abaixo da superfície não pode ser des prezado.

Alguns aspectos qualitativos dos resultados a presentados neste trabalho podem ser reproduzidos em outras áreas geográficas. Todavia, as diferenças climatológicas e/ou litológicas do local estudado têm que ser consideradas.

5. EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS PERFIS GEOTÉRMICOS RASOS

5.1 Introdução

Nesta área da Região Amazônica a média mensal do fluxo de energia solar que atinge a superfície varia principalmente devido às mudanças de nebulosidade causadas pela presença da Zona de Convergência Intertropical durante a estação chuvosa (Riehl, 1965; Souza et al, 1984) em vez de devido a alternância dos períodos referentes ao equinócio e solstício.

A energia absorvida na superfície terrestre é fundamentalmente reirradiada pela Terra, mas uma parte apreciável dessa energia é transmitida e armazenada sob a superfície, afetando o regime térmico do solo (Sellers, 1974). Um dos objetivos desta pesquisa foi determinar a profundidade de influência dessa fonte externa de energia sobre os perfis geotérmicos em uma região tropical úmida.

Com o escopo acima descrito foi realizado um estudo geotérmico detalhado utilizando-se quatro poços desativados, com profundidades variando de 52 a 210 m, localizados nas circunvizinhanças da região metropolitana de Belém.

5.2 Descrição Acerca da Coleta dos Dados e Características dos Poços Estudados

O estudo acerca do conhecimento geotermal da zona compreendida entre 1 a 40 m de profundidade é frequentemente impedido devido à existência, nesta zona, de vários fatores que podem mascarar o registro correto dos valores de temperatura. Entretanto, conforme Araujo et al (1984), tais estudos podem ser feitos com o mesmo tipo de equipamento usado para a pesquisa do fluxo térmico terrestre profundo, contanto que cuidados especiais sejam tomados em relação à diminuição do intervalo de profundidade entre as medidas de temperatura, proteção da ponte resistiva contra a radiação solar dire

ta e, se necessário, revestimento do furo em estudo.

As perfilagens geotérmicas foram realizadas se gundo a descrição feita no item 2.1.3.

As atividades de campo representaram um levan tamento abrangendo 48 perfilagens geotérmicas efetuadas nos quatro poços tubulares separados em torno de 5 a 20 km entre si. As medidas em cada poço foram efetuadas em intervalos de um mês, durante um período de um ano. Todos os poços usados estavam inativos há períodos maiores que 4 anos.

A localização dos poços na área em estudo pode ser vista na figura 3.1.

Os resultados das perfilagens geotérmicas são apresentados em figuras correspondentes a cada poço estudado. Cada figura mostra os perfis aglutinados em módulos referentes a três meses, porém, para melhor acompanharmos as flutuações sazonais da temperatura, cada módulo subsequente contém o per fil correspondente ao último mês do módulo anterior.

Durante as perfilagens, as medidas de tempera tura foram efetuadas com espaçamento de um metro de profundida de.

A descrição acerca das características indivi duais dos poços estudados é dada a seguir:

Poço CG

Este poço foi concluído há mais de 4 anos e em virtude de sua vazão ser insuficiente para o propósito de sua perfuração, nunca entrou em operação. O nível estático des te poço é da ordem de 4,0 m. Os resultados das perfilagens geo térmicas são apresentados na figura 5.1. Uma das feições mais interessantes desta figura refere-se às elevadas variações sa

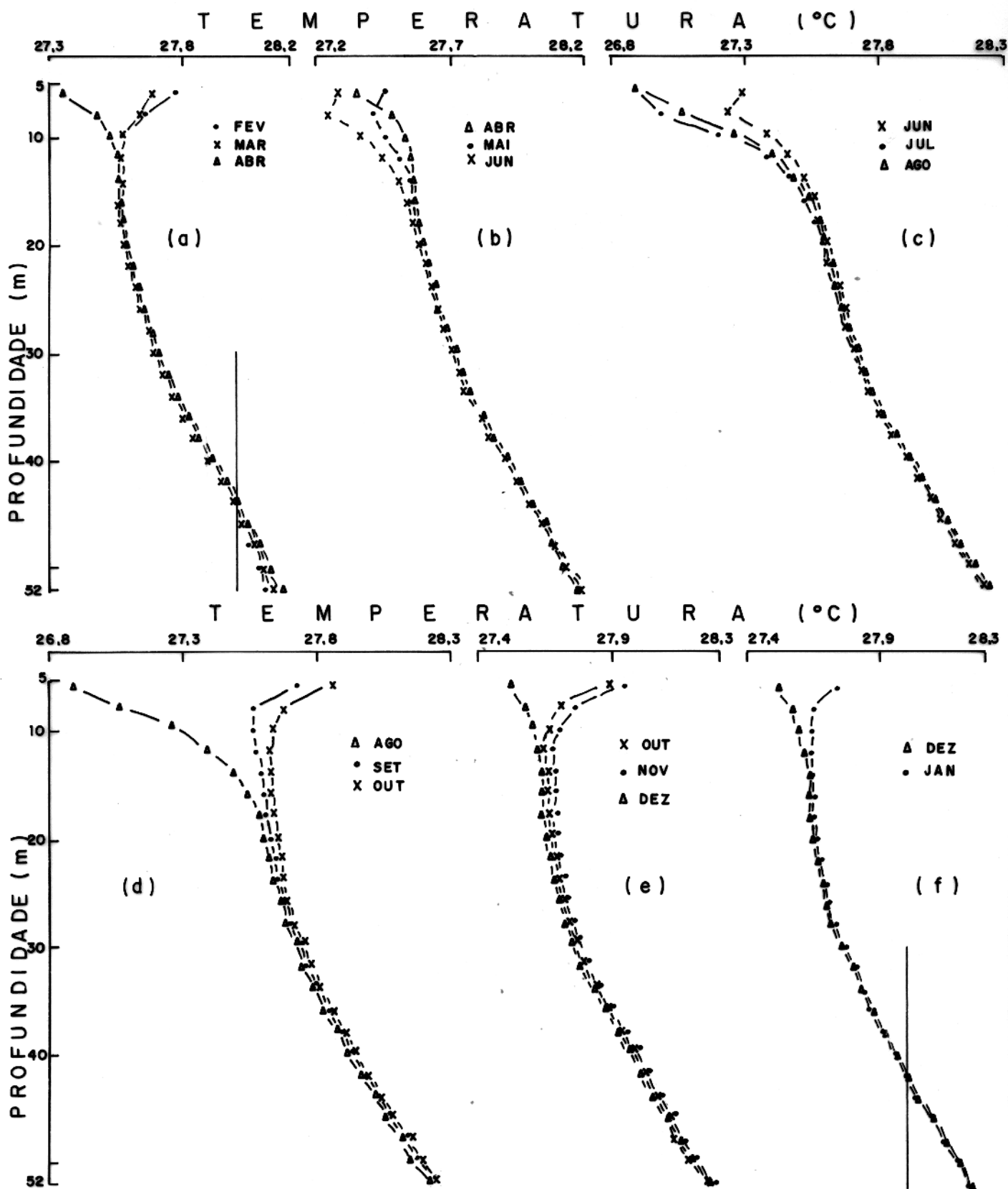


FIGURA: 5.1 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES AO POÇO (CG), NO PERÍODO DE FEVEREIRO/85 A JANEIRO/86.

zonais da temperatura, as quais são nitidamente observadas até a profundidade de 52,0 m. Ao longo dos perfis são registradas flutuações geotermiais de pequena magnitude, de aproximadamente $0,02^{\circ}\text{C}$, entretanto, perfeitamente mensuráveis, como mostra a figura 5.1. Outra feição importante na figura em pauta concerne à migração desses perfis, ou seja: do mês de fevereiro a julho/85 os perfis geotérmicos apresentam decréscimo nos valores da temperatura, enquanto que a partir do mês de julho até novembro/85 os perfis geotermiais apresentam acréscimo nos valores da temperatura. A curva representativa do mês de dezembro/85 sofreu decréscimo em relação ao mês anterior, enquanto que a correspondente a janeiro/86 sofreu acréscimo em relação a dezembro/85. Próximo a 150 m do Poço CG existe um poço em operação, com cerca de 120 m de profundidade, no qual a bomba está posicionada a 36 m de profundidade. A análise desses resultados será apresentada em conjunto com a dos outros três poços tubulares no item 5.3.

Poço IPASEP

Este poço foi desativado há 14 anos. O seu nível estático é de aproximadamente 7,0 m de profundidade. Os resultados das perfilagens geotérmicas são apresentados na figura 5.2. Nos registros mostrados nesta figura observa-se que as variações da temperatura atingem profundidades superiores às verificadas no Poço CG. Nos módulos b a e da figura 5.2, tais variações são registradas também, até o fundo do poço, ou seja, 63,0 m. É importante notar a excursão dos perfis geotérmicos, sendo que há um acréscimo dos valores da temperatura desde o mês de junho até novembro/85. O perfil representativo do mês de dezembro/85 sofreu forte decréscimo em sua parte superior, em relação ao mês antecedente, entretanto, continuou crescendo na parte inferior. A curva concernente ao mês de janeiro/86 praticamente coincide com a do mês anterior, exceto até próximo de 20,0 m de profundidade, onde, os valores registrados são levemente superiores. Verifica-se que os valores da temperatura decrescem, sistematicamente, até mais ou menos 50,0 m.

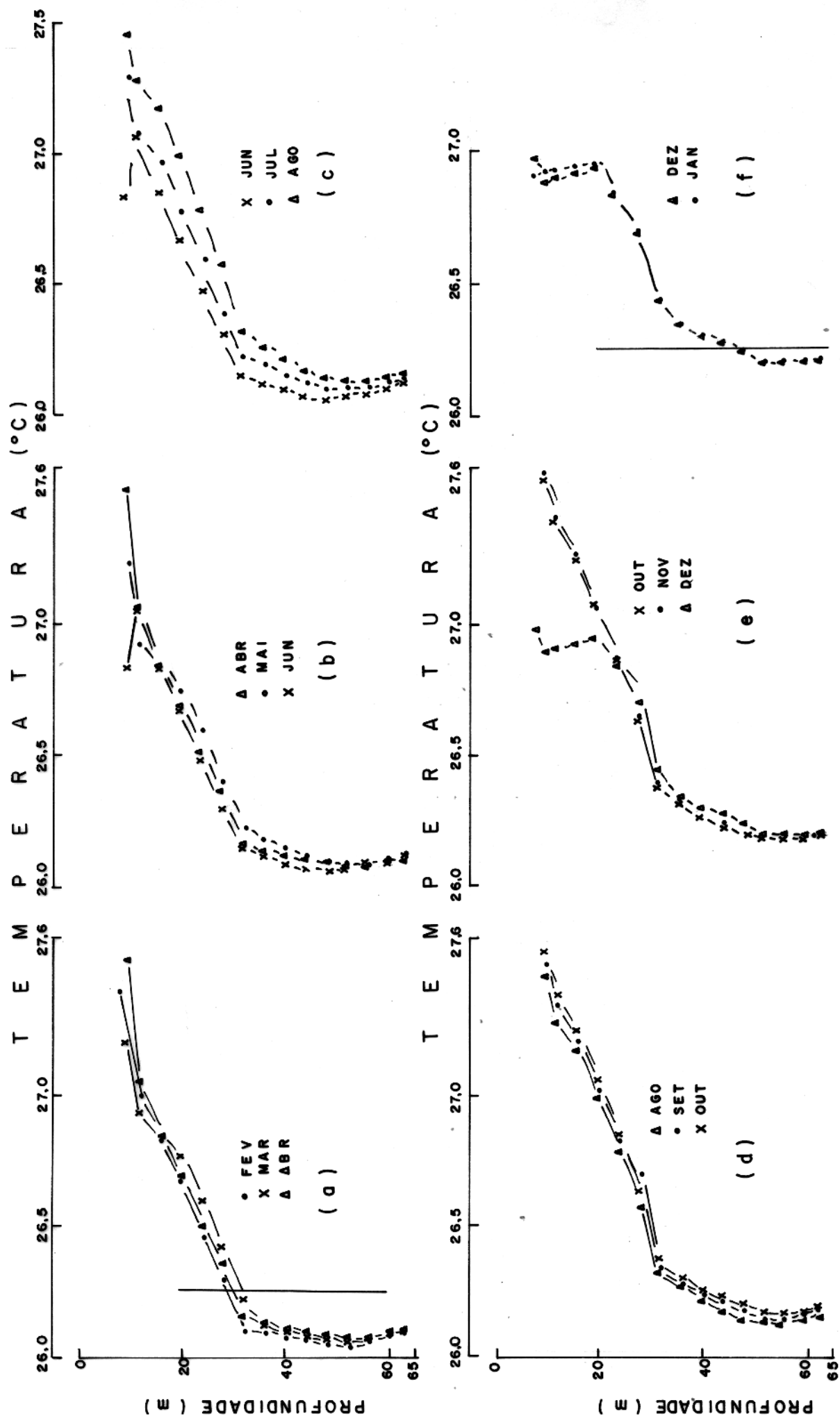


FIGURA : 5.2 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES AO POÇO (IPASEP), NO PERÍODO DE FEVEREIRO/85 A JANEIRO/86.

Próximo ao Poço IPASEP há dois poços em operação, os quais distam entre si em apenas 60 m. Ambos estão localizados em torno de 40 m do Poço IPASEP. A profundidade desses dois poços é de 100 m e a bomba está posicionada, em ambos, a profundidade de 36,0 m.

Poço UNA

Este poço foi concluído há mais de 14 anos e desativado há mais de 4 anos. O nível estático do mesmo é de aproximadamente 9,0 m de profundidade. Os resultados são apresentados na figura 5.3. Do mês de fevereiro a maio/85, os valores da temperatura correspondentes a cada mês são praticamente coincidentes, conforme mostra a figura 5.3. A partir do mês de maio até novembro/85 os perfis geotermiais derivam de maneira lenta, mas perfeitamente mensurável, sempre acrescentando os valores de temperatura registrada, conforme pode ser verificado nos módulos b a e da figura em pauta. Este aumento geotérmico é observado até cerca de 90,0 m de profundidade (ver módulo d da figura 5.3). O perfil geotermal referente ao mês de dezembro/85 sofreu forte decréscimo em relação ao mês anterior. Entretanto, a configuração dos valores da temperatura pertinente ao mês de janeiro/86 sofreu acréscimo, até a profundidade de aproximadamente 44,0 m, em relação a dezembro/85. Há um decréscimo sistemático dos valores da temperatura até a profundidade em torno de 36,0 m.

Próximo ao Poço UNA existem dois poços em operação, de 100 m de profundidade cada, os quais distam entre si em apenas 100,0 m. Estes poços localizam-se em torno de 130,0 e 140,0 m, respectivamente, do Poço UNA. Em ambos, a bomba está locada à profundidade de 36,0 m. Além desses dois poços há um terceiro, de profundidade de 80,0 m, distando aproximadamente 25,0 m do Poço UNA, com a bomba instalada à profundidade de 36,0 m, porém, o mesmo entra em operação somente em períodos esporádicos e por apenas algumas horas durante o dia. Este terceiro poço começou a operar após um período

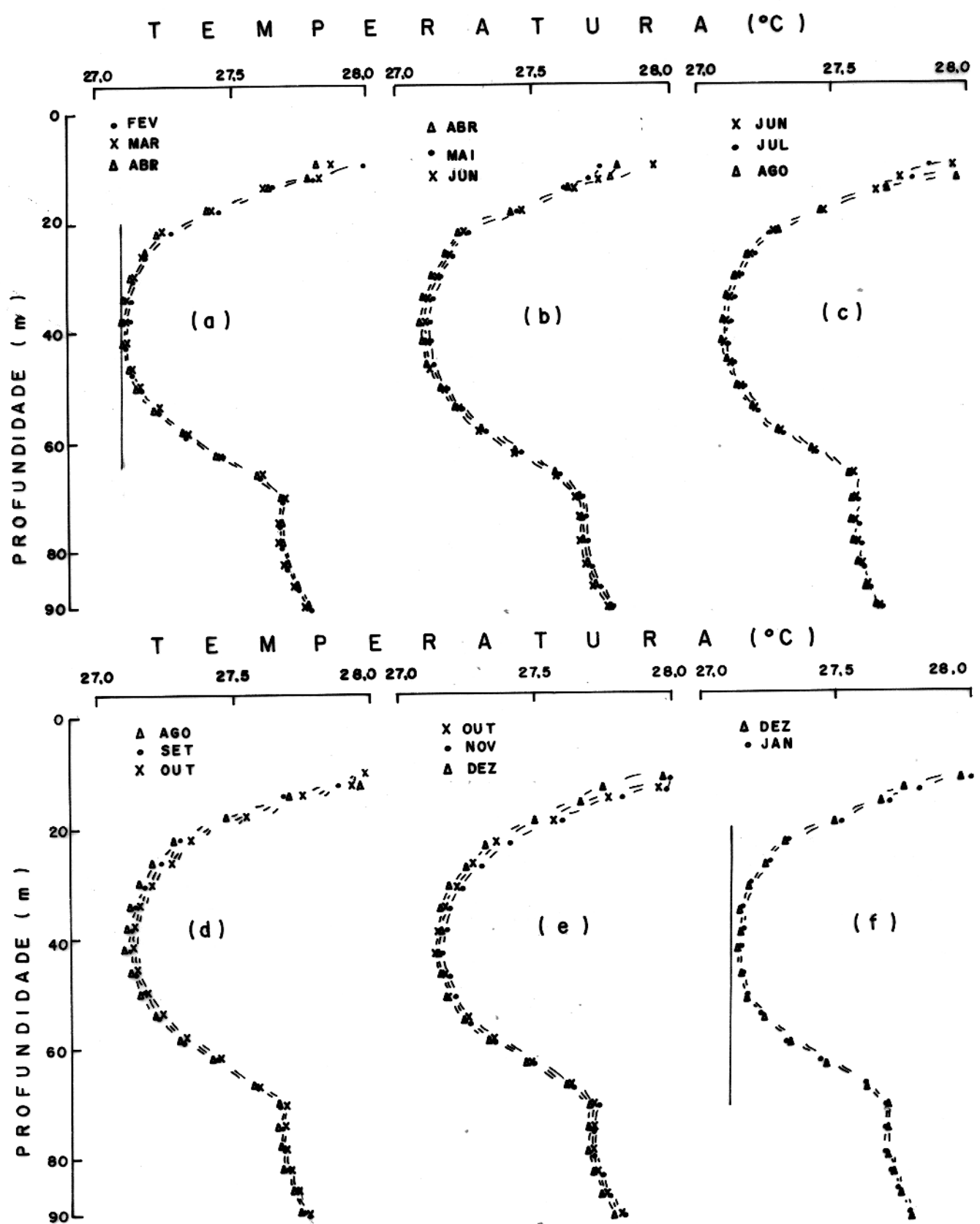


FIGURA: 5.3 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES AO POÇO (UNA), NO PERÍODO DE FEVEREIRO/85 A JANEIRO/86

superior a quatro meses após o início das nossas perfilagens no Poço UNA.

Poço MARITUBA

Este poço foi concluído há mais de 4 anos e, por causa de sua baixa potabilidade, entrou em operação apenas por um curto período de um mês, logo após sua conclusão. O nível estático deste poço está em torno de 9,0 m de profundidade. Os resultados são apresentados na figura 5.4. A distribuição dos valores da temperatura para cada mês é quase que coincidente com a do mês anterior, ou seja, os perfis geotérmicos obtidos de fevereiro/85 a janeiro/86 apresentam entre si apenas pequenas diferenças. Vale ressaltar a forte e abrupta elevação do gradiente geotermal observado em todos os módulos da figura 5.4, no intervalo de profundidade de 200,0 a 210,0 m. Outro aspecto interessante que também é registrado em todos os perfis da figura 5.4, refere-se à diminuição dos valores da temperatura até a profundidade aproximada de 60,0 m. Próximo ao Poço MARITUBA não há qualquer poço em operação.

5.3 Discussão Referente a Configuração e Evolução dos Perfis de Temperatura

A grandes profundidades, a representação gráfica de uma perfilagem geotérmica, normalmente, mostra um aumento gradual dos valores da temperatura com o incremento da profundidade. Esta configuração, entretanto, pode sofrer modificações fortemente anômalas devido a existência, em determinados níveis de profundidade, de fatores diversos tais como concentração de elementos radioativos naturais (principalmente U, Th e K), fluxo de gás natural, fraturamentos, etc... Nas camadas mais próximas à superfície terrestre, a configuração dos perfis geotérmicos sofre também outras influências. As principais fontes dessas influências são: movimento acentuado de água subterrânea e/ou pluviais, elevado grau de fraturamento e/ou inconsolidação do material geológico, variações na granulome

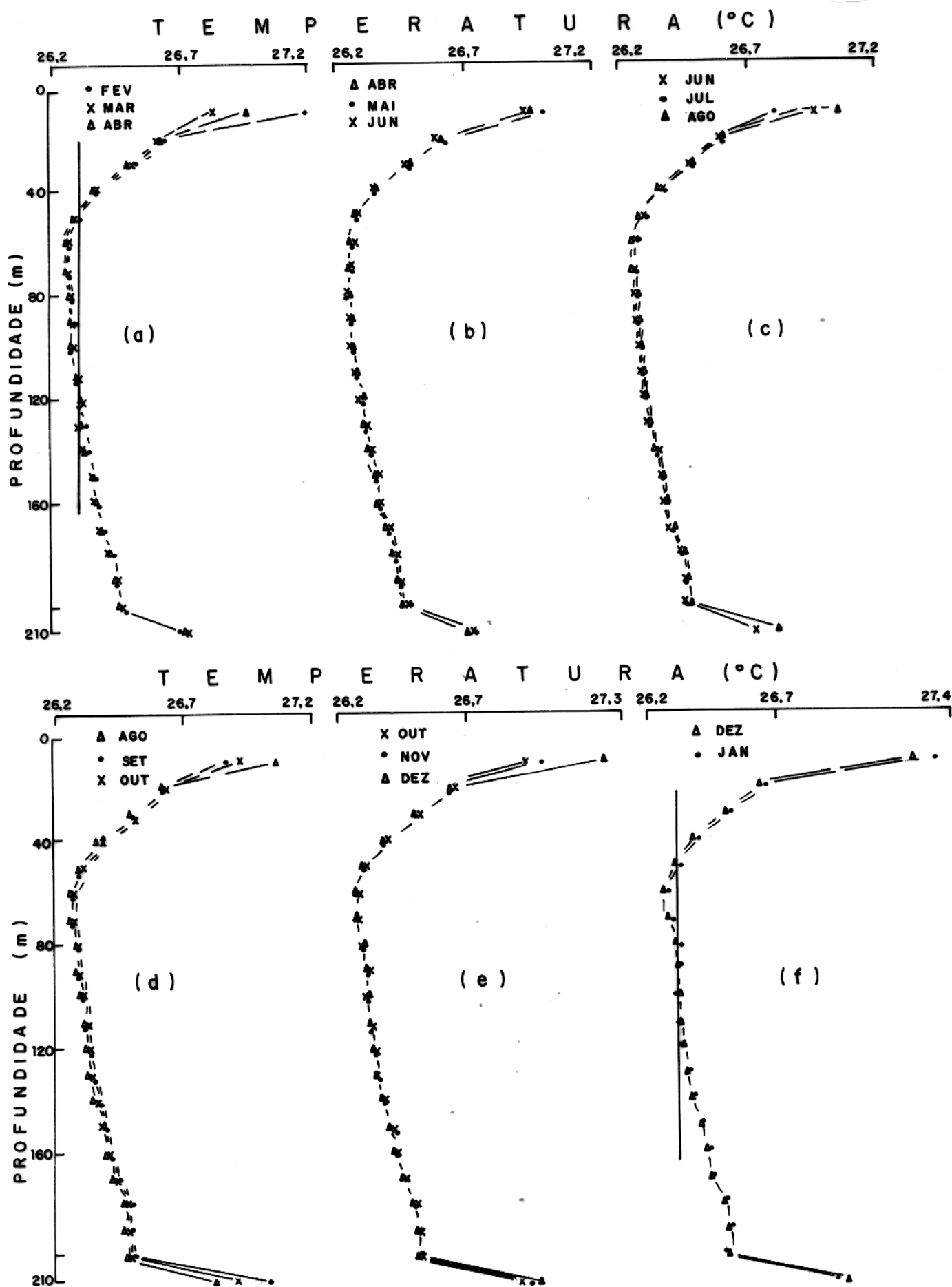


FIGURA 5.4 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES AO POÇO (MARITUBA), NO PERÍODO DE FEVEREIRO /85 A JANEIRO /86.

tria, reações químicas, flutuações do nível freático, fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo, etc... (Roy et al, 1971; Lee, 1977; Mansure e Reiter, 1979). Assim, devido a presença de um ou mais desses fatores, como também a magnitude da influência dos mesmos, dificilmente, para as camadas mais superficiais, encontraremos configurações idênticas correspondentes a perfis geotérmicos de áreas diferentes. Ocorre, inclusive com elevada frequência, que tais configurações apresentam decréscimo dos valores da temperatura com o aumento da profundidade até que, obviamente, cessem ou tornem-se insignificantes as influências mais marcantes. Uma das mais proeminentes é referente ao fluxo de radiação solar incidente, devido à elevada quantidade de energia atuante, cerca de 10^4 vezes maior que a quantidade relativa ao calor geotermal (Smith, 1973; Kappelmeyer e Haenel, 1974). Pelo acima descrito podemos entender de uma maneira genérica as causas das figuras 5.1 a 5.4 apresentarem feições bem distintas entre si, embora sejam todas representativas de perfilagens geotermiais em uma região sedimentar. Entretanto, dado aos objetivos principais deste trabalho, não nos aprofundaremos nas causas particulares que provocaram a configuração de cada perfil apresentado no item anterior.

Outra feição interessante observada nos resultados das perfilagens geotérmicas rasas concerne à existência de uma zona de fluxo de calor nulo, que denominaremos de "cotovelo", a partir da qual ocorre a inversão do gradiente de temperatura, ou seja, a partir da profundidade do cotovelo os valores da temperatura aumentam com o incremento da profundidade. Isto também é observado nos trabalhos de Araujo et al (1984) e Araujo et al (1985). Consideramos que essa configuração é causada pela influência de alguns dos fatores acima descritos os quais modificam fortemente o regime térmico a pequenas profundidades, sendo de maior proeminência a influência térmica oriunda do fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo. As variações da litologia, como também do nível freático da zona perfilada, têm papel relevante, pois pro

vocam mudanças mensuráveis na profundidade do cotovelo, devido alterarem substancialmente a eficiência no transporte do calor. Assim, nas camadas mais superficiais, que recebem maior quantidade de energia térmica devido a insolação, caso estejam saturadas de água, deverá haver uma melhor eficiência no transporte de calor como também maior será a profundidade de influência das variações térmicas superficiais. Esta ponderação é indubitavelmente verificada nos registros das figuras 5.1 a 5.4, onde a maior eficiência no transporte da energia térmica proveniente da superfície foi observada nos poços CG e IPASEP, os quais encontram-se em locais cujo nível freático está bem próximo da superfície, por volta de um e um e meio metro, respectivamente. Vale ressaltar que estamos citando o valor correspondente ao nível freático da área na qual localiza-se o poço, enquanto que no item 5.2 indicamos o valor do nível estático do poço, o qual é diferente daquele, devido o poço estar revestido, logo, sem suprimento dos aquíferos mais superficiais.

Um dos fatores mais interessantes das figuras 5.1 a 5.4 refere-se à deriva dos perfis geotérmicos, tanto no sentido de acréscimo como no de decréscimo dos valores da temperatura. Esta flutuação geotermal é, entretanto, observada de maneira sistemática em todos os poços perfilados, durante determinados períodos do ano, ou seja:

- a. há uma variação nos perfis, no sentido de aumento dos valores da temperatura, no período que compreende os meses de junho a novembro; no caso do Poço CG esta variação tem início no mês de julho, enquanto que no Poço UNA esta variação inicia-se no mês de maio (ver módulos b a e nas figuras 5.1 a 5.3);
- b. há uma variação nos perfis, no sentido de diminuição dos valores da temperatura, no período de novembro a dezembro (ver módulos e nas figuras 5.1 a 5.3);
- c. há uma variação nos perfis, no sentido de aumento dos valores da temperatura, no período de dezembro a janeiro (ver mó

dulos f nas figuras 5.1 a 5.3).

É interessante notar que a amplitude dessa flu tuação é diferente para cada figura, mas sempre mensurável. A figura 5.4, conforme ressaltamos em item anterior, não tem apre sentado flutuações geotérmicas de grande magnitude quando com paramos os perfis atinentes a um mesmo módulo. Entretanto, é im portante salientar que se compararmos os valores constantes nos módulos a e f desta figura, verificamos que os módulos também sofreram deriva no sentido do aumento dos valores da temperatu ra. Sobre este aspecto ressaltamos que se compararmos os módu los a e f de cada uma das figuras de 5.1 a 5.4 notaremos que, em todas elas, há, também, acréscimo nos valores da temperatura de até $0,11^{\circ}\text{C}.\text{ano}^{-1}$, a profundidade em torno de 63,0 m (figu ra 5.2). A fim de melhor visualizar esta pequena deriva, apre sentamos uma linha de referência nos módulos a e f dessas figu ras. Isto mostra, claramente, que a variação sazonal da tempera tura é perfeitamente observada até a profundidades superiores ao dobro dos valores atualmente constantes na literatura dispo nível (Jaeger, 1965; Courtillot e Francheteau, 1976). Acredita mos que tais discordâncias sejam causadas, fundamentalmente, por dois fatores: o primeiro é devido aos escopos dos referidos tra balhos, já que as perfilagens de temperatura, orientadas para os estudos do fluxo térmico profundo, têm início, normalmente, a profundidades da ordem ou superiores a 40,0 m; o segundo re fere-se às condições meteorológicas reinantes na Região Amazôni ca. Consideramos que esta deriva resultante dos perfis geo térmicos, após o período de um ano, seja provocada pelo proces so de aquecimento das camadas mais superficiais, processo este provocado pela diminuição gradativa do índice de proteção ao fluxo de radiação solar incidente na área em estudo. Processo semelhante foi registrado por Roy et al (1971) que determinaram um acréscimo nos valores da temperatura média anual, da ordem de 5°C em um período de 50 anos (cerca de $0,1^{\circ}\text{C}.\text{ano}^{-1}$), para a região de Cambridge, Massachusetts (USA). Conforme esses au tores, tal acréscimo foi decorrente da construção de edifícios na região em pauta.

Conforme já ressaltamos, as flutuações observadas nos perfis de temperatura ocorrem de maneira sistemática, logo, devem ser oriundas de uma fonte termal que libere energia de forma também coerente. Como as principais fontes de calor no interior da Terra (radiogênico, residual, reações químicas exotérmicas) não satisfazem as condições supra citadas, consideramos que tal fonte seja de origem externa, ou seja, o fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo. Esta fonte se enquadra perfeitamente à premissa da sazonalidade, ou seja, sua magnitude termal varia sistematicamente ao longo do ano. A figura 4.8 apresenta as variações do fluxo de radiação solar global incidente ao longo do período atinente a este trabalho. Conforme podemos claramente observar na figura 4.8, o período de maior radiação incidente coincide exatamente com aquele em que ocorre deriva dos perfis geotérmicos no sentido de aumento dos valores da temperatura. O período de menor magnitude do fluxo de radiação solar também coincide com aquele em que há pequenas oscilações aleatórias dos perfis geotérmicos ou desvio destes no sentido de diminuição dos valores da temperatura. As reações químicas exotérmicas não podem ser causadoras da deriva dos perfis geotérmicos, devido a tal geração de calor ocorrer de maneira não sazonal. Além disso, tal fonte de calor provocaria uma anomalia térmica localizada, não explicando conseqüentemente, a deriva de todo o perfil conforme se observa.

5.4 Configuração Térmica de Outros Poços Perfilados

Conforme ressaltamos em item anterior, as perturbações térmicas, geradas pelo fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo, constituem o principal fator responsável pela configuração dos perfis geotérmicos apresentados nas figuras 5.1 a 5.4. Devido a essa influência ter seu valor máximo na superfície terrestre e diminuir fortemente com o incremento da profundidade é perfeitamente explicado o fato de que os perfis geotérmicos rasos apresentem, em sua parte superior, uma deflexão no sentido do aumento, ou diminuição, dos valores da

temperatura, conforme mostrado nas figuras 5.1 a 5.4.

Assim sendo, a supra mencionada configuração não representa uma característica apenas da região em estudo. Portanto, configurações similares devem ser obtidas para outras áreas nas quais sejam realizadas perfilagens geotérmicas a essas profundidades. A fim de ratificarmos este parecer, apresentamos os perfis geotérmicos representativos de trinta e um poços situados em diferentes localidades. Os dados referentes a identificação destes poços são apresentados na tabela 5.1, enquanto que os perfis de temperatura são mostrados nas figuras 5.5 a 5.8. Com exceção dos poços 15, 29, 30 e 31, todos os demais foram plotados apenas até a profundidade de 70,0 m.

A figura 5.5 apresenta os perfis geotérmicos relativos aos poços 1 a 6, os quais estão locados na região metropolitana de Belém.

A figura 5.6 mostra os perfis geotérmicos alusivos aos poços 7 a 12, os quais localizam-se na região de Barcarena (PA), e ao poço 13 que foi perfilado na região de Mosqueiro (PA).

Os perfis geotérmicos publicados na literatura são vistos nas figuras 5.7, a qual contém os poços 14 a 20, e 5.8 que expõe os poços 21 a 31. Os poços 14 a 28 estão localizados em território nacional, enquanto que o poço 29 localiza-se nos Estados Unidos e os poços 30 e 31 estão locados em território francês.

Conforme podemos concluir com base nos registros das figuras 5.5 a 5.8, a deflexão da parte superior dos perfis de temperatura resultantes não é realmente uma característica da região metropolitana de Belém, nem tão pouco da Região Amazônica. Tal deflexão constitui uma característica da influência da perturbação térmica, gerada na superfície terrestre pelo fluxo de radiação solar incidente sobre os valores

TABELA: 5.1 - Identificação dos Poços "1" a "31"

Nº	CÓDIGO DO POÇO	LOCAL	REFERÊNCIA
01	TAPAJÓS 2	BELEM	PRESENTE TRABALHO
02	TAPAJÓS 1	"	"
03	AMASA	"	"
04	COOHASPA 2	"	"
05	COMINE	"	"
06	14 DE ABRIL	"	"
07	24 (A)	BARCARENA (PA)	"
08	25 (B)	"	"
09	21 (B)	"	"
10	I	"	"
11	J	"	"
12	L	"	"
13	MOSQUEIRO	MOSQUEIRO (PA)	"
14	JA-1	JAÚ (SP)	HAMZA et al(1978)
15	CLP-8	JACOBINA (BA)	"
16	DDH-11	NIQUELÂNDIA (GO)	"
17	COLABA	NUPORANGA (SP)	YAMABE (1985)
18	C.CAMPO	"	"
19	PREFEITURA	"	"
20	MANAUS-- 2	MANAUS (AM)	ARAÚJO e SILVA(1982)
21	DO-1	DOURADOS (SP)	HAMZA et al (1978)
22	OL-1	OLÍMPIA (SP)	"
23	UC-1	UCHOA (SP)	"
24	LM-33	LAURO MÜLLER (SC)	"
25	F3A1-2	C.de ITAPEMIRIM (ES)	"
26	C-712-404-01	CENTRALINA (MG)	"
27	C-126-02	CAPINÓPOLIS (MG)	"
28	C-007-01	A.COMPRIDA (MG)	"
29	CAMBRIDGE	CAMBRIDGE (USA)	ROY et al (1971)
30	S7	LAMA (FRANÇA)	LESQUER et al (1983)
31	S10	LURI (FRANÇA)	"

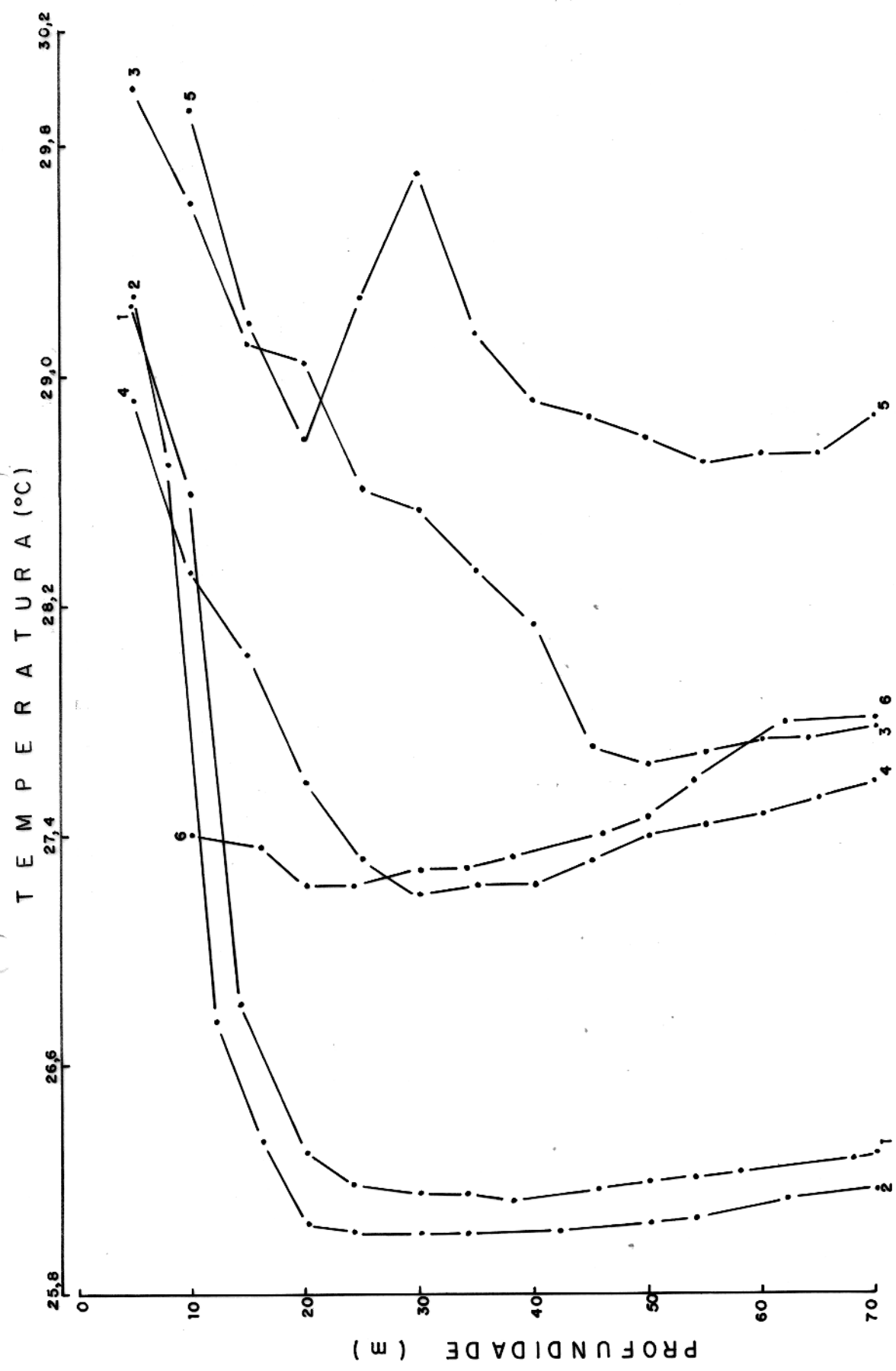


FIGURA : 5.5 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES A SEIS POÇOS LOCALIZADOS NA REGIÃO DE BELÉM (PA) .
(OS NÚMEROS CORRESPONDEM A IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS)

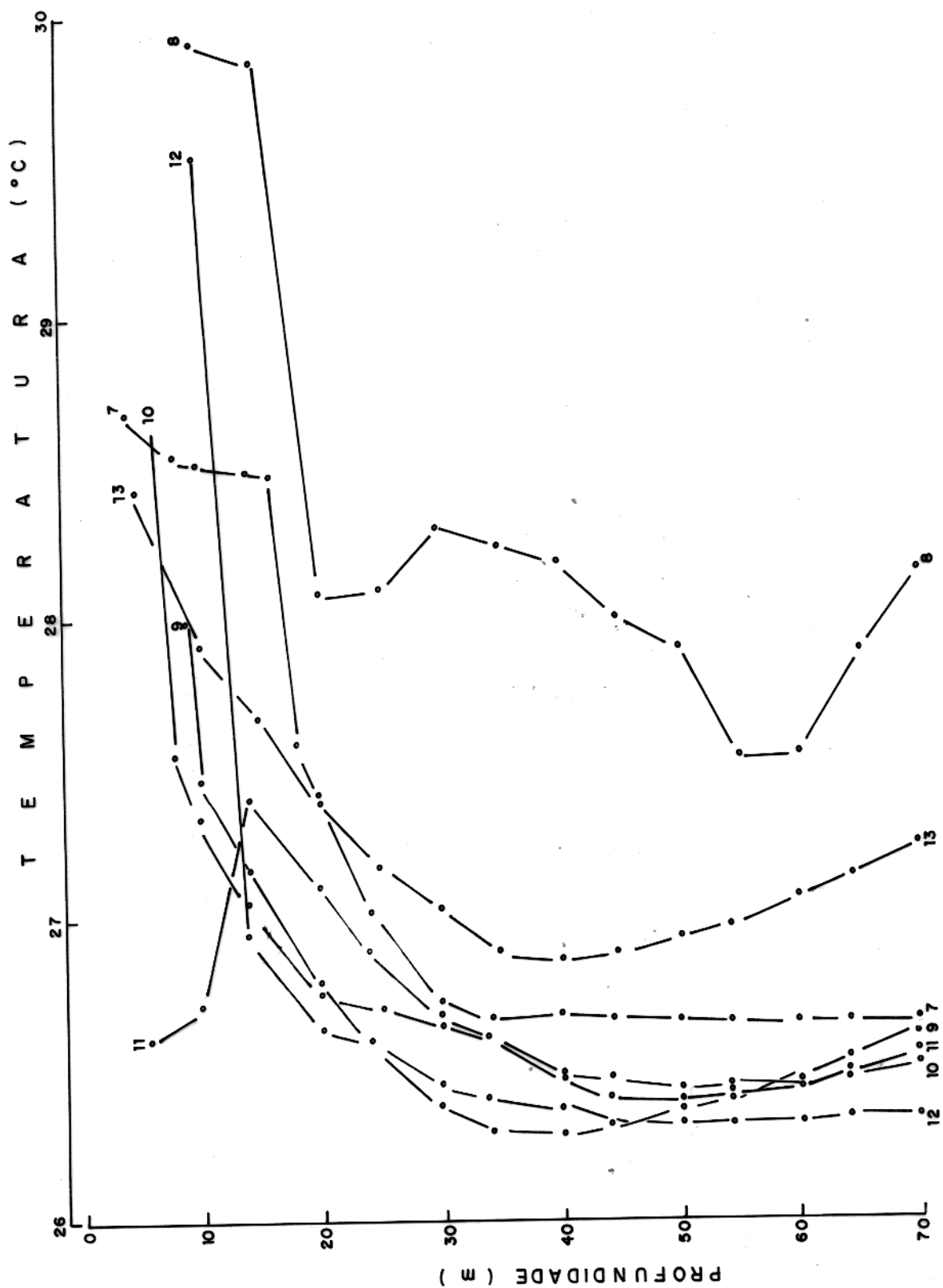


FIGURA 5.6 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES A SEIS POÇOS LOCALIZADOS NA REGIÃO DE BARCARENA(PA) E UM NA REGIÃO DE MOSQUEIRO (PA) (OS NÚMEROS CORRESPONDEM A IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS)

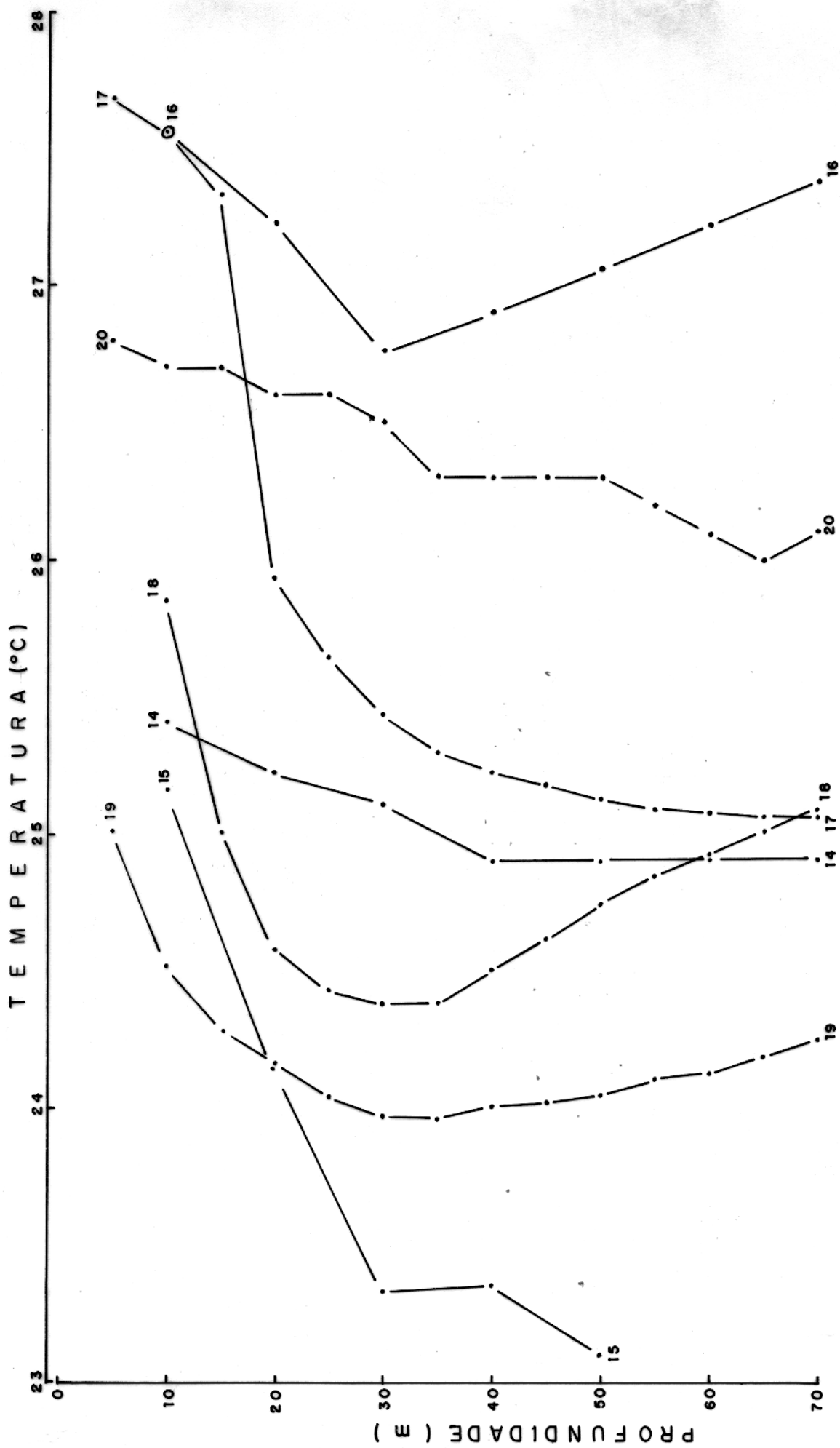


FIGURA : 5.7 - PERFIS DE TEMPERATURA PUBLICADOS NA LITERATURA .
(OS NÚMEROS CORRESPONDEM A IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS)

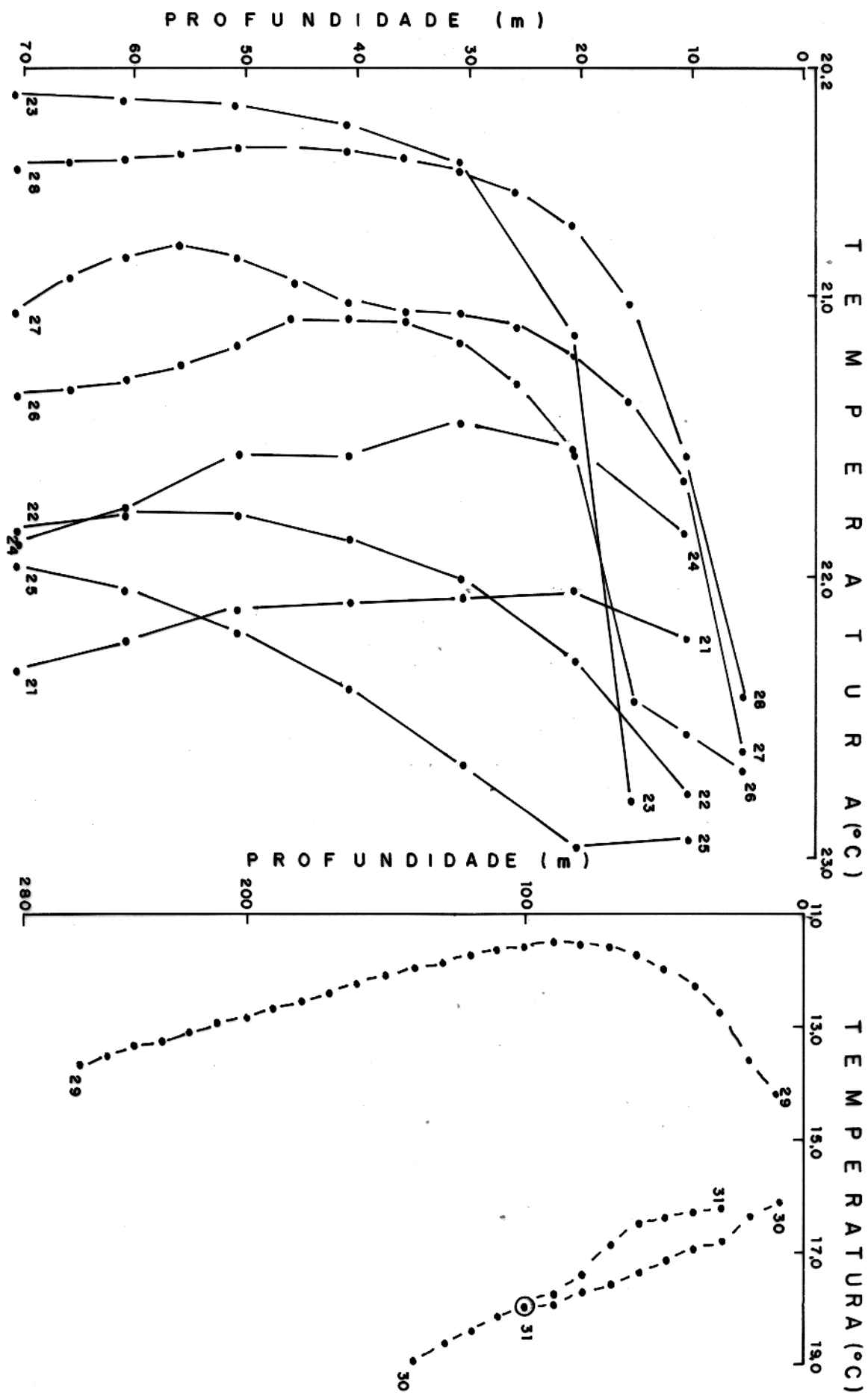


FIGURA 5.8 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES A ONZE POÇOS PUBLICADOS NA LITERATURA (OS NÚMEROS CORRESPONDEM A IDENTIFICAÇÃO DOS POÇOS)

da temperatura correspondentes a pequenas profundidades. Assim sendo, quanto menor for o grau de proteção a esse fluxo de radição, maior será a magnitude de tal perturbação térmica, consequentemente, sua influência será mais marcante e poderá ser observada a maiores profundidades.

5.5 Possíveis Fontes de Perturbações Sobre os Perfis Geotérmicos Observados

Segundo o exposto neste capítulo, a configuração dos perfis geotérmicos apresentados nas figuras 5.1 a 5.4 é fundamentalmente influenciada pela perturbação térmica oriunda do fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo. Esta influência ocorre com tamanha predominância, repetimos, ao ponto de que tal configuração constitui-se uma característica dos resultados encontrados nos estudos de geotermia rasa.

Entretanto, o aspecto de um perfil geotérmico raso poderá sofrer, também, outros tipos de perturbações, conforme descrito anteriormente. Uma análise sobre diversos tipos de fontes de perturbações térmicas, que poderiam influenciar os perfis geotermiais mostrados no item 5.2 é dada a seguir.

5.5.1 Movimento de Água Subterrânea

O movimento de água subterrânea poderá alterar fortemente e de diversas maneiras, o aspecto de um perfil geotermal (Roy et al, 1971; Lesquer et al, 1983). Assim sendo, foi realizado um experimento visando assim definir até que ponto a presença de poços em bombeamento, nas cercanias de alguns poços de observações, poderiam afetar nossos resultados. Outros sim, considerando a distância de cerca de 500 m do poço CG até as margens do rio Guamã, era preciso verificar-se a presença deste grande curso de água poderia afetar nossas medidas nesse poço em particular.

O experimento foi realizado nos meses de sentembro e outubro/86, em três etapas sucessivas, utilizando-se fundamentalmente o Poço CG e o Furo (4) os quais distam entre si aproximadamente 2,5 m. No Furo (4) foram fixados três sondas de termistor a profundidades de 1,0, 2,0 e 12,0 m, conforme descrito no item 2.1.2.

Na primeira etapa foi instalada no Poço CG uma bomba d'água, tipo centrífuga, de potência de 1,5 HP, ficando a válvula a apenas 8,5 m de profundidade. A bomba permaneceu ligada durante um período de 48 h, das 10:00 h do dia 11/09 às 10:00 h do dia 13/09, com uma vazão da ordem de $5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Durante este intervalo de tempo foi efetuado um monitoramento térmico utilizando-se as três sondas instaladas no Furo (4). A fim de compararmos os dados do monitoramento térmico obtidos durante o processo de bombeamento do Poço CG com os adquiridos em período no qual não houve atividade de bombeamento, foram também realizadas medidas de temperatura logo após o desligamento da bomba d'água, dia 13/09 e, ainda, nos dias 15, 16, 18, 19, 22 e 23/09. Os resultados desta etapa são mostrados na figura 5.9. Na presente etapa, o nível dinâmico do poço CG, atingiu a profundidade de 7,5 m.

A fim de ratificar os resultados obtidos na primeira etapa, foram efetuadas mais outras duas.

Na segunda etapa foi instalado no Poço CG um compressor, de potência de 15 HP, cuja válvula foi fixada a profundidade de 24,0 m. O compressor permaneceu ligado ininterruptamente, por um período de 48 h, com uma vazão aproximada de $45 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Nesta etapa, o processo de monitoramento térmico foi realizado também em dois períodos distintos, a saber: antes da atividade de bombeamento, nos dias 29 e 30/09, e durante o bombeamento, nos dias 02 a 04/10. Os resultados desta etapa são apresentados nos módulos a e b da figura 5.10. Nesta etapa, o nível dinâmico do poço CG atingiu a profundidade de 10,9 m.

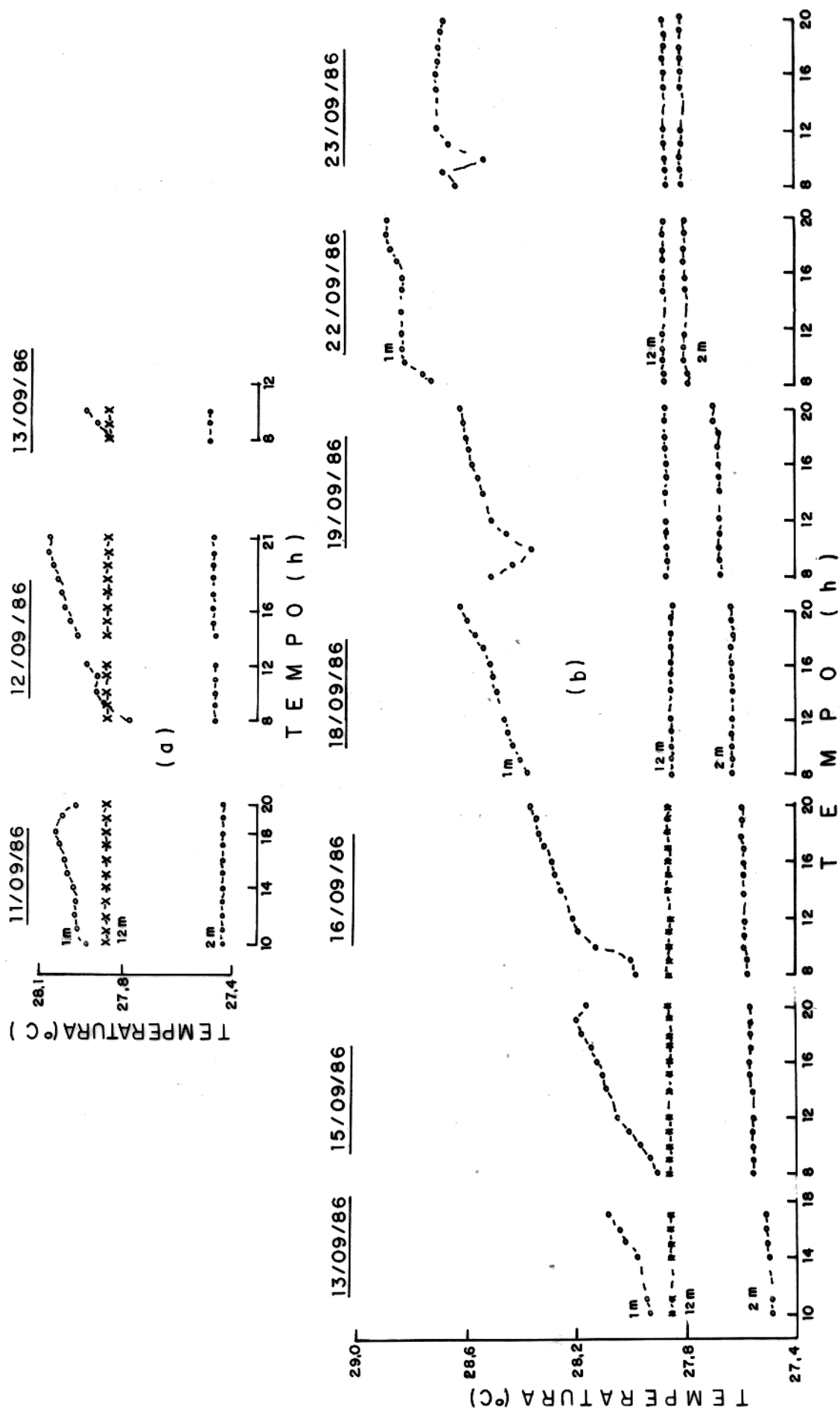


FIGURA : 5.9 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS PERFS DE TEMPERATURA REFERENTES AO FURO (4), ESTANDO A BOMBA D'ÁGUA NO POÇO C.G. (a) LIGADA E (b) DESLIGADA.

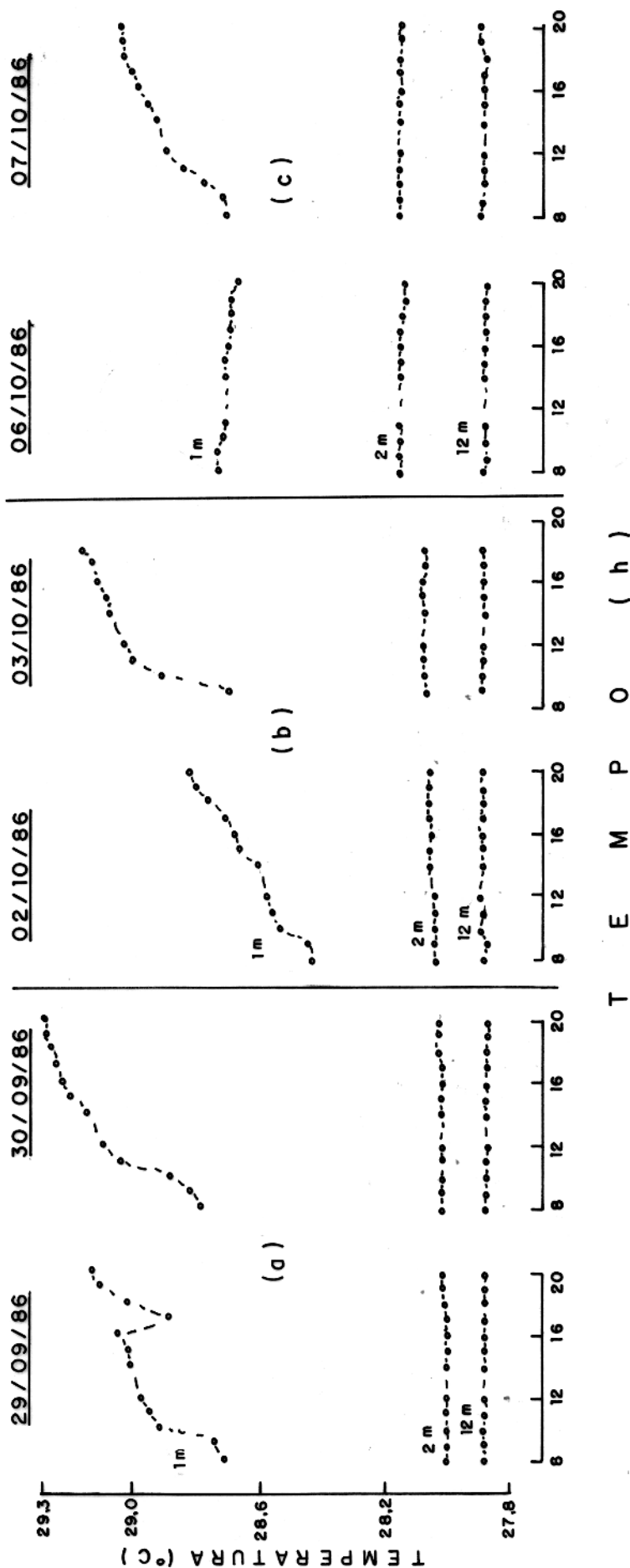


FIGURA : 5.10 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES AO FURO (4), ESTANDO O COMPRESSOR NO POÇO (CG) (a) DESLIGADO; (b) LIGADO; (c) SENDO LIGADO E DESLIGADO ALTERNADAMENTE EM INTERVALOS DE UMA HORA.

Na terceira etapa o compressor permaneceu instalado no Poço CG, nas mesmas condições da etapa anterior, porém, o mesmo foi ligado e desligado alternadamente em intervalos de 1 h durante os dias 06 e 07/10. Os resultados desta etapa são mostrados no módulo c da figura 5.10.

Um fato interessante a ser observado nas figuras 5.9 e 5.10 é que os valores da temperatura registrados a profundidades de 2,0 e 12,0 m indicam que os perfis geotérmicos do Furo (4) não sofreram influência das atividades de bombeamento realizadas no Poço CG. As mudanças térmicas registradas a essas profundidades são consideradas explicáveis devido a fonte de aquecimento da superfície. Não ocorreu portanto, qualquer anomalia térmica durante os períodos anterior, durante e posterior a atividade de bombeamento, nem tampouco, durante a fase em que o compressor foi ligado e desligado alternadamente.

As fortes variações dos valores da temperatura registradas a profundidade de 1,0 m, também não podem ser analisadas como consequentes do processo de bombeamento no Poço CG. Observemos nas figuras 5.9 e 5.10 que os valores da temperatura variam ao longo do dia de maneira também considerada normal, ou seja, independentemente da fase deste experimento. A figura 5.11 mostra a variação diária do fluxo de radiação solar incidente em Belém, durante o período referente a este experimento. Através desta figura podemos, então, entender e explicar o comportamento dos perfis geotermiais registrados nas figuras 5.9 e 5.10. Nos dias 11/09, 23/09 e 06/10 foram registrados os menores índices de radiação solar incidente e, também, as menores variações da temperatura; inclusive, no dia 06/10, no qual se registrou o menor índice diário de radiação incidente, em torno de 201 W.m^{-2} , os valores da temperatura a 1,0 m de profundidade decresceram durante o dia. De maneira inversa, o período de 12 a 22/09 é caracterizado por elevados índices diários de radiação incidente e, também, pelo acréscimo sistemático dos valores da temperatura registrados a 1,0 m de profundidade. No dia 23/9 houve um forte decréscimo do valor de fluxo de radiação, o que implica em diminuição dos valores da temperatura a

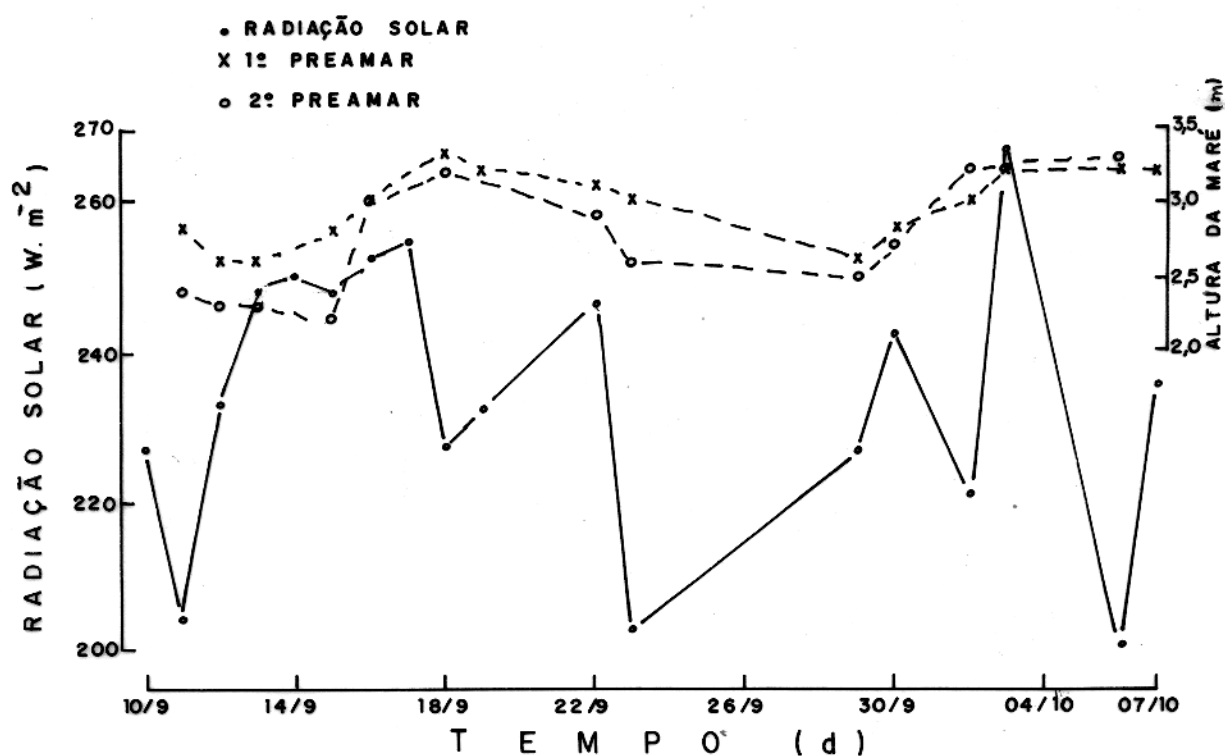


FIGURA: 5.11 - VARIAÇÃO DIÁRIA DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE E DA ALTURA DA MARÉ, RELATIVA AOS MESES DE SETEMBRO E OUTUBRO/1986.

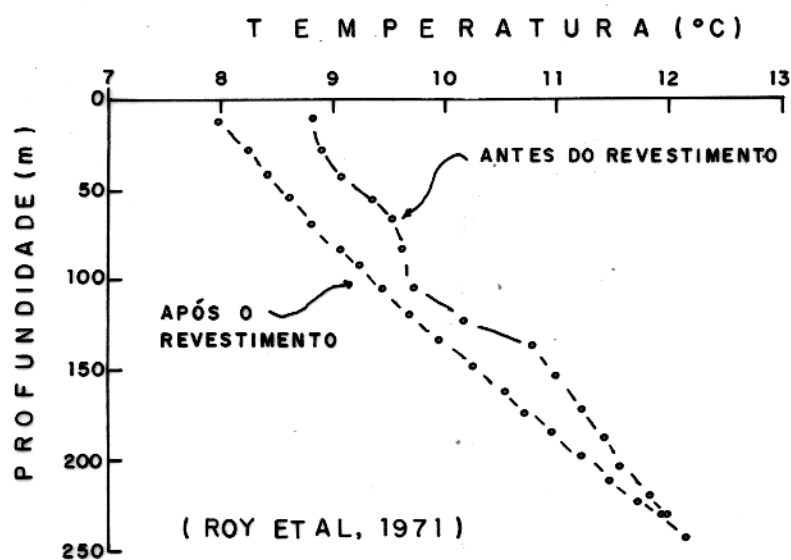


FIGURA: 5.12 - PERFIS DE TEMPERATURA REFERENTES AO MESMO POÇO, ANTES E APÓS SEU REVESTIMENTO.

1,0 m de profundidade. No dia 03/10 ocorreu um aumento abrupto nos valores da temperatura e, também, se registrou o maior índice diário do fluxo de radiação solar incidente durante este experimento, cerca de 267 W.m^{-2} .

Durante este experimento foram instalados no Furo (11), distante de 7,0 m do Poço CG, duas sondas de termistor ora a profundidades de 10,0 e 20,0 m ora a profundidades de 4,0 e 6,0 m (vide seção 2.1.2). As variações térmicas observadas durante o referido experimento também não podem ser apontadas como derivadas do processo de bombeamento no Poço CG.

Foram obtidos junto à Companhia Docas do Pará os registros diários das alturas das marés na cidade de Belém, não somente para o período referente a este experimento, mas, também, para todo aquele concernente a este trabalho. As variações diárias destes dados não apresentaram qualquer relacionamento com as mudanças nos valores dos perfis geotermiais obtidos no período referente a este experimento (ver figura 5.11), nem quanto ao atinente a um ciclo de um ano.

Em 1971, Roy et al publicaram um trabalho no qual apresentam a configuração de um perfil geotérmico perturbado pela influência de movimento de água subterrânea. Conforme estes autores, o processo de revestimento do poço eliminou tal perturbação. A figura 5.12 constitui uma cópia da apresentada no trabalho supra citado, na qual observamos as configurações dos perfis geotermiais antes e após o revestimento. Lee (1977) obteve gradientes regionais confiáveis através de perfis geotérmicas em furos rasos, utilizando também a técnica de revestir os poços em estudo.

A configuração de um perfil geotérmico perturbado por movimento de água subterrânea é caracterizada, fundamentalmente, pela distribuição não linear dos valores da temperatura em função da profundidade do poço. Sendo esta caracterização mais acentuada nos níveis de profundidade em que o

poço é mais fortemente influenciado. Assim sendo, os aspectos das figuras 5.1 a 5.4 nos indicam que tais perfis não foram perturbados por movimento de água subterrânea; principalmente, pelo fato de que tais perfis não apresentam fortes anomalias térmicas localizadas e, ainda, pelo fato de que as suas derivas sazonais não podem ser explicadas como sendo oriundas de tais perturbações térmicas. Entretanto, tais derivas são perfeitamente explicadas quando as relacionamos com as mudanças do fluxo de radiação solar incidente na área em estudo.

O experimento referido neste item nos mostra também que o aspecto dos perfis registrados nas figuras 5.1 a 5.4, como também a deriva sazonal destes, não estão afetadas pela atividade de bombeamento realizada em poços próximos. Consideramos que esta falta de influência é devida, fundamentalmente, ao fato de que todos os poços estudados estarem totalmente revestidos.

Para ilustrar e comparar, resolvemos verificar o desequilíbrio térmico de um poço, provocado pela atividade de bombeamento no mesmo e, ainda, o retorno ao seu estado de equilíbrio térmico após o final dessa atividade perturbadora. Para tanto, foi instalada no poço CG uma bomba d'água, tipo centrífuga, a qual permaneceu ligada no período das 10:30 h do dia 11/09 às 10:50 h do dia 13/09/86. Foram então efetuadas perfilagens geotérmicas neste poço, nos períodos anterior e posterior a atividade de bombeamento. Os resultados auferidos são mostrados no módulo a da figura 5.13. A fim de ratificarmos tais resultados, repetimos a operação de bombeamento no poço CG porém, agora, utilizando um compressor como bomba propulsora. O compressor permaneceu ligado no período das 8:30 h do dia 02/10 às 8:30 h do dia 04/10/86. Foram também realizadas perfilagens de temperatura nos períodos anterior e posterior a atividade de bombeamento. Os resultados obtidos nesta fase são apresentados no módulo b da figura 5.13.

Notemos pois, como tal processo perturba o perfil geotérmico do poço bombeado, que retorna às suas condi

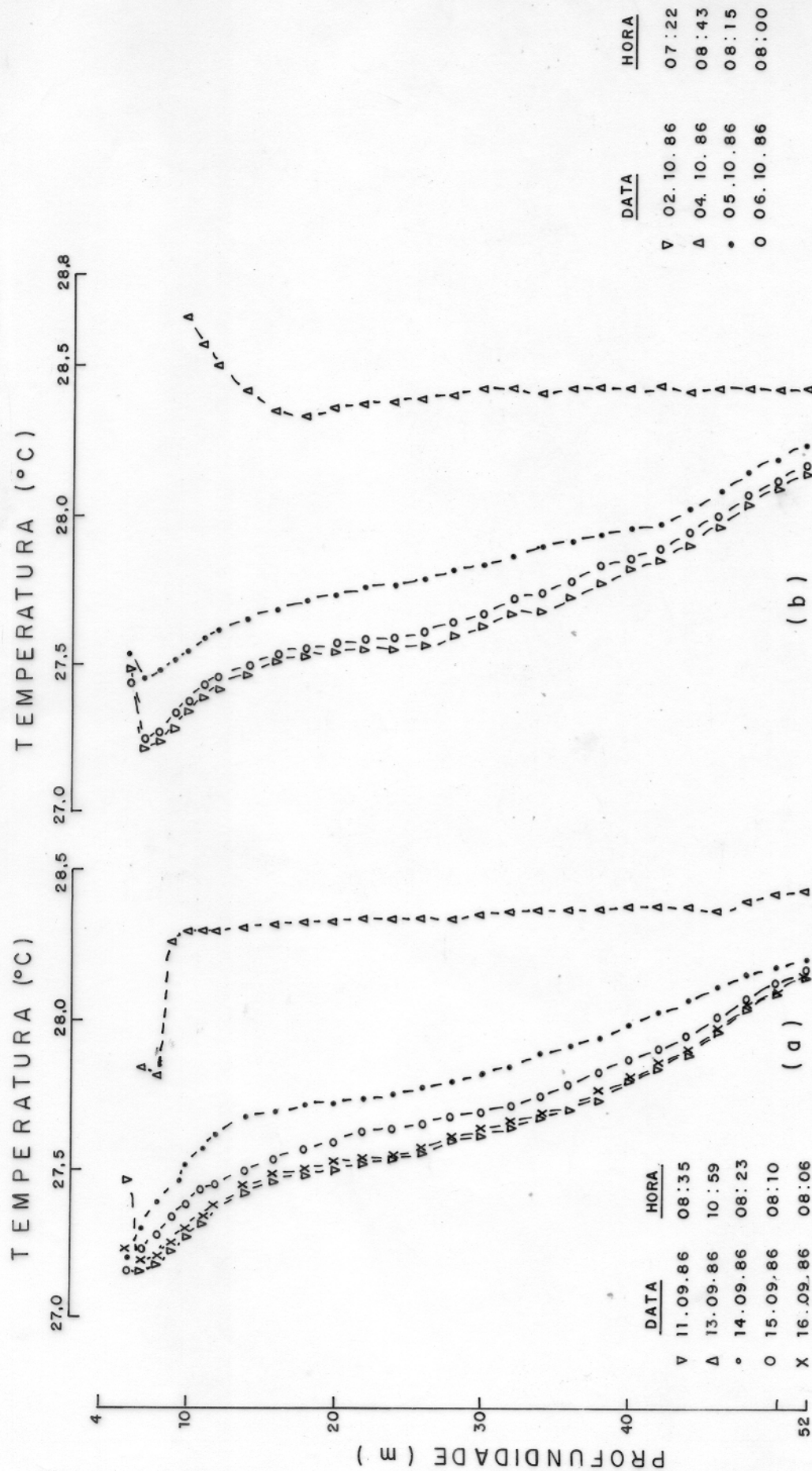


FIGURA : 5.13 - PERFIS DE TEMPERATURA, REFERENTES AO POÇO, (C.G.), ALTERADAS DEVIDO AO PROCESSO DE BOMBEAMENTO.

ções de equilíbrio térmico em período da ordem de três dias após ter cessado a atividade de bombeamento. A maneira como os perfis geotérmicos registrados na figura 5.13 derivam em direção ao perfil de equilíbrio térmico, ratifica o fato de que os mesmos não estão sendo afetados por movimento de água subterrânea.

Os perfis de temperatura referentes aos dias 13/9 e 04/10/86, apresentados na figura 5.13, nos mostram de maneira indubitável que a água bombeada do poço CG provém de um mesmo aquífero, localizado a profundidade superior a 52,0 m. A maneira como esses perfis de temperatura retornam às suas respectivas condições de equilíbrio térmico denota, também, que o poço CG não é abastecido por água proveniente de aquíferos localizados a profundidades inferiores ao do acima citado. Isto deve-se ao fato de que a área em estudo é constituída por uma intercalação de camadas fundamentalmente arenosa ou argilosa ou, ainda, com teores próximos de areia e argila (ver item 3.3). Consequentemente, as camadas impermeáveis essencialmente argilosas não permitem a intercomunicação de aquíferos localizados a profundidades diferentes. Esta intercomunicação entre os aquíferos também não pode ser realizada através do poço CG, devido o mesmo encontrar-se totalmente revestido. Assim sendo, mesmo que ocorra movimento de água subterrânea, tal movimento não estaria afetando os perfis geotérmicos atinentes ao poço em questão, não havendo troca de calor pelas águas localizadas em aquíferos a diferentes profundidades. Santos et al (1986) desenvolveram um método através do qual obtém-se valores precisos de fluxo geotérmico utilizando-se poços tubulares em plena atividade de bombeamento de água subterrânea, no entanto para a aplicação desse método é imprescindível que o aquífero abastecedor do poço em estudo esteja confinado por camadas impermeáveis.

5.5.2 Erro de Medida

Em virtude do presente trabalho envolver pequenas flutuações dos valores de temperatura, consideramos importante discutir o erro das medidas.

A precisão de uma medida refere-se ao somatório de todos os erros parciais, admitindo o caso máximo no qual em uma determinada medida todos esses erros parciais sejam somados.

Assim, é possível que uma determinada variação, cuja magnitude seja da ordem da precisão das medidas, pode ser utilizada para análises precisas. Quando ocorrer flutuações sempre em um determinado sentido e de acordo com o que seria esperado, não podemos atribuir tais flutuações apenas a imprecisão das medidas, pois caso fossem devidas ao erro oriundo da precisão, tais influências poderiam ser tanto positivas como negativas. Por tudo isso é que consideramos que as flutuações geotérmicas registradas nas figuras 5.1 a 5.4, mesmo aquelas da ordem da precisão já mencionada são consideradas verdadeiras, pelo simples fato de serem sistemáticas e apresentarem comportamento previsto e lógico, ou seja: maior quantidade de radiação solar incidente na superfície da área em estudo resultará tanto em maior magnitude da flutuação nos valores de temperatura, como também maior será a profundidade de influência. Obviamente, esta influência será mais marcante nas camadas superiores.

5.5.3 Atividade de Perfuração

Os resultados de uma perfilagem geotérmica realizada logo após o término da atividade de perfuração de um poço estão, normalmente, influenciados por perturbações térmicas oriundas essencialmente de duas fontes distintas. A primeira constitui o calor gerado pela broca perfuratriz, a segunda é referente ao volume, qualidade e temperatura do fluido utilizado para refrigeração da broca perfuradora. Conforme Kappelmeyer e Haenel (1974), as partes superiores do poço são aquecidas enquanto que as inferiores são refrigeradas devido a essas fontes.

Conforme Bullard (1947), um furo retorna às suas condições de equilíbrio térmico, com uma margem de variação de $\pm 1\%$, após um intervalo de tempo da ordem de dez vezes o período decorrido na atividade de perfuração. Conforme Lachenbruch e Brewer (1959), os valores de temperatura, medidos após um período de apenas três vezes aquele gasto no processo de perfuração, estão dentro de uma margem de tolerância de apenas $0,05^{\circ}\text{C}$. Conforme Jaeger (1961) caso o poço encontre-se localizado em formações impermeáveis e tenha sido água o fluido refrigerador da broca perfuratriz, os gradientes de temperatura podem ser obtidos, com uma tolerância de 5% , dois dias após o término da atividade de perfuração.

Dado ao fato de que os perfis geotérmicos registrados nas figuras 5.1 a 5.4 serem referentes a poços desativados há

mais de quatro anos, podemos considerar que tais perfis não estão influenciados pelas perturbações térmicas geradas durante o processo de perfuração.

5.5.4 Deriva dos Termistores

Os termistores apresentam um incremento considerável do secular, de sua resistência, o que equivale a um decréscimo no valor da temperatura medida utilizando-se a mesma curva de calibração. Entretanto, a deriva dos termistores utilizados nos estudos geotérmicos só constitui elevada fonte de erro quando estes termômetros sofrem fortes choques mecânico e/ou térmico, ou ainda, quando não são recalibrados por longos períodos de tempo.

Conforme Robertson et al (1966), os resultados experimentais acumulados em treze anos permitem considerar que os termistores preparados para investigações geotérmicas, submetidos a temperatura de 30 °C, apresentam uma deriva mensal da ordem de $(-4,22 \times 10^{-3}) \pm (2,92 \times 10^{-3})$ °C.

A mudança da resistência do termistor com a pressão é insignificante. Conforme Robertson et al (1966), esta mudança é negativa e atinge valores de somente -10^{-7} ohm.bar⁻¹.

Os perfis geotérmicos mostrados nas figuras 5.1 a 5.4 foram obtidos utilizando-se uma sonda de termistor que foi recalibrada a cada intervalo de tempo de seis meses. Portanto, o erro acumulado esperado seria da ordem de $-0,025 \pm 0,018$ °C.

Os termistores utilizados no monitoramento térmico no Furo (3) foram recalibrados somente após o período de um ano de medidas. Assim sendo, o erro acumulado seria de $-0,050 \pm 0,035$ °C.

Essas pequenas derivas, sempre no sentido de diminuição dos valores da temperatura, obviamente não explicam as feições nem tampouco as oscilações dos perfis geotérmicos apresentados neste trabalho.

5.6 Fluxo de Calor a Profundidade de 40 m

Conforme ressaltamos anteriormente, os trabalhos direcionados ao estudo do fluxo térmico terrestre profundo iniciam-se, normalmente, a profundidades em torno de 40 m. Assim sendo, os valores deste parâmetro físico obtido em tais estudos não são referentes à superfície terrestre e sim à profundidade na qual têm início tais estudos.

Os resultados dos estudos geotérmicos efetuados no Poço CG, durante o período concernente a este trabalho, nos fornece os seguintes valores representativos da região metropolitana de Belém.

$$G = 0,0254 \pm 0,0007^{\circ}\text{C.m}^{-1}$$

$$\lambda = 1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$$

$$Q_0 = 42,16 \pm 1,14 \text{ mW.m}^{-2}$$

sendo;

G - gradiente geotérmico médio a profundidade de 40 m

λ - condutividade térmica média da região em estudo

Q_0 - fluxo de calor médio a 40 m de profundidade

Carvalho et al (1986) obtiveram para a Bacia do Médio Amazonas os seguintes valores:

$$G = 22,3^{\circ}\text{C.km}^{-1} \quad (\text{os gradientes variaram de } 8,3 \text{ a } 47,0^{\circ}\text{C.km}^{-1})$$

$$\lambda = 1,973 \text{ W.m}^{-1}.\text{C}^{-1}$$

$$Q_0 = 44 \text{ mW.m}^{-2}$$

Vitorello (1978) obteve para três lugares situados no Craton São Francisco, compreendendo rochas com idades do Ciclo Transamazônico ou mais antigas, um valor médio do fluxo térmico terrestre da ordem de $41,8 \pm 4,6 \text{ mW.m}^{-2}$.

Conforme Ferreira (1972), Almeida et al (1977), Almeida (1978) e outros, o Ciclo Transamazônico retrabalhou eficientemente o embasamento cristalino da região em estudo. Este evento termotectônico tem idade variando de 1,8 a 2,1 x 10⁹ anos (Almeida e Hasui, 1984). Esta faixa etária, plotada na curva que correlaciona os valores de fluxo térmico terrestre com a idade do embasamento (Chapman e Furlong, 1977), corresponde a uma variação de 47 a 48 mW.m⁻².

Pelo acima exposto consideramos que o valor do fluxo de calor obtido a profundidade de cerca de 40 m no Poço CG, realmente representa o valor do fluxo térmico terrestre profundo, Q_0 , correspondente a região metropolitana de Belém. Portanto, através de estudos orientados à geotermia rasa, consequentemente utilizando poços de pequena profundidade, é possível também obter o valor correspondente ao fluxo térmico emanado do interior da Terra. As pesquisas de geotermia rasa nos fornecem então, resultados os quais podem ser utilizados tanto para estudos acerca do fluxo térmico terrestre profundo como, também, para estudos ambientais ocorrentes na biosfera terrestre.

Conforme ressaltamos anteriormente, as perturbações térmicas superficiais, originadas pelo fluxo de radiação solar incidente, são fortemente atenuadas com o incremento da profundidade. Conforme registrado nas figuras 5.1 a 5.4, na região em estudo, a profundidade com perturbação térmica destacada não é a mesma para todos os poços estudados. Consideramos que isto não é devido a mudanças na litologia das áreas de localização desses poços. Entretanto, tal fenômeno pode ser perfeitamente explicado como consequência do grau de proteção superficial a incidência direta do fluxo de radiação solar. Isto é corroborado pelos seguintes fatos: os Poços IPASEP e UNA são, dentre os quatro estudados, os que não apresentam qualquer tipo de proteção a radiação solar direta; nestes poços, à profundidade de apenas 22,0 m, o fluxo de calor é da ordem de 75 mW.m⁻². O Poço MARITUBA encontra-se protegido por esparsas árvores de pequeno porte; o valor do fluxo de calor a profun

didade em torno de 22,0 m é em torno de apenas 58 mW.m^{-2} . O Poço CG, dentre todos os estudados, é o que mais recebe proteção a esse tipo de radiação, permanecendo, inclusive, na sombra por várias horas durante o dia, devido a presença de dois prédios situados em seu derredor; o valor do fluxo de calor a profundidade de 22,0 m é insignificante, em comparação com os outros valores apresentados para os Poços IPASEP, UNA e MARITUBA, e durante o ano este valor é ora positivo, ora nulo.

5.7 Conclusões

As configurações dos perfis geotérmicos correspondentes aos poços estudados apresentam diferenças entre si.

A feição da distribuição dos resultados das perfilagens geotérmicas rasas é caracterizada pela existência de uma zona de fluxo de calor nulo, denominada "cotovelo", a partir da qual os valores de temperatura aumentam com o incremento da profundidade. A profundidade deste cotovelo é fundamentalmente influenciada pelos efeitos da radiação solar incidente na superfície da área em estudo e, também, pelas variações do nível freático e litologia da zona perfilada.

Os perfis geotérmicos derivam sistematicamente no sentido de acréscimo dos valores da temperatura durante o período de junho a janeiro, exceto pela deriva no sentido de decréscimo dos valores da temperatura observada em dezembro.

A maior oscilação nos valores da temperatura foi observada no Poço CG, da ordem de $1,05^{\circ}\text{C.ano}^{-1}$, a profundidade de 6,0 m. A menor oscilação concerne ao Poço MARITUBA, onde esta é da ordem da precisão das medidas.

Após um ciclo de período de um ano, todos os perfis apresentaram uma deriva resultante no sentido de aumento dos valores da temperatura com relação aos perfis iniciais. A

63,0 m de profundidade registrou-se o valor de $0,11^{\circ}\text{C.ano}^{-1}$, enquanto que a 200,0 m observou-se o valor de $0,04^{\circ}\text{C.ano}^{-1}$ (Poços IPASEP e MARITUBA, respectivamente). Consideramos que tal deriva térmica seja provocada pela diminuição gradual da proteção ao fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo.

Consideramos que a fonte geradora das flutuações sistemáticas dos perfis geotérmicos observados seja de origem externa, ou seja, o fluxo de radiação solar incidente na superfície da região estudada.

A profundidade máxima de influência da fonte externa como também a magnitude desta influência dependem, fundamentalmente, da proteção ao fluxo direto de radiação solar e, também, da profundidade do nível freático e da litologia da área. Na profundidade de 22,0 m registrou-se o valor de fluxo de calor de 75mW.m^{-2} para uma área descoberta, o valor de 58mW.m^{-2} para outra área com pequena proteção superficial e, ainda, um valor considerado insignificante, em relação aos dois apresentados, para uma área com boa proteção superficial. Esta perturbação termal foi registrada até a profundidade aproximada de 200,0 m.

O fluxo térmico terrestre profundo na região estudada é da ordem de $42,16 \pm 1,14 \text{ mW.m}^{-2}$. Desta forma, estudos de geotermia rasa podem fornecer o verdadeiro fluxo geotermal de uma dada região.

6. SOLUÇÃO NUMÉRICA DA EQUAÇÃO DO CALOR E SUA APLICAÇÃO EM GEOTERMIA RASA

6.1 Introdução

Conforme consta nas figuras 4.10 a 4.13, os valores correspondentes ao fluxo de calor diminuem fortemente com o aumento da profundidade, independentemente da estação do ano e do horário do dia. Na profundidade de 0,02 m o fluxo de calor atinge valores de até $74,8 \text{ W.m}^{-2}$, enquanto a cerca de 6,0 m estes valores ainda são da ordem de até $1,4 \text{ W.m}^{-2}$. Entretanto, próximo de 10,0 m de profundidade, o valor do fluxo de calor já é em torno de $0,1 \text{ W.m}^{-2}$. A profundidades maiores que 10 m o fluxo de energia embora ainda influenciado pela fonte externa, já atinge valores próximos ao do fluxo térmico emanado do interior da Terra, de modo que a 40,0 m de profundidade, para o poço CG, o fluxo térmico registrado é de cerca de 42 m W.m^{-2} .

As maiores alterações de gradiente de temperatura (chegando algumas vezes a inverter o seu sinal) ocorrem na zona de 0 a 10 m de profundidade. A profundidades maiores observam-se deslocamentos quase paralelos desses perfis, de modo que as mudanças de temperatura ocorrem com alterações muito pequenas dos gradientes geotérmicos. Assim sendo, conhecido o comportamento sazonal dos deslocamentos dos perfis geotérmicos obtidos em uma região, o modelamento do comportamento médio mensal dos mesmos perfis, na zona entre 0 a 10 m, complementa a previsão da situação geral da geotermia rasa num dado mês, na região escolhida. Foram utilizados para referência do modelamento, os dados obtidos no Poço CG cuja zona do cotovelo inicia-se em torno de 10,0 m. Este poço foi escolhido, dentre os demais poços estudados, por estar locado próximo ao Furo (3) (o qual foi utilizado para o monitoramento térmico) e apresentar todas as características referentes a um perfil geotérmico raso completo, ou seja: deriva sazonal da temperatura, zona de cotovelo bem definida e gradiente geotérmico regional. Os dados utilizados para comparação com o modelamento, correspondem as observações

feitas às 9:00 h, tempo local.

O perfil geotérmico inicial utilizado foi o relativo ao mês de setembro. No entanto, todos os outros perfis, concernentes aos demais meses do ano, foram testados. A escolha do perfil geotérmico atinente ao mês de setembro deu-se pelo fato de que após este mês inicia-se, na área em estudo, o período em que começam a diminuir os valores referentes a insoliação e, conseqüentemente, do fluxo de radiação solar incidente.

6.2 Formulação do Problema

O problema geotérmico a ser tratado consiste na determinação da solução numérica da equação unidimensional de condução do calor, para a zona estratificada compreendida entre 0,0 a 10,0 m de profundidade, em cada instante t num intervalo de 12 meses. O objetivo é resolver numericamente o problema matemático abaixo:

Encontrar u, solução de

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(z) \frac{\partial u}{\partial z} \right\}, \quad (z, t) \in (0, l) \times (0, T] \quad (6.1)$$

satisfazendo as condições de contorno

$$u(0, t) = f(t), \quad t \in (0, T] \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z}(l, t) = \beta, \quad t \in (0, T] \quad (6.3)$$

e a condição inicial

$$u(z, 0) = s(z), \quad z \in (0, l) \quad (6.4)$$

Nessas equações temos

u(z, t) = temperatura do poço na profundidade z, no instante t;

$k(z)$ = difusividade térmica em cada intervalo de profundidade;

$f(t)$ = temperatura média mensal na superfície;

β = gradiente vertical de temperatura no contorno inferior;

$s(z)$ = perfil geotérmico inicial ao longo do poço.

6.3 Solução Numérica do Problema

A solução numérica do problema (6.1) a (6.4) será obtida via Método de Galerkin, contínuo no tempo. Assim, para cada $t \geq 0$ fixo, seja $H^1(0, \ell) = \{v: (0, \ell) \rightarrow \mathbb{R} / v, v' \in L^2(0, \ell)\}$ o espaço de Hilbert das funções quadrado integráveis com derivadas primeiras também quadrado integráveis. Multiplicando ambos os membros de (6.1) e (6.4) por cada $v \in H^1(0, \ell)$ e, integrando de 0 a ℓ obtemos as equações integrais

$$\int_0^\ell \frac{\partial u}{\partial t}(z, t) v(z) dz = \int_0^\ell \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k(z) \frac{\partial u}{\partial z}(z, t) \right\} v(z) dz \quad (6.5)$$

$$\int_0^\ell u(z, 0) v(z) dz = \int_0^\ell s(z) v(z) dz \quad (6.6)$$

integrando por partes o segundo membro de (6.5) e implementando a condição de contorno (6.3), obtemos:

$$\int_0^\ell \frac{\partial u}{\partial t}(z, t) v(z) dz = k(\ell) \beta v(\ell) - k(0) \frac{\partial u}{\partial z}(0, t) v(0) - \int_0^\ell k(z) \frac{\partial u}{\partial z}(z, t) v'(z) dz \quad (6.7)$$

Portanto, o problema (6.1) a (6.4) pode ser escrito na forma variacional

$$\left\langle \frac{\partial u}{\partial t}(t), v \right\rangle = k(\ell) \beta v(\ell) - k(0) \frac{\partial u}{\partial z}(0, t) v(0) - \left\langle k(z) \frac{\partial u}{\partial z}(t), v' \right\rangle \quad (6.8)$$

$$\langle u(0), v \rangle = \langle s, v \rangle \quad (6.9)$$

para todo $v \in H^1(0, \ell)$, onde $\langle \cdot, \cdot \rangle$ denota o produto interno em $L^2(0, \ell)$ e a notação $\langle u(\cdot, t), v \rangle = \langle u(t), v \rangle$.

A fim de obtermos a solução numérica do problema equivalente (6.8) e (6.9), discretizaremos o intervalo $(0, \ell)$ numa partição $P_N = \{0 = z_1 < z_2 < z_3 < \dots < z_{N-1} < z_N = \ell\}$ e, em cada sub-intervalo $I_j = (z_j, z_{j+1})$, tomaremos $h_j = z_{j+1} - z_j$ e $k(z) = k_j$ para $z \in I_j$, $j = 1, 2, \dots, N-1$. Seja $H_N(0, \ell)$ um sub-espaço de dimensão finita de $H^1(0, \ell)$, gerado por um sistema de N funções linearmente independentes $\{\phi_i(z), i = 1, 2, 3, \dots, N\}$. Denotaremos por $\bar{u} \in H_N(0, \ell)$, a solução aproximada de u sob a forma,

$$\bar{u}(z, t) = \sum_{j=1}^N u_j(t) \phi_j(z) \quad (6.10)$$

sendo os coeficientes $u_j(t)$ as incógnitas do problema em questão.

Para que (6.10) satisfaça as condições de contorno (6.2) e (6.3), escolheremos para a base ϕ_i as funções "spline linear", conhecidas por "shape function" (Prenter, 1975), definidas por.

$$\phi_1(z) = \begin{cases} \frac{z_2 - z}{h_1}, & z_1 \leq z \leq z_2 \\ 0 & \text{no restante} \end{cases} \quad (6.11a)$$

$$\phi_i(z) = \begin{cases} \frac{z - z_{i-1}}{h_{i-1}}, & z_{i-1} \leq z \leq z_i \\ \frac{z_{i+1} - z}{h_i}, & z_i \leq z \leq z_{i+1} \\ 0 & \text{no restante} \end{cases} \quad \begin{matrix} i = 2, 3, 4, \dots, N-1 \\ (6.11b) \end{matrix}$$

$$\Phi_N(z) = \begin{cases} \frac{z - z_{N-1}}{h_{N-1}}, & z_{N-1} \leq z \leq z_N \\ 0, & \text{no restante} \end{cases} \quad (6.11c)$$

Substituindo (6.10) em (6.8) e (6.9) e, escolhendo para $v = \Phi_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, N$, obtemos

$$\sum_{j=1}^N u'_j(t) \langle \Phi_j, \Phi_i \rangle = k(\ell) \beta \Phi_i(\ell) - k(0) \frac{\partial u}{\partial z}(0, t) \Phi_i(0) - \sum_{j=1}^N u_j(t) \langle k_j \Phi'_j, \Phi_i \rangle \quad (6.12)$$

e

$$\sum_{j=1}^N u_j(0) \langle \Phi_j, \Phi_i \rangle = \langle s, \Phi_i \rangle \quad (6.13)$$

Observamos que, devido a escolha da base Φ_i , definidas em (6.11), a equação (6.12) para $i=1$ torna-se:

$$\sum_{j=1}^N u'_j(t) \langle \Phi_j, \Phi_1 \rangle = -k(0) \frac{\partial u}{\partial z}(0, t) - \sum_{j=1}^N u_j(t) \langle k_j \Phi'_j, \Phi_1 \rangle \quad (6.14)$$

e, para $i=2, 3, \dots, N-2, N-1$, torna-se

$$\sum_{j=1}^N u'_j(t) \langle \Phi_j, \Phi_i \rangle = - \sum_{j=1}^N u_j(t) \langle k_j \Phi'_j, \Phi_i \rangle \quad (6.15)$$

e, finalmente para $i=N$, torna-se

$$\sum_{j=1}^N u'_j(t) \langle \Phi_j, \Phi_N \rangle = k(\ell) \beta - \sum_{j=1}^N u_j(t) \langle k_j \Phi'_j, \Phi_N \rangle \quad (6.16)$$

As equações (6.14) a (6.16) na forma matricial podem ser escritas por:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1N-1} & a_{1N} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2N-1} & a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{N-11} & a_{N-12} & a_{N-13} & \dots & a_{N-1N-1} & a_{N-1N} \\ a_{N1} & a_{N2} & a_{N3} & \dots & a_{NN-1} & a_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_1(t) \\ u'_2(t) \\ \dots \\ u'_{N-1}(t) \\ u'_N(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \dots & b_{1N-1} & b_{1N} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \dots & b_{2N-1} & b_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N-11} & b_{N-12} & b_{N-13} & \dots & b_{N-1N-1} & b_{N-1N} \\ b_{N1} & b_{N2} & b_{N3} & \dots & b_{NN-1} & b_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \dots \\ u_{N-1}(t) \\ u_N(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -k(0) \frac{\partial u}{\partial z}(0,t) \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ k(\ell)\beta \end{bmatrix} \quad (6.17)$$

onde

$$\begin{cases} a_{ij} = \langle \phi_j, \phi_i \rangle \\ b_{ij} = \langle k_j \phi'_j, \phi'_i \rangle \end{cases} \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (6.18)$$

Sendo o termo $\frac{\partial u}{\partial z}(0,t)$ na equação (6.17) desconhecido e, como $u_1(t)$ é conhecido, dado pela condição de contorno (6.2) (consequentemente conhecemos $u'_{j1}(t)$), podemos eliminar a primeira linha de (6.17). Conforme Becker et al (1981), a equação matricial resultante de ordem $(N-1) \times (N-1)$ pode ser escrita pela expressão simplificada.

$$AU'(t) + BU(t) = F(t) \quad (6.19)$$

A expressão matricial correspondente a (6.13) será escrita por:

(6.20)

$$AU(0) = S$$

Calculando os valores dos elementos de cada matriz de (6.19), teremos:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(h_1+h_2)}{3} & \frac{h_2}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{h_2}{6} & \frac{(h_2+h_3)}{3} & \frac{h_3}{6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{h_3}{6} & \frac{(h_3+h_4)}{3} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{h_{N-2}}{6} & \frac{h_{N-2}+h_{N-1}}{3} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{h_{N-1}}{6} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_2}{h_1} & -\frac{k_2}{h_2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_2}{h_2} & \frac{k_2 + k_3}{h_2 h_3} & -\frac{k_3}{h_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{k_3}{h_3} & \frac{k_3 + k_4}{h_3 h_4} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{k_1}{h_1} & \frac{k_1 + k_{i+1}}{h_1 h_{i+1}} & -\frac{k_{i+1}}{h_{i+1}} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -\frac{k_{N-2}}{h_{N-2}} & \frac{k_{N-2} + k_{N-1}}{h_{N-2} h_{N-1}} - \frac{k_{N-1}}{h_{N-1}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{k_{N-1}}{h_{N-1}} \end{bmatrix}$$

B =

$$F(t) = \begin{bmatrix} \frac{k_1}{h_1} f(t) - \frac{h_1}{6} f'(t) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ k_{N-1} \beta \end{bmatrix}$$

onde as matrizes A e B contêm as informações do meio geológico estratificado e da discretização em relação a profundidade e, o vetor F(t) as informações da condição de contorno.

Para calcularmos os elementos do vetor S, que contém as informações da condição inicial, da equação (6.20), usaremos para s(z) a interpolação linear definida por:

$$s(z) = \begin{cases} s_i + \left(\frac{s_i - s_{i-1}}{h_{i-1}} \right) (z - z_{i-1}) & , \quad z_{i-1} \leq z \leq z_i \\ s_i + \left(\frac{s_{i+1} - s_i}{h_i} \right) (z - z_i) & , \quad z_i \leq z \leq z_{i+1} \end{cases}$$

sendo $s_i = s(z_i)$, $i=1,2,\dots,N$ as temperaturas ao longo do poço medidas a cada nível de profundidade de acordo com a partição P_N do intervalo $(0, \ell)$. De acordo com (6.13) obtemos, para $i=1$

$$\langle s, \phi_1 \rangle = \frac{h_1}{6} (2s_1 + s_2),$$

para, $i = 2, 3, \dots, N-1$

$$\langle s, \phi_i \rangle = \frac{h_{i-1}}{6} (2s_i + s_{i-1}) + \frac{h_i}{6} (2s_i + s_{i+1})$$

e, para $i=N$

$$\langle s, \phi_N \rangle = \frac{h_{N-1}}{6} (2s_N + s_{N-1})$$

de forma que, o vetor S de ordem $N \times 1$, após feita a eliminação da primeira linha, torna-se:

$$S = \begin{bmatrix} \frac{h_1}{6} (2s_2 + s_1) + \frac{h_2}{6} (2s_2 + s_3) - \frac{h_1}{6} u_1(0) \\ , \\ , \\ , \\ \frac{h_{i-1}}{6} (2s_i + s_{i-1}) + \frac{h_i}{6} (2s_i + s_{i+1}) \\ , \\ , \\ , \\ \frac{h_{N-1}}{6} (2s_N + s_{N-1}) \end{bmatrix}$$

de ordem $(N-1) \times 1$.

A seguir, para estudar a evolução no tempo das equações (6.19) e (6.20) usaremos o esquema de Diferenças Finitas (Crank-Nicolson) aplicado em relação a variável tempo t (Caley e Oden, 1984). Para isto, discretizaremos o intervalo do tempo em sub-intervalos de passo uniforme Δt . Cada ponto do intervalo discretizado terá a forma:

$$t_k = k\Delta t, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots$$

Fazendo a aproximação de (6.19) nos instantes

$$t = t_k, \quad k=0, 1, 2, 3, \dots$$

obtemos as equações de diferenças:

$$A \frac{(U^{k+1} - U^k)}{\Delta t} + B \frac{(U^{k+1} + U^k)}{2} = \frac{F^{k+1} + F^k}{2} \quad (6.21)$$

Rearranjando os termos, o problema inicial proposto se reduz a resolver o seguinte sistema de equações matriciais:

$$\left(A + \frac{\Delta t}{2} B\right) U^{k+1} = \left(A - \frac{\Delta t}{2} B\right) U^k + \frac{\Delta t}{2} (F^{k+1} + F^k) \quad (6.22)$$

$$AU(0) = S \quad (6.23)$$

A equação matricial (6.22) é resolvida a partir de $U^0 = U(0)$ da equação (6.23) para cada passo Δt , obtendo-se assim, uma previsão dos perfis de temperatura $U^1, U^2, U^3, \dots$ correspondentes aos meses subsequentes ao da condição inicial.

6.4 Resultados e Discussão

Os perfis geotérmicos resultantes do modelamento em pauta são apresentados nas figuras 6.1 e 6.2, os quais, em conjunto, compreendem o ciclo de período de um ano.

Ao compararmos as figuras 6.1 e 6.2 com as 4.4 e 4.5, respectivamente, observamos que o modelamento elaborado reproduz, dentro de uma margem de tolerância aceitável, os perfis geotérmicos obtidos nos trabalhos de campo. Inclusive, no que tange a deriva sazonal dos valores da temperatura, os perfis resultantes deste modelamento derivam também sistematicamente e no mesmo sentido que os perfis obtidos através de trabalhos de campo.

As grandes inversões dos valores do gradiente de temperatura também são claramente registradas nas figuras 6.1 e 6.2.

A coincidência plena dos perfis constantes nas figuras 4.4 e 6.1, referentes ao mês de setembro, é devido a que este mês foi o utilizado como o perfil geotérmico ini

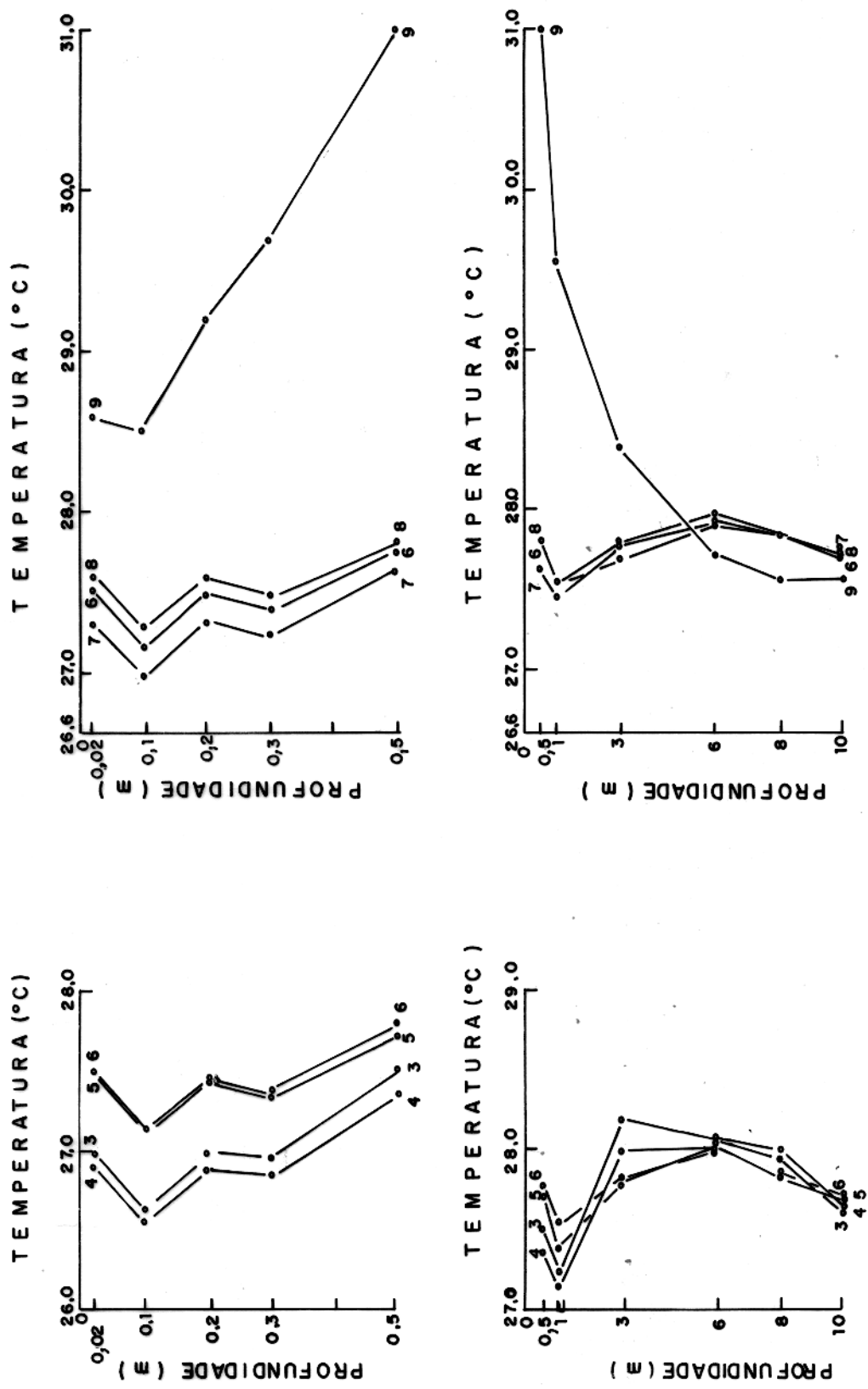


FIGURA : 6.1 - PERFIS DE TEMPERATURA OBTIDOS VIA MODELAMENTO, PERÍODO DE MARÇO/85 A SETEMBRO/85, ÀS 9:00 h.
(A NUMERAÇÃO DOS PERFIS CORRESPONDE AOS MESES DO ANO)

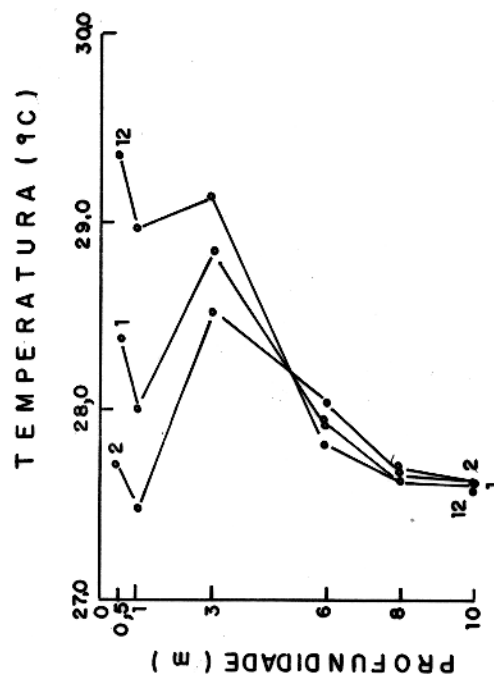
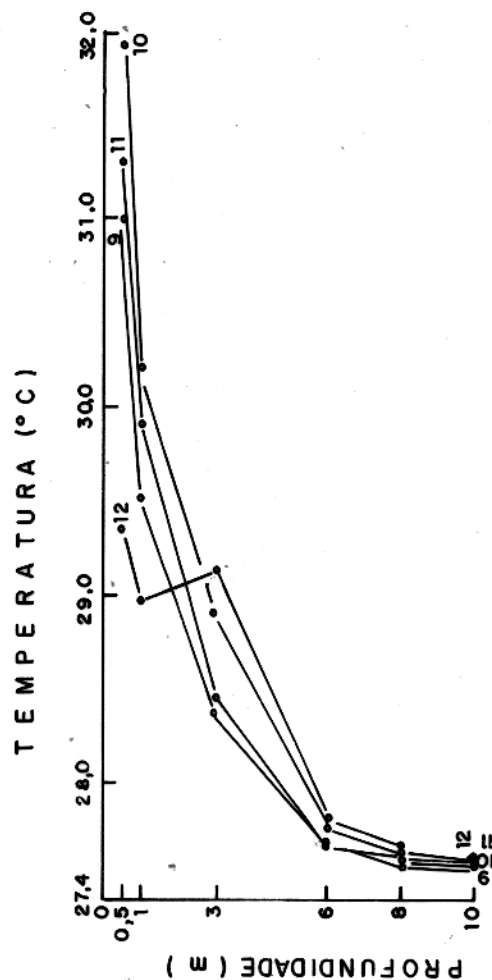
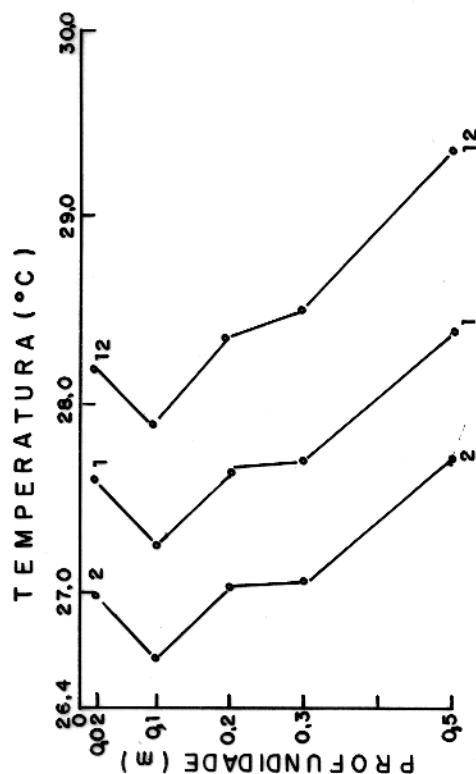
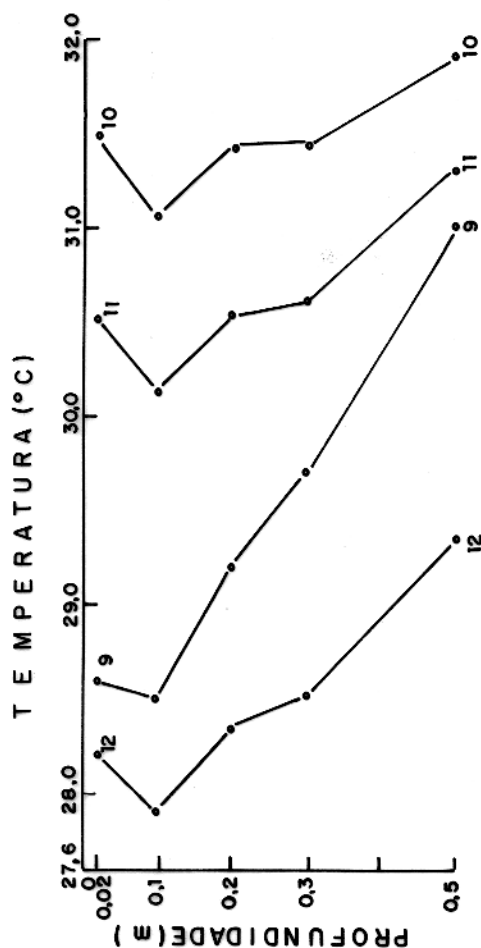


FIGURA : 6.2 - PERFIS DE TEMPERATURA, OBTIDOS VIA MODELAMENTO, PERÍODO DE SETEMBRO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 9:00 h. (A NUMERAÇÃO DOS PERFIS CORRESPONDE AOS MESES DO ANO).

cial.

Um fato bastante interessante concerne a configuração do perfil geotermal, no intervalo de 0,5 a 3,0 m de profundidade, atinente ao mês de dezembro; esta configuração divergedas demais com as quais ela encontra-se agrupada na figura 6.2. Tal configuração, porém, apresenta o mesmo aspecto na figura 4.5.

A comparação dos resultados oriundos do modelamento elaborado com os obtidos nos trabalhos de campo mostra uma semelhança mais acentuada quando efetuada em relação ao período de setembro a fevereiro. Este período inclui o de menor índice de nebulosidade e inclui também aquele em que o o fluxo de radiação solar incidente atinge os valores mais elevados, consequentemente, este período também abrange o de menor índice de precipitação pluviométrica na região metropolitana de Belém. Assim sendo, devido a equação utilizada neste modelo ser apenas de transferência de calor por condução, é possível que para o período chuvoso, outros tipos de transporte de calor possam ser mais significativos em relação a condução do que no período seco. Porém, pelo fato do modelamento em pauta reproduzir, dentro de uma boa margem de erro, os resultados obtidos em atividades de campo, consideramos que no intervalo de profundidade estudado a condução corresponde ao tipo fundamental de transporte de calor.

O modelamento presente foi testado com os resultados logrados nas atividades de campo realizadas às 18:00, sendo que os resultados podem ser considerados similares aos concernentes ao horário aqui apresentados. Tais resultados são apresentados nas figuras 6.3 e 6.4.

6.5 Conclusões

Embora o intervalo de profundidade estudado tenha se apresentado bastante complexo, com inversões bruscas no sentido do fluxo de calor, os dados oriundos das atividades

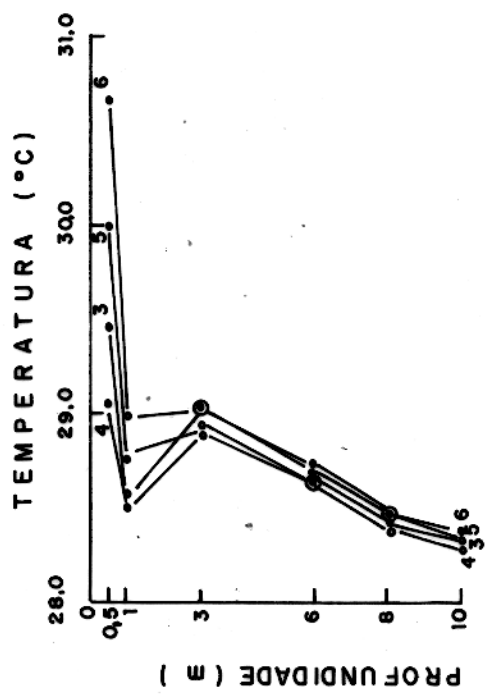
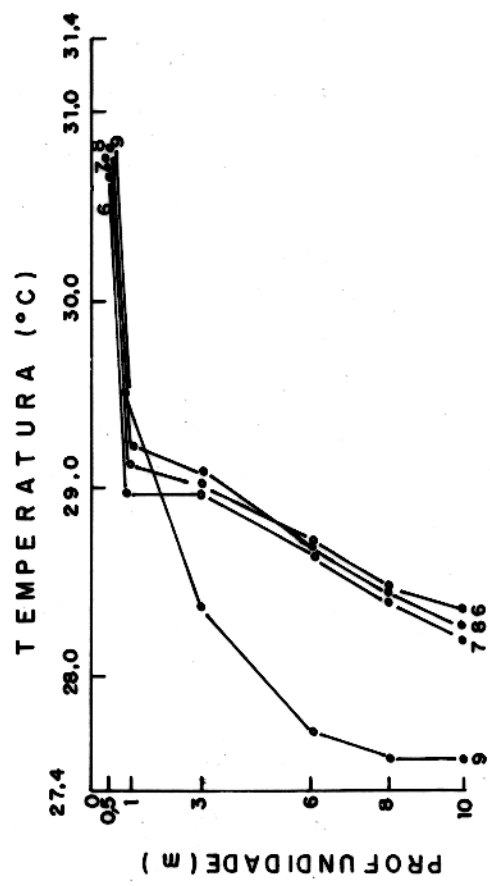
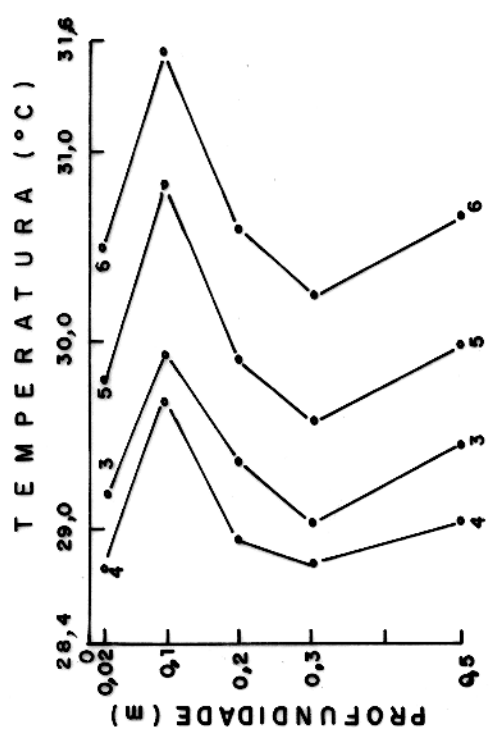
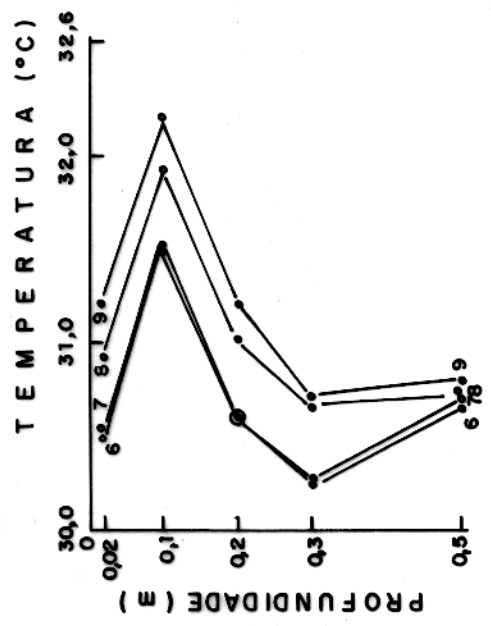


FIGURA : 6.3 - PERFIS DE TEMPERATURA OBTIDOS VIA MODELAMENTO, PERÍODO DE MARÇO/85 A SETEMBRO/85, ÀS 18:00h.
(A NUMERAÇÃO DOS PERFIS CORRESPONDE AOS MESES DO ANO).

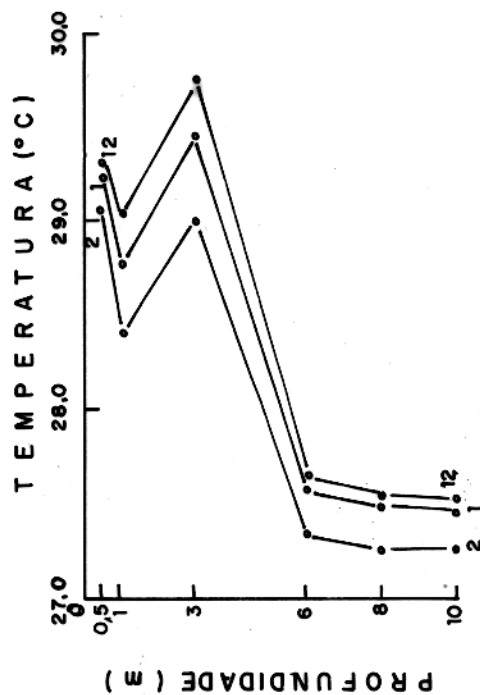
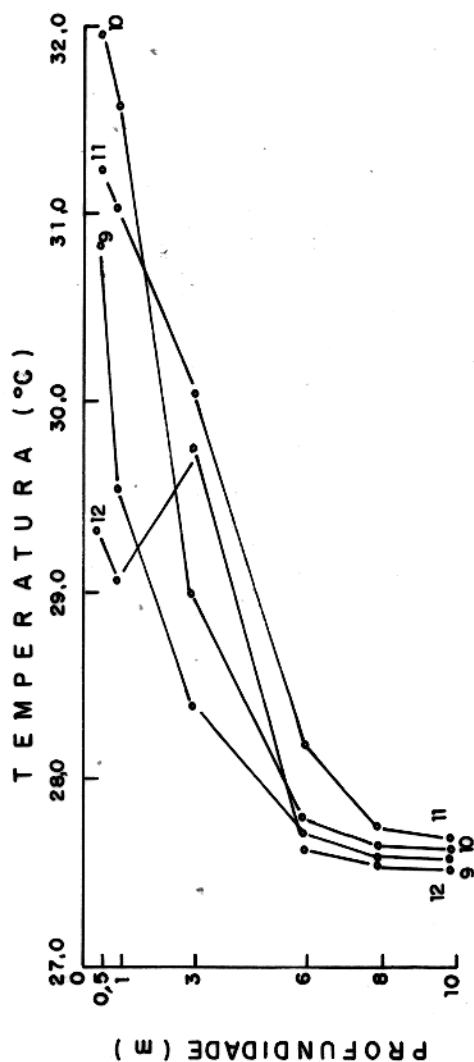
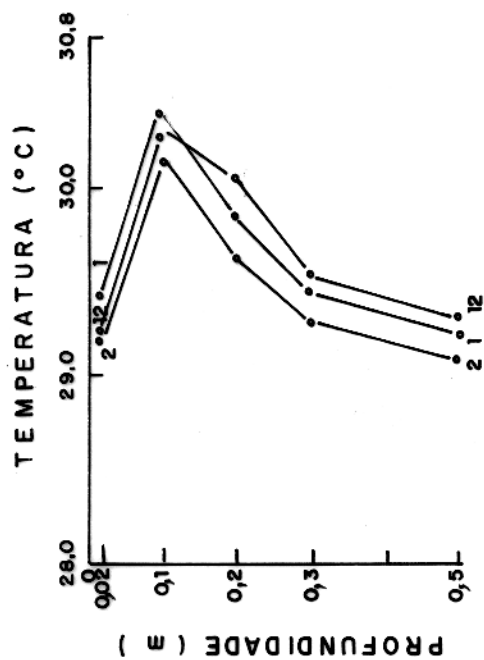
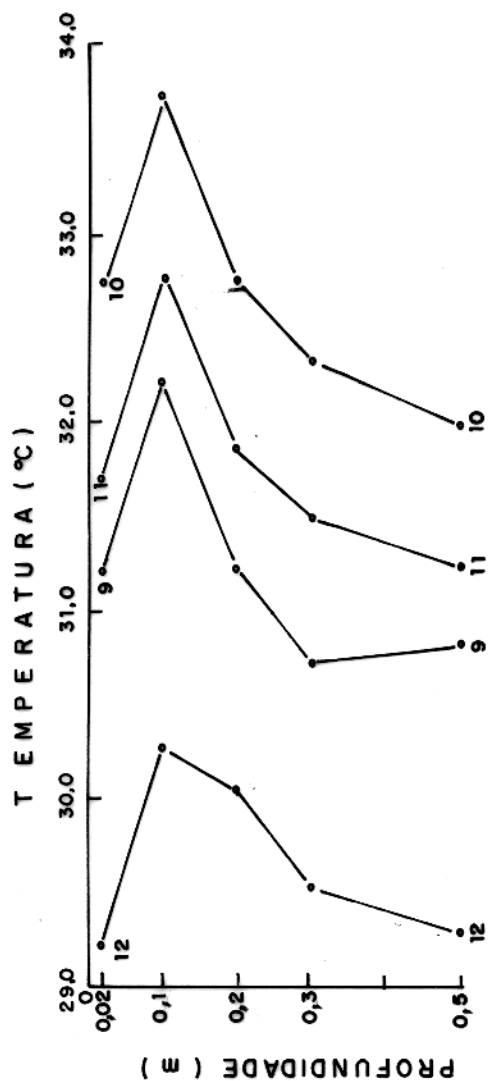


FIGURA 6.4 - PERFIS DE TEMPERATURA OBTIDOS VIA MODELAMENTO, PERÍODO DE SETEMBRO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 18:00 h.
(A NUMERAÇÃO DOS PERFIS CORRESPONDE AOS MESES DO ANO)..

de campo são reproduzidos, dentro de uma boa margem de tole
rância, pelo modelamento elaborado neste trabalho. A repro
dução é mais eficiente no período de setembro a fevereiro.

Assim sendo, concluímos que utilizando-se o
modelamento presente é possível obter-se uma boa estimativa
do comportamento anual da evolução dos perfis de temperatura pa
ra uma determinada área, desde que se conheça, a priori, os
valores das temperaturas médias mensais na superfície, o gra
diente geotérmico representativo da área e um perfil geotérmi
co inicial.

7. SINOPSE DAS CONCLUSÕES

Da análise dos dados oriundos do presente estudo, nos foi possível obter as seguintes conclusões:

1. Embora o somatório dos fatores que influenciam macroscopicamente os valores de temperatura seja mais proeminente nas camadas mais próximas a superfície terrestre, é perfeitamente viável o estudo preciso do regime térmico a profundidades tão pequenas quanto desejado;
2. Considerando a regularidade relativa das condições climáticas operantes na região metropolitana de Belém, os estudos geotérmicos realizados durante o ciclo de período de um ano podem fornecer uma idéia razoável da variabilidade e extremos a serem esperados nesta região tropical úmida;
3. Ao longo dos perfis litológicos descritos em base nos testemunhos de sondagem, observou-se a presença de concreções ferruginosas, distribuídas de maneira aleatória, as quais aumentam significativamente o valor da condutividade térmica do material ao qual elas encontram-se incrustadas. Devido a presença dessas concreções não consideramos adequado, para a área em estudo, traçar-se um perfil da distribuição dos valores de condutividade térmica baseado na descrição litológica elaborada segundo as análises dos perfis geofísicos e/ou amostras de calha;
4. Na região em estudo, a variação dos valores de temperatura a 1,0 m de profundidade não pode ser considerada como desprezível. Há uma relação direta entre a variação desses valores de temperatura e a do fluxo de radiação solar incidente na superfície. O maior incremento do fluxo de radiação solar observado de um dia para outro foi em torno de 30 W.m^{-2} o que correspondeu a um aumento da ordem de $0,22^\circ\text{C}$ na temperatura registrada a 1,0 m de profundidade;
5. Durante um ciclo de período de um ano, os perfis de temperatura referentes ao intervalo de 0,02 a 10,0 m derivam ora no sentido de acréscimo, ora no sentido de decréscimo dos valores da temperatura. Contudo, as oscilações médias mensais dos perfis registrados nos horários das 9:00 e 18:00 h local, ocorrem em um mesmo sentido:

6. O intervalo de 0,02 a 0,5 m de profundidade é caracterizado por fortes variações diárias nos valores de temperatura, o que ocasiona alteração no sentido de transporte do fluxo de calor. Isto caracteriza o processo de aquecimento e resfriamento durante o dia;
7. O intervalo de variações dos perfis mensais de temperatura de cresce rapidamente com o aumento da profundidade, até cerca de 3,0 m. Durante o ano, a temperatura excursionou em aproximadamente 4,6 °C a 0,02 m, 3,9 °C a 1,0 m e 1,0 °C a 3,0 m. Abaixo de 3,0 m a amplitude da deriva diminui a uma razão menor; os valores de temperatura oscilaram de 0,7 °C a 6,0 m, 0,5 °C a 10,0 m e 0,13 °C a 16,0 m, para ambos os horários estudados. Isto explica porque as perturbações térmicas geradas na superfície podem ser facilmente observadas a profundidades maiores;
8. Nos períodos em que a pluviosidade é praticamente nula, aumentam os valores de temperatura a 1,0 m de profundidade, assim como a média da temperatura da superfície, independentemente das oscilações dos valores da radiação solar incidente. Isto é consequência da disponibilidade da energia que não foi transportada via fluxos de calor latente, da superfície para a atmosfera;
9. A feição da distribuição dos resultados das perfilagens geotérmicas rasas é caracterizada pela existência de uma zona de fluxo de calor nulo, denominada "cotovelo" a partir da qual os valores de temperatura aumentam com o incremento da profundidade. A profundidade deste cotovelo é fundamentalmente influenciada pelos efeitos da radiação solar incidente na superfície da área em estudo e, também, pelas variações do nível freático e litologia da zona perfilada;
10. Os perfis referentes a profundidades superiores a 6,0 m, após um ciclo de período de um ano, apresentaram uma deriva resultante no sentido de acréscimo dos valores da temperatura com relação aos perfis iniciais. A 63,0 m de profundidade registrou-se o valor de 0,11 °C.ano⁻¹ (Poço IPASEP) enquanto que a 200,0 m observou-se o valor de 0,04 °C.ano⁻¹ (Poço MARITUBA). Consideramos que essa deriva seja provocada pela diminuição da proteção ao fluxo direto de radiação solar incidente na superfície da região estudada;
11. Evidenciou-se que a fonte geradora das flutuações sistemáticas

dos perfis geotérmicos rasos seja de origem externa, ou seja, o fluxo de radiação solar incidente na superfície da área em estudo;

12. A profundidade máxima de influência da fonte externa como também a magnitude desta influência dependem, fundamentalmente, da proteção ao fluxo direto da radiação solar e, também, da profundidade do nível freático e da litologia da área em estudo. Na profundidade de 22,0 m registrou-se o valor de fluxo de calor da ordem de 75 mW.m^{-2} para uma área desnuda, o valor de 58 mW.m^{-2} para outra área com pequena proteção superficial e um valor considerado insignificante, em relação aos dois apresentados, para outra área com boa proteção superficial;
13. O gradiente geotérmico da região em pauta é da ordem de $0,0254 \pm 0,0007 \text{ }^{\circ}\text{C.m}^{-1}$;
14. O valor médio correspondente a condutividade térmica para a região em estudo é de $1,66 \pm 0,52 \text{ W.m}^{-1}.^{\circ}\text{C}^{-1}$;
15. O fluxo térmico terrestre profundo na região estudada é da ordem de $42,16 \pm 1,14 \text{ mW.m}^{-2}$. A cerca de 0,02 m de profundidade este fluxo é de até $74,8 \text{ W.m}^{-2}$;
16. Os estudos sobre geotermia rasa podem fornecer, também, o valor do fluxo térmico terrestre profundo;
17. O modelamento elaborado no presente trabalho reproduz, dentro de uma boa margem de tolerância, os resultados obtidos nas atividades de campo. Estes resultados são melhores reproduzidos no período de setembro a fevereiro;
18. Através do modelo elaborado é possível obter-se uma boa estimativa do comportamento anual da evolução dos perfis de temperatura para uma determinada área, desde que se conheça, a priori, os valores das temperaturas médias mensais na superfície, o gradiente geotérmico regional e um perfil geotérmico inicial.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKERMANN, F.L. - 1976 - A Formação Pirabas, Sua Evolução e Interpretação. Belém, Serviço de Imprensa Universitária da Universidade Federal do Pará, 83 p.
- ALMEIDA, F.F.M. - 1978 - Nota Explicativa do Mapa Tectônico da América do Sul. Brasília, Departamento Nacional da Produção Mineral. 22 p.
- ALMEIDA, F.F.M. e HASUI, Y. - 1984 - Introdução. In: O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blucher. p. 1-5.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; NEVES, B.B.B. e FUCK, R.A. - 1977 - Províncias Estruturais Brasileiras. In: Atas do VIII Simpósio de Geologia do Nordeste. Campina Grande, PB, novembro, p. 363-391.
- ARAÚJO, R.L.C.; MAKINO, M. e SOUZA, J.R.S. - 1985 - Estudo da Variação Temporal de Perfis Geotérmicos na Camada Intempérica na Amazônia. In: Anais do II Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém, dezembro, v. 3, p. 195-206.
- ARAÚJO, R.L.C. e SILVA, R.M. - 1982 - Estimativas Preliminares do Gradiente Geotérmico Concernente à Cidade de Manaus. In: Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, setembro, v. 4, p. 1615-1620.
- ARAÚJO, R.L.C.; SOUZA, J.R.S e MAKINO, M. - 1984 - Análise de Perfis de Temperatura na Camada Intempérica da Área Metropolitana de Belém. In: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. outubro, v. 4, p. 2073-2088.
- ASTIER, J.L. - 1975 - Geofísica Aplicada a la Hidrogeologia. Madrid, Paraninfo. 344 p.
- BECK, A.E. - 1965 - Techniques of Measuring Heat Flow on Land. In: Lee, W., Terrestrial Heat Flow. Washington, American Geophysical Union. p. 24-57.
- BECK, A.E. - 1982 - Precision Logging of Temperature Gradients and the Extraction of Past Climate. Tectonophysics, 83 (1/2): 1-11.

- BECKER, E.B.; CAREY, G.F. and ODEN, J.T. - 1981 - Finite Elements. An Introduction. New Jersey, Prentice-Hall. v. 1.
- BRASIL, EMBRAPA - 1983 - Boletim Agrometeorológico. Belém, nº 8, 85 p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura - 1968 - Normas Climatológicas. Rio de Janeiro, Serviço de Meteorologia. 39 p.
- BULLARD, E.C. - 1947 - The Time Necessary for a Borehole to Attain Temperature Equilibrium. Monthly Notices Royal Astronomical Society. Geophysics Suppl. 5: 127-130.
- CAREY, G.F. and ODEN, J.T. - 1984 - Finite Elements. Computational Aspects. New Jersey, Prentice-Hall. v. 3.
- CARO, R. and EAGLESON, P. - 1982 - Estimating Aquifer Recharge Due to Rainfall-Reply. Journal of Hydrology. 58 (1/2): 183-184.
- CARSLAW, H.S. and JAEGER, J.C. - 1959 - Conduction of Heat in Solids. 2ª ed. Oxford, Clarendon Press. 496 p.
- CARVALHO, H.S. - 1981 - Método Para Determinação de Fluxo Geotérmico com Aplicação às Bacias Sedimentares Petrolíferas do Recôncavo Baiano (Brasil) e Sumatra (Indonésia). Tese de Doutorado. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 92 p.
- CARVALHO, H.S.; LOBO, P.F.S.; CAMPOS, J.N.P. and ZEMBRUSCKI, S.G. - 1986 - Heat Flow and Hydrodynamic Study in the Medium Amazon Basin. In: International Meeting on Geothermics and Geothermal Energy, São Paulo, agosto, p. 107.
- CHAPMAN, D.S. and FURLONG, K. - 1977 - Continental Heat Flow - Age Relationship. EOS Trans. Am. Geophys. Union. 58: 1240.
- COSTA, M.L. - 1984 - A Dinâmica de Formação de Lateritas: O Exemplo do NE do Maranhão. In: Anais do XXXIII Congresso Brasileiro de Geologia. Rio de Janeiro, outubro, v. 10, p.4823-4837.
- COURTILLOT, V. and FRANCHETEAU, J. - 1976 - Géothermie. In: Coulomb, J.; Jobert, G. Traité de Géophysique Interne. Paris. Masson, v. 2, p. 449-500.
- CUNHA, O.R. e BASTOS, T.X. - 1973 - A Contribuição do Museu Pa

- raense Emílio Goeldi à Meteorologia na Amazônia. Publicações Avulsas do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, nº 23, 34 p.
- CUSTODIO, E. e LLAMAS, M.R. - 1976 - Hidrologia Subterrânea. Barcelona, Omega. v. 2.
- DECICO, A.; SANTOS, H.M.; RIBEIRO, M.N.G e SALATI, E. - 1977 - Estudos Climatológicos da Reserva Florestal Ducke, Manaus, AM. I Geotemperatura. Acta Amazônica. 7(4): 485-494.
- DINIZ, T.D.A.S. e BASTOS, T.X. - 1980 - Efeito do Desmatamento na Temperatura do Solo em Região Equatorial Úmida. Boletim de Pesquisa da EMBRAPA, Belém, nº 7. 14 p.
- DINIZ, T.D.A.S.; BASTOS, T.X.; KOBAYASHI, L.T. e SILVA, M.M. M. - 1984 - Radiação Global e Seus Componentes em Belém, Pará. Boletim de Pesquisa da EMBRAPA, nº 135, 4 p.
- ESTEVES, F.R. - 1978 - Condições Térmicas das Bacias de Cassiporé, Foz do Amazonas e Marajó, Relatório da PETROBRÁS, 729/A, 81 p.
- FERREIRA, E.O. - 1972 - Notícia Explicativa da Carta Tectônica do Brasil. Boletim do DNPM, nº 1, 19 p.
- GEIGER, R. - 1961 - Manual de Microclimatologia. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian. 566 p.
- GEOSER PERFURAÇÕES E SONDAGENS - 1986 - Captação de Água Subterrânea Através de Poços Tubulares. Considerações Técnicas. Belém, Geoser Perfurações e Sondagens. 23 p.
- GHUMAN, B.S. and LAL, R. - 1985 - Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity and Thermal Capacity of Some Nigerian Soils, Soil Science, 139(1): 74-80.
- GOUDIE, A. - 1973 - Duricrusts in Tropical and Subtropical Landscapes. Oxford, Clarendon Press. 174 p.
- HAMZA, V.M.; ESTON, S.M.; ARAÚJO, R.L.C.; VITORELLO, I, e USSAMI, N. - 1978 - Coleção Brasileira de Dados Geotérmicos, São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 316 p. (série 1).
- HEILAND, C.A. - 1940 - Geophysical Exploration. New York, Prentice-Hall. 1013 p.

- HOLMAN, J.P. - 1983 - *Transferência de Calor*. São Paulo, Mc Graw-Hill. 639 p.
- JAEGER, J.C. - 1961 - The Effect of the Drilling Fluid on Temperatures Measured in Boreholes, Journal of Geophysical Research, 66(2): 563-569.
- JAEGER, J.C. - 1965 - Application of the Theory of Heat Conduction to Geothermal Measurements. In: Lee, W.H., Terrestrial Heat Flow. Washington, American Geophysical Union, p. 7-23.
- JAKOSKY, J.J. - 1940 - *Exploration Geophysics*. Los Angeles, Times-Mirror Press. 786 p.
- KAPPELMEYER, O. and HAENEL, R. - 1974 - *Geothermics: With Special Reference to Application*. Berlin, Gebruder Borntraeger, 238 p. (Geoexploration Monographs., Serie 1, n° 4).
- KÉZDI, A. - 1974 - *Handbook of Soil Mechanics*. Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing, v. 1.
- LACHENBRUCH, A.H. and BREWER, M.C. - 1959 - Dissipation of the Temperature Effect in Drilling a Well in Arctic Alaska, U.S. Geol. Surv. Bull. 1083-C: 73-190.
- LANGSETH, M.G. - 1965 - Techniques of Measuring Heat Flow Through the Ocean Floor. In: Lee, W. Terrestrial Heat Flow, Washington. American Geophysical Union, p. 58-77
- LEE, T.C. - 1977 - On Shallow-Hole Temperature Measurements. A Test Study in the Salton Sea Geothermal Field. Geophysics. 42(3):572-583.
- LESQUER, A.; PAGEL, M.; ORSINI, J.B. et BONIN, B. - 1983 - Géotermie-Premières Déterminations du Flux de Chaleur et de la Production de Chaleur en Corse. Comptes Rendus de L'Academie des Sciences de Paris. 297: 491-494.
- LONGLEY, R.W. - 1970 - *Elements of Meteorology*. New York, John Wiley & Sons. 317 p.
- MANSURE, A.J. and REITER, M. - 1979 - A Vertical Groundwater Movement Correction for Heat Flow. Journal Geophysical Research. 84(B7): 3490-3496.

- MARANGONI, Y.R. e HAMZA, V.M. - 1983 - Condutividade Térmica de Sedimentos da Plataforma Continental Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Geofísica. 2(1):11-18.
- MEDEIROS, L.A. e ANDRADE, N.G. - 1978 - Iniciação às Equações Diferenciais Parciais. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. 165 p.
- MEISTER, E.M. - 1973 - Gradientes Geotérmicos nas Bacias Sedimentares Brasileiras. Boletim Técnico da PETROBRÁS. 16(4): 221-232.
- MOTA, F.S. - 1976 - Meteorologia Agrícola. 2ª ed. São Paulo, Nobel. 376 p.
- OLLIER, C. - 1975 - Weathering. London, Longman Group. 304 p.
- PETRI, S. e FULFARO, V.J. - 1983 - Geologia do Brasil. São Paulo, Universidade de São Paulo, 631 p.
- PETTERSEN, S. - 1969 - Introduction to Meteorology, 3ª ed. New York, Mc Graw-Hill Book. 333 p.
- PINTO, N.S.; HOLTZ, A.C.; MARTINS, J.A. e GOMIDE, F.L. - 1976 - Hidrologia Básica. Curitiba, Edgard Blücher, 278 p.
- PIRSON, S.J. - 1963 - Handbook of Well Log Analysis for Oil and Gas Formation Evaluation. London, Prentice-Hall, 326 p.
- PRENTER, P.M. - 1975 - Splines and Variational Methods. New York, John Wiley & Sons. 323 p.
- RIEHL, H. - 1965 - Meteorologia Tropical. Rio de Janeiro, Livro Técnico. 426 p.
- ROBERTSON, E.C.; RASPET, R.; SWARTZ, J.H. and LILLARD, M.E. - 1966 - Properties of Thermistors Used in Geothermal Investigations. Geological Survey Bulletin. 1203B: 1-34.
- ROCHA, B.R.P. e SOUZA, J.R.S. - 1982 - Estudo da Pluviosidade em Varela, Ilha do Marajó, In: Anais do 2º Congresso Brasileiro de Meteorologia. Pelotas, outubro, v.2, p. 73-87.
- ROSE, A.W.; HAWKES, H.E. and WEBB, J.S. - 1979 - Geochemistry in Mineral Exploration. 2ª ed. London, Academic Press. 657 p.
- ROY, R.F.; BLACKWELL, D.D. and DECKER, E.R. - 1971 - Continental Heat Flow. In: Robertson, R., The Nature of the Soil. New

- York, Mc Graw-Hill. p. 506-543.
- RZHEVSKY, V. and NOVIK, G. - 1971- The Physics of Rocks. Moscow, Mir Publishers. 320 p.
- SANTOS, J., HAMZA V. M. and YU, SHEN, P. - 1986- A Method for Measurement of Terrestrial Heat Flow Density in Water Wells. Revista Brasileira de Geofísica. 4(2):45-53.
- SCHLUMBERGER LIMITED - 1972- Log Interpretation. Principles. New York, Schlumberger Limited. 112 p.
- SELLERS, W. D. - 1974- Physical Climatology. Chicago. The University of Chicago Press. 272 p.
- SHARMA, P. V. - 1976- Geophysical Methods in Geology. Amsterdam. Elsevier Publishing. 428 p.
- SMITH, P. J. - 1973- Topics in Geophysics. New York, The Open University Press. 303 p.
- SOUZA J. R. S., ROCHA, B. R., COHEN, J. C. P. e SANTOS, M. A. R. - 1984- Variabilidade Diária da Evapotranspiração na Orla de Belém. In: Anais do III Congresso Brasileiro de Meteorologia. Belo Horizonte, dezembro, v. 1, p. 87-101.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. and KEYS, D. A. - 1976- Applied Geophysics. Cambridge, Cambridge University Press. 860 p.
- VITORELLO, I. - 1978- Heat Flow and Radiogenic Heat Production in Brazil with Implications for a Thermal Evolution of Continents. Tese de Ph.D., Michigan, University of Michigan. 145 p.
- VON HERZEN, R. and MAXWELL, A. E. - 1959- The Measurement of Thermal Conductivity of Deep-Sea Sediments by a Needle Probe Method. Journal of Geophysical Research. 64(10):1557-1563.
- YAMABE, T. H. - 1985- Investigações Geotérmicas em uma Região de Atividade Sísmica. Parte Nordeste do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo. 161 p.
- ZIELINSKI, G. W., DRAHOVZAL, J. A., DECOURSEY, G. M. and RUPERTO, J. M. - 1985- Hydrothermics in the Wyoming Overthrust Belt. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin. 69(5):669-709.

- York, Mc Graw-Hill. p. 506-543.
- RZHEVSKY, V. and NOVIK, G. - 1971- The Physics of Rocks. Moscow, Mir Publishers. 320 p.
- SANTOS, J., HAMZA V. M. and YU, SHEN, P. - 1986- A Method for Measurement of Terrestrial Heat Flow Density in Water Wells. Revista Brasileira de Geofísica, 4(2):45-53.
- SCHLUMBERGER LIMITED - 1972- Log Interpretation, Principles. New York, Schlumberger Limited, 112 p.
- SELLERS, W. D. - 1974- Physical Climatology. Chicago, The University of Chicago Press. 272 p.
- SHARMA, P. V. - 1976- Geophysical Methods in Geology. Amsterdam, Elsevier Publishing. 428 p.
- SMITH, P. J. - 1973- Topics in Geophysics. New York, The Open University Press. 303 p.
- SOUZA J. R. S., ROCHA, B. R., COHEN, J. C. P. e SANTOS, M. A. R. - 1984- Variabilidade Diária da Evapotranspiração na Orla de Belém. In: Anais do III Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belo Horizonte, dezembro, v. 1, p. 87-101.
- TELFORD, W. M., GELDART, L. P., SHERIFF, R. E. and KEYS, D. A. - 1976- Applied Geophysics. Cambridge, Cambridge University Press, 860 p.
- VITORELLO, I. - 1978- Heat Flow and Radiogenic Heat Production in Brazil with Implications for a Thermal Evolution of Continents. Tese de Ph.D., Michigan, University of Michigan, 145 p.
- VON HERZEN, R. and MAXWELL, A. E. - 1959- The Measurement of Thermal Conductivity of Deep-Sea Sediments by a Needle Probe Method. Journal of Geophysical Research, 64(10):1557-1563.
- YAMABE, T. H. - 1985- Investigações Geotérmicas em uma Região de Atividade Sísmica. Parte Nordeste do Estado de São Paulo. Dissertação de Mestrado, São Paulo, Universidade de São Paulo, 161 p.
- ZIELINSKI, G. W., DRAHOVZAL, J. A., DECOURSEY, G. M. and RUPERTO, J. M. - 1985- Hydrothermics in the Wyoming Overthrust Belt. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 69(5):669-709.

ANEXO: A

"DESCRIÇÃO LITOLÓGICA DOS FUROS (1), (2) e (3)
OBTIDA PELA ANÁLISE DOS TESTEMUNHOS DE SOND-
GEM"

A. 1 - Furo (1)

 Δ Z(m)

- | | |
|-----------|--|
| 0,0 -0,7 | - areia argilosa, coloração amarelada. Na base há predominância de argila. |
| 0,7-1,2 | - na parte superior há argila cinza clara com alguns fragmentos ferruginosos. Na parte inferior há areia fina argilosa, cor cinza escura com pequenos fragmentos vegetais. |
| 1,2 -2,2 | - areia média pouco argilosa, cor amarelada. |
| 2,2-10,4 | - argila cinza pouco arenosa, com pequenos restos de matéria orgânica. |
| 10,4-15,2 | - areia argilosa no topo e argila cinza na parte inferior. Há milimétricos níveis de areia fina e algumas concreções ferruginosas. |
| 15,2-17,0 | - argila arenosa |
| 17,0-18,0 | - material argiloso intercalado com areia fina. |
| 18,0-19,0 | - areia fina argilosa, com pequenas lentes de argila. |
| 19,0-20,0 | - areia fina a média, pouco argilosa. |
| 20,0-21,0 | - areia fina no topo. Passa gradativamente para argila de coloração cinza escura com restos de matéria orgânica. No meio da amostra há milimétricas lentes de areia fina. |
| 21,0-22,0 | - areia fina a média. Passa bruscamente para argila e bruscamente retorna para areia média. Há uma intercalação contínua de lentes de areia média. |
| 22,0-23,0 | - areia argilosa com intercalações de lentes de argila. |
| 23,0-24,0 | - predominantemente areia fina a média com pequenas intercalações de argila. Há, esporadicamente distribuído na argila, grãos de quartzo de tamanho milimétrico. |

- 24,0-25,0 - material argilo arenoso com intercalações de areia fina e a presença de inúmeras concreções ferruginosas.
- 25,0-27,0 - argila cinza.
- 27,0-28,0 - topo essencialmente argiloso. Passa bruscamente para areia fina argilosa.
- 28,0-30,0 - material predominantemente argiloso com lentes milimétricas de areia fina.

A. 2 - Furo (2)

 Δ Z(m)

- 0,0-1,3 - areia fina a média, pouco argilosa, cor cinza escura.
- 1,3-5,4 - no topo areia pouco argilosa. Passa brusca mente para argila levemente arenosa, variega da com manchas ferruginosas. Existe algumas ' concreções ferruginosas de arenito no interva lo de profundidade de 2,5 a 3,5 m.
- 5,4-5,7 - argila muito arenosa, cor marrom escura que aumenta do topo para a base.
- 5,7-6,0 - argila variegada. A base é constituída de are nito bastante friável.
- 6,0-7,25 - argila cinza com manchas amarelas e avermelha das, em arranjo vertical. Próximo ao topo há uma lente centimétrica de areia fina.
- 7,25-11,5 - argila cinza clara com elevado índice de areia fina.
- 11,5-12,5 - argila bem laminada. Laminação se destacando ' pela mudança de cores (amarela, vermelha e cin za).
- 12,5-13,5 - argila preponderantemente de cor cinza clara, com concreções de material ferruginoso de cor marrom amarelado.
- 13,5-14,5 - no topo areia fina. Passa bruscamente para ar gila preponderantemente de cor marrom aver melhada.
- 14,5-20,5 - argila pouco arenosa com muitas concreções fer ruginosas (textura fina, relativamente dura, co loração marrom avermelhado), cor cinza clara e marrom avermelhado em arranjo laminar.
- 20,5-21,5 - argila arenosa com pequenos restos de mate rial vegetal.
- 21,5-22,5 - argila homogênea, cor cinza clara, sem man

chas nem concreções.

- 22,5-24,5 - argila arenosa intercalada com concreções de arenito; cor cinza clara.
- 24,5-28,5 - argila cinza escura contendo finas lentes de areia fina e silte. Há material vegetal e tam bém milimétricas concreções de arenito que au mentam em direção a base.

A. 3 - Furo [3]

 $\Delta Z(m)$

- 0,0-0,1 - arenito constituído por grãos de quartzo de até 0,5cm de diâmetro, sub angulosos a sub arredondados e mal selecionados. Matriz constituída de areia média a fina, cimentada com óxido de ferro.
- 0,1-1,0 - areia média argilosa contendo matéria orgânica, óxido de ferro e grãos de quartzo.
- 1,0-1,8 - areia média com pequena quantidade de argila. A base é mais argilosa.
- 1,8-4,0 - matriz argilo arenosa com algumas intercalações de níveis milimétricos constituídos de areia fina.
- 4,0-6,8 - material preponderantemente argiloso.
- 6,8-8,5 - essencialmente argiloso. Na base há lentes milimétricas de material siltoso
- 8,5-9,5 - matriz fundamentalmente argilosa. No topo há milimétricas lentes siltosas.
- 9,5-11,5 - material essencialmente argiloso. Há, na base, concreções ferruginosas.
- 11,5-13,0 - material argilo arenoso. Existe, espalhado irregularmente na amostra, níveis milimétricos de areia fina.
- 13,0-14,0 - material silte argiloso com inúmeras concreções de tamanho milimétrico.
- 14,0-16,0 - material constituído de areia fina a silte. Há grãos de quartzo e concreções ferruginosas.
- 16,0-17,0 - material preponderantemente argiloso com intercalações milimétricas de lentes de areia fi na a silte.

ANEXO: B

" TABELAS "

TABELA:B.1 - VALORES TOTAIS DIÁRIOS DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA - Unidade em mm

DIA	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
01	10,0	5,2	0,0	0,3	0,2	0,4	28,7	2,3	0,0	0,7	0,0	0,1
02	5,2	34,8	0,8	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	17,6
03	1,2	9,1	7,0	1,6	9,4	0,0	0,0	0,3	1,9	0,0	1,8	21,5
04	8,0	0,5	45,5	0,0	4,6	0,0	2,3	1,9	0,0	0,0	1,8	0,0
05	17,8	0,0	2,0	0,2	0,0	18,9	0,0	0,0	0,0	34,3	0,5	1,0
06	33,4	0,2	0,8	13,0	0,0	0,2	11,9	0,0	1,1	0,1	17,8	43,4
07	27,6	23,5	1,2	0,0	0,2	0,8	0,6	0,4	0,1	0,0	0,0	45,8
08	14,9	2,0	13,0	1,6	0,0	7,2	4,7	0,0	0,2	0,0	7,3	1,0
09	2,8	4,6	4,7	3,8	26,2	16,5	0,0	0,0	13,8	6,1	0,0	23,4
10	7,5	24,5	15,0	0,0	6,5	9,6	8,0	16,9	5,5	0,0	27,6	29,9
11	8,8	3,1	0,7	4,0	0,3	0,2	1,1	7,6	5,6	0,3	11,7	29,4
12	10,3	4,7	0,3	0,4	11,5	0,3	4,0	5,0	2,6	3,0	4,7	0,0
13	2,4	36,6	8,4	9,1	1,4	1,4	2,9	2,5	10,0	88,6	0,0	22,8
14	10,0	10,5	0,8	3,2	2,4	0,5	0,0	4,2	21,3	5,7	0,0	0,5
15	2,7	8,4	0,4	1,0	0,0	0,1	0,0	0,0	3,7	0,2	15,5	37,9
16	9,2	0,0	0,6	10,0	2,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1	4,2
17	1,6	3,4	9,1	7,0	1,4	0,3	0,2	0,0	3,7	0,1	48,7	19,0
18	41,5	1,0	40,9	10,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	17,9	17,0	10,6
19	0,1	40,0	1,5	0,0	0,0	1,8	0,7	2,1	4,7	0,0	0,0	22,3
20	17,6	34,6	2,9	1,7	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	3,5
21	23,6	0,0	7,5	0,0	0,0	5,3	0,0	0,0	18,4	4,6	0,0	42,8
22	104,7	10,9	2,3	15,1	0,0	2,1	2,9	0,0	11,6	0,0	26,2	0,0

continuação da Tabela:B.1

DIA	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
23	5,0	0,0	18,3	0,0	7,0	8,2	1,2	0,0	2,5	19,8	11,9	1,0
24	0,0	0,0	0,2	0,0	28,5	0,3	0,0	0,0	8,3	19,4	13,1	14,1
25	1,8	19,3	4,0	0,0	20,1	0,0	0,0	0,0	2,4	16,6	5,0	16,5
26	3,4	2,7	4,3	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0	0,0	30,8	0,0	38,8
27	4,2	68,3	1,5	0,0	0,0	0,4	3,8	1,0	0,0	11,5	44,4	15,2
28	21,6	9,1	3,3	0,0	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	37,6	11,1	4,6
29	7,2	21,2	6,3	0,0	0,8	16,5	0,0	7,9	17,2	15,8	1,3	--
30	9,6	1,4	1,8	0,0	1,5	0,2	0,0	5,4	0,0	30,0	4,6	--
31	10,1	--	20,1	--	0,0	0,4	--	0,0	--	5,7	29,5	--

TABELA: B.2 - VALORES DIÁRIOS DA INSOLAÇÃO NA REGIÃO DE BELÉM - Unidade em h (EMBRAPA/CPATU - Co-
munidade Escrita)

DIA	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
01	4,1	2,4	7,7	10,0	3,5	10,4	9,6	5,9	10,3	5,6	2,4	6,8
02	5,1	0,5	5,8	6,4	10,7	10,3	8,6	9,6	8,8	8,1	7,3	3,7
03	3,1	0,9	4,1	0,1	4,9	11,0	9,0	10,6	5,6	9,3	7,5	0,2
04	6,6	8,4	3,8	7,3	8,5	10,7	10,2	9,5	6,6	8,7	7,1	2,0
05	4,0	10,2	4,3	2,4	10,2	6,6	8,9	10,0	8,0	0,5	8,5	4,7
06	2,8	5,2	8,1	7,0	10,6	10,6	9,5	5,7	8,9	2,8	8,1	5,0
07	0,0	1,2	5,9	7,2	6,2	8,6	9,8	6,6	9,6	5,7	6,7	8,9
08	0,2	5,6	6,0	8,9	10,3	10,5	10,4	9,0	6,9	3,3	4,3	0,4
09	1,4	3,0	3,6	9,0	8,0	10,1	6,9	10,6	5,2	2,5	7,2	3,7
10	0,8	0,5	1,7	10,1	9,5	9,7	7,9	6,0	7,8	0,1	6,7	3,9
11	4,8	0,3	1,8	6,9	10,4	3,9	5,9	5,8	3,8	6,4	7,5	2,4
12	0,4	4,9	8,7	8,2	4,3	9,7	8,9	8,8	9,7	0,9	8,1	0,2
13	3,2	6,3	2,4	2,1	9,7	9,1	8,8	8,2	9,0	4,5	9,6	1,7
14	4,5	2,9	6,5	6,4	8,3	7,8	10,1	9,3	8,2	0,9	7,4	4,0
15	2,0	2,7	7,7	7,6	10,9	9,7	10,3	8,3	5,2	1,4	3,1	4,5
16	0,7	7,0	7,6	9,6	8,8	10,3	10,3	9,8	2,2	2,3	2,5	2,3
17	0,8	5,3	2,7	7,9	5,6	9,4	9,3	9,1	3,9	8,4	1,1	2,4
18	0,0	2,4	1,0	4,7	9,8	9,6	9,7	9,6	7,0	2,0	2,9	0,8
19	1,0	0,4	5,1	9,4	8,7	9,2	9,8	7,3	8,6	4,0	0,0	3,4
20	1,3	0,0	1,8	9,3	10,0	9,4	10,5	8,5	2,4	1,3	0,9	2,0
21	0,6	4,6	6,5	8,5	8,7	8,3	9,3	9,8	5,2	4,4	7,0	3,3

continuação da Tabela:B.2

DIA	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
22	1,7	4,6	3,5	5,7	4,8	4,9	7,5	9,8	3,2	4,4	4,3	5,0
23	0,0	5,6	9,8	9,1	7,1	8,2	7,6	10,1	1,2	4,3	4,4	9,8
24	5,6	9,5	4,3	10,8	6,8	9,7	10,3	8,1	4,3	1,4	6,1	8,2
25	3,6	6,4	5,6	9,6	6,6	6,6	10,6	7,3	9,5	0,1	7,4	7,5
26	4,4	3,5	8,2	8,4	10,5	7,5	9,2	5,9	6,6	0,0	8,0	6,2
27	6,4	1,6	4,3	7,7	8,0	10,6	6,0	7,7	4,7	0,0	4,2	3,4
28	2,8	1,9	5,6	7,4	8,9	9,6	8,0	9,8	1,3	2,3	3,5	2,0
29	3,2	2,8	5,0	10,1	5,9	7,6	9,7	2,4	5,4	3,4	1,6	--
30	6,1	7,7	7,8	9,7	8,4	7,2	8,9	5,0	5,3	1,5	2,2	--
31	2,3	--	7,4	--	10,1	9,5	--	8,1	--	0,6	0,0	--

TABELA:B.3 - VALORES MÉDIOS DIÁRIOS DA TEMPERATURA DO AR EM BELÉM - Unidade em °C

DIA	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
01	26,5	---	26,2	25,7	26,2	26,2	26,3	26,9	27,5	26,8	25,6	23,9
02	26,1	25,3	26,8	27,4	25,8	26,7	25,3	26,4	27,4	27,1	25,7	26,0
03	25,3	24,9	26,2	25,9	26,5	26,3	26,0	27,1	27,3	27,3	26,4	24,9
04	25,9	25,7	26,5	26,1	25,5	25,9	26,5	27,3	26,1	27,3	26,8	24,0
05	26,0	25,8	25,5	26,3	26,0	26,3	27,2	26,8	27,4	26,9	27,1	25,2
06	25,6	26,2	26,2	25,6	26,1	25,5	27,0	27,3	27,4	26,3	26,9	25,9
07	24,7	25,7	26,2	26,2	26,0	26,1	25,5	27,2	27,1	26,2	26,3	25,2
08	24,8	26,3	26,1	26,9	25,8	26,0	27,0	26,3	26,9	27,3	26,7	25,5
09	25,4	26,1	26,5	26,4	27,1	25,8	26,2	27,0	26,9	26,9	26,5	26,2
10	25,2	26,0	25,5	26,2	25,1	25,4	26,6	27,1	26,0	25,9	27,4	25,7
11	26,2	25,1	24,2	26,8	26,7	25,0	26,2	25,6	26,3	26,3	26,8	25,1
12	26,0	25,2	26,3	25,9	25,8	26,8	25,9	26,3	26,9	26,6	27,0	24,7
13	24,9	26,1	25,7	24,7	25,4	26,2	26,2	26,7	26,9	26,7	27,2	25,5
14	25,7	25,3	25,8	25,3	25,7	26,2	25,7	26,5	26,9	25,1	27,1	25,1
15	25,0	25,0	26,4	25,5	25,8	26,2	26,6	26,1	26,0	25,0	27,0	25,8
16	26,0	25,4	26,5	26,6	26,5	26,7	27,3	27,1	26,0	26,0	25,5	25,0
17	25,0	25,3	25,7	25,9	25,7	27,5	27,5	26,8	26,9	26,4	24,9	25,5
18	25,1	25,5	24,9	26,0	26,0	26,7	26,4	27,6	26,5	26,9	24,1	24,9
19	24,6	24,9	25,4	25,7	26,4	26,3	26,7	27,0	26,8	25,5	24,0	24,7
20	25,7	24,0	25,7	26,1	27,1	25,8	26,8	27,0	26,6	26,7	25,9	24,8
21	25,7	25,2	25,8	26,6	26,5	25,7	26,5	27,0	26,6	25,9	25,8	25,7
22	25,7	26,2	25,8	27,0	26,0	25,9	26,7	28,0	25,5	26,2	26,3	25,3

continuação da Tabela:B.3

DIA	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
23	23,7	25,5	26,3	25,7	26,6	25,4	26,6	27,6	25,8	25,9	24,8	26,3
24	25,7	26,9	25,9	26,2	25,2	26,1	26,0	27,5	27,0	25,7	25,6	26,9
25	26,6	26,8	25,6	26,8	25,0	26,4	26,6	27,9	26,5	25,2	25,7	25,8
26	26,4	25,8	26,7	26,6	25,4	26,6	26,7	27,4	26,9	24,6	26,4	26,1
27	26,8	25,9	26,1	26,3	26,5	25,8	27,0	26,9	26,4	23,3	26,5	26,0
28	25,9	24,9	25,9	26,1	26,9	26,5	26,2	27,4	27,3	24,6	25,6	24,8
29	25,0	25,4	26,2	26,6	25,7	26,2	26,5	27,5	27,3	24,3	24,7	---
30	26,7	24,5	26,3	26,7	25,8	25,4	26,9	26,7	26,7	25,6	25,5	---
31	25,3	--	26,8	--	25,5	25,9	---	26,4	---	24,7	24,1	---

TABELA: B.4 - VALORES MÉDIOS MENSIS DA TEMPERATURA MEDIDA A PROFUNDIDADES DE 0,02 A 10,0m, NO PERÍODO DE MARÇO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 9:00h LOCAL - Unidade em °C

Z(m)	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
0,02	27,0	26,9	27,5	27,5	27,3	27,6	28,6	31,5	30,5	28,2	27,6	27,0
0,10	27,2	27,1	27,7	27,8	27,7	28,0	28,5	29,6	29,2	27,8	27,5	27,0
0,2	27,5	27,5	28,2	28,3	28,3	28,5	29,2	30,8	29,9	28,3	28,1	27,6
0,3	28,1	28,1	28,7	29,0	29,0	29,2	29,7	31,1	30,5	28,6	28,4	27,9
0,5	28,7	28,5	29,4	29,7	29,8	---	31,0	31,8	31,1	29,2	28,9	28,4
1,0	27,44	27,26	27,53	27,77	28,51	28,92	29,52	31,10	30,67	28,73	28,30	27,71
3,0	28,34	28,14	28,00	27,97	28,06	28,25	28,38	28,64	28,94	28,88	28,62	28,41
6,0	27,67	27,34	27,43	27,26	26,86	26,84	27,70	27,82	27,89	27,46	27,68	27,20
8,0	27,65	27,48	27,41	27,24	26,98	27,06	27,56	27,67	27,72	27,53	27,61	27,28
10,0	27,57	27,53	27,46	27,37	27,20	27,25	27,56	27,63	27,67	27,56	27,61	27,39

TABELA:B.5 - VALORES MÉDIOS MENSAIS DA TEMPERATURA MEDIDA A PROFUNDIDADES DE 0,02 A 10,0m, NO PERÍODO DE MARÇO/85 A FEVEREIRO/86, ÀS 18:00h LOCAL - Unidade em °C

Z(m)	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
0,02	29,2	28,8	29,8	30,5	30,5	30,9	31,2	32,7	31,7	29,2	29,4	29,2
0,10	29,3	29,1	30,3	30,8	31,1	31,5	32,2	34,0	32,9	29,8	29,8	29,7
0,20	29,3	29,0	29,9	30,0	30,5	30,5	31,2	33,7	32,8	29,9	30,0	29,5
0,30	28,7	28,6	29,4	29,6	29,7	29,9	30,7	32,6	31,7	29,3	29,2	28,8
0,50	28,6	28,5	29,4	29,8	29,7	---	30,8	31,9	31,0	29,1	28,8	28,4
1,0	27,42	27,24	27,51	27,74	28,47	28,89	29,52	31,08	30,68	28,62	28,38	27,80
3,0	28,34	28,14	28,01	27,97	28,06	28,25	28,38	28,64	28,95	28,92	28,70	28,41
6,0	27,67	27,34	27,43	27,26	26,86	26,84	27,70	27,82	27,89	27,46	27,68	27,26
8,0	27,65	27,48	27,41	27,24	26,98	27,06	27,56	27,67	27,72	27,53	27,61	27,28
10,0	27,57	27,53	27,46	27,37	27,20	27,25	27,56	27,63	27,67	27,56	27,61	27,39

TABELA:B.6 - VALORES DIÁRIOS REGISTRADOS DO FLUXO DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL INCIDENTE, NO PERÍODO

DE FEVEREIRO/85 A FEVEREIRO/86 - Unidade em $(W.m^{-2})$ (EMBRAPA/CPATU - comunicação escrita)

DIA	FEV/85	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEV/86
01	155,8	206,1	167,8	218,6	233,2	193,2	232,3	222,0	202,2	264,3	183,9	183,1	231,1
02	160,2	198,9	59,0	204,5	205,9	241,2	252,0	259,8	255,7	222,2	204,0	211,5	215,4
03	209,2	119,0	132,3	178,3	177,6	163,8	268,1	247,2	271,0	168,1	225,9	199,0	120,5
04	194,3	221,7	251,8	188,3	199,9	210,8	261,2	267,8	251,3	238,1	230,6	219,8	167,4
05	156,6	166,8	251,8	200,5	143,3	240,3	234,7	246,3	247,9	216,0	204,5	219,4	185,6
06	142,9	142,5	195,2	232,2	209,8	235,8	260,5	234,6	221,2	234,8	197,4	222,4	202,0
07	171,0	88,3	135,2	191,9	216,5	196,2	250,4	254,7	209,8	228,6	192,5	228,8	260,7
08	173,6	100,0	205,9	208,1	218,8	250,3	267,4	267,8	261,5	204,5	186,1	161,7	108,7
09	227,7	142,8	154,4	156,9	235,3	202,4	267,2	211,7	263,0	171,7	166,9	231,3	141,4
10	227,7	144,9	133,5	138,1	238,9	229,6	250,6	244,0	188,4	225,8	150,2	195,8	151,7
11	206,8	186,9	187,4	131,9	184,4	239,8	195,2	191,6	188,0	198,8	199,3	219,8	150,5
12	194,8	100,2	174,6	247,9	230,3	146,9	243,2	244,0	234,8	246,0	155,8	219,8	152,2
13	181,3	175,8	203,2	147,9	141,7	242,9	237,8	258,1	218,8	233,9	170,7	241,5	139,1
14	198,8	184,3	136,7	223,3	208,0	225,1	228,7	262,0	247,7	226,0	135,7	214,6	195,3
15	151,7	165,8	138,8	202,6	228,2	251,0	241,0	271,7	250,6	189,4	168,3	175,0	186,8
16	157,0	165,4	204,7	228,1	241,0	249,4	252,5	270,7	255,9	169,8	163,0	150,6	184,7
17	154,4	139,6	199,3	156,7	221,7	208,0	247,7	257,1	255,4	197,7	199,0	117,7	150,6
18	130,8	65,8	204,9	108,8	155,2	250,8	250,1	247,9	253,2	201,0	157,5	192,0	142,8
19	194,1	143,7	131,8	183,8	233,7	231,1	232,8	274,8	215,1	232,4	186,1	90,5	157,8
20	233,3	135,2	28,4	136,2	236,5	247,7	241,9	273,6	233,1	153,1	150,7	138,6	135,4
21	216,6	147,2	190,1	177,9	235,6	213,7	234,9	251,0	243,0	214,6	170,0	233,3	150,6

continuação da Tabela:B.6

DIA	FEV/85	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEB/86
22	170,7	111,9	172,9	137,6	195,7	205,5	200,6	222,9	243,0	154,8	175,2	156,0	246,5
23	79,3	86,4	201,8	243,3	246,4	207,5	230,6	233,6	257,6	150,8	190,3	150,8	243,9
24	168,1	223,1	262,0	172,2	242,7	213,1	247,7	282,2	237,7	177,4	191,0	192,9	239,3
25	180,8	172,4	196,7	176,0	240,7	199,9	223,7	275,8	211,5	223,6	73,6	208,9	224,2
26	164,5	181,4	144,2	214,6	213,0	252,1	234,5	239,1	193,6	205,6	73,1	229,4	215,7
27	196,2	205,9	104,2	202,2	203,5	235,1	268,4	208,8	231,7	199,6	65,6	192,9	145,2
28	222,4	129,4	134,8	154,8	216,7	235,4	256,9	236,0	245,5	140,5	177,6	166,2	166,7
29	---	184,0	173,1	168,1	234,2	175,3	210,9	240,8	168,1	222,4	195,3	151,7	---
30	---	191,6	86,0	226,7	239,1	207,3	247,2	219,5	204,0	220,8	122,4	137,9	---
31	---	200,8	---	211,5	---	220,4	238,1	---	242,4	---	111,3	66,8	---

TABELA: B.7 - VALORES REFERENTES AS MASSAS DE AREIA, ARGILA E ÁGUA, DENSIDADE, CALOR ESPECÍFICO, CONDUTIVIDADE E DIFUSIVIDADE TÉRMICAS PERTINENTES A AMOSTRAS DO FURO (3)

Z (m)	AREIA (g)	ARGILA (g)	ÁGUA (g)	ρ (10^3 kg.m^{-3})	C ($10^3 \text{ J.kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	λ ($\text{W.m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	k ($10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)
0,45	53,12	17,86	8,38	2,30	1,204	2,19	0,791
1,0	74,30	27,60	11,51	2,32	1,192	2,54	0,918
2,5	1,44	55,52	19,99	1,84	1,776	1,33	0,407
5,3	0,27	42,26	38,10	1,42	2,470	1,11	0,316
8,5	3,64	43,85	36,13	1,48	2,334	1,06	0,307
10,5	5,59	32,99	33,57	1,51	2,438	0,95	0,258
15,0	50,98	12,80	12,36	1,98	1,389	2,19	0,796
16,0	8,31	35,92	21,58	1,83	1,986	1,38	0,380
17,0	14,46	25,12	16,45	2,13	1,860	1,36	0,343

TABELA:B.8 - VALORES DE FLUXO DE CALOR REFERENTES AO FURO (3);ATINENTES AO PERÍODO DE MARÇO/85 A
FEVEREIRO/86 ÀS 9:00h LOCAL - Unidade em ($W.m^{-2}$)

$\Delta Z(m)$	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEV/86
0,02-0,1	- 7,88	- 7,88	- 7,88	-11,81	-15,75	-15,75	+ 3,94	+74,81	+51,19	+15,75	+ 3,94	0,0
0,1 -0,2	- 8,52	-11,36	-14,20	-14,20	-17,04	-14,20	-19,81	-34,08	-19,88	-14,20	-17,04	-17,04
0,2 -0,3	-15,72	-15,72	-13,10	-18,34	-18,34	-18,34	-13,10	- 7,86	-15,72	- 7,86	- 7,86	- 7,86
0,3 -0,5	- 6,57	- 4,38	- 7,67	- 7,67	- 8,76	---	-14,24	- 7,67	- 6,57	- 6,57	- 5,48	- 5,48
0,5 -1,0	+ 5,97	+ 5,88	+ 8,86	+ 9,15	+ 3,06	---	+ 7,02	+ 3,32	+ 2,04	+ 2,23	+ 2,84	+ 3,27
1,0 -3,0	- 0,72	- 0,70	- 0,54	- 0,16	+ 0,72	+ 0,54	+ 0,91	+ 1,97	+ 1,39	- 0,13	- 0,26	- 0,56
3,0 -6,0	+ 0,25	+ 0,31	+ 0,22	+ 0,27	+ 1,37	+ 0,54	+ 0,26	+ 0,31	+ 0,40	+ 0,54	+ 0,35	+ 0,46

TABELA:B.2 - VALORES DE FLUXO DE CALOR REFERENTES AO FURO (3), ATINENTES AO PERÍODO DE MARÇO/85 A
FEVEREIRO/86 ÀS 18:00h LOCAL - Unidade em ($W.m^{-2}$)

$\Delta Z(m)$	MAR/85	ABR/85	MAI/85	JUN/85	JUL/85	AGO/85	SET/85	OUT/85	NOV/85	DEZ/85	JAN/86	FEV/86
0,02-0,1	- 3,94	-11,81	-19,69	-11,81	-23,63	-23,63	-39,38	-51,19	-47,25	-23,63	-15,75	-19,69
0,1 -0,2	0,0	+ 2,84	+11,36	+22,72	+17,04	+28,40	+28,40	+ 8,52	+ 2,84	- 2,84	- 5,68	+ 5,68
0,2 -0,3	+15,72	+10,48	+13,10	+10,48	+20,96	+15,72	+13,10	+28,82	+28,82	+15,72	+20,96	+18,34
0,3 -0,5	+ 1,10	+ 1,10	0,0	- 2,19	0,0	---	- 1,10	+ 7,67	+ 7,67	+ 2,19	+ 4,38	+ 4,38
0,5 -1,0	+ 5,59	+ 5,97	+ 8,96	+ 9,76	+ 5,83	---	+ 6,07	+ 3,89	+ 1,52	+ 2,28	+ 1,99	+ 2,84
1,0 -3,0	- 0,74	- 0,72	- 0,40	- 0,19	+ 0,34	+ 0,51	+ 0,91	+ 1,95	+ 1,39	- 0,24	- 0,26	- 0,50
3,0 -6,0	+ 0,25	+ 0,31	+ 0,22	+ 0,27	+ 0,46	+ 0,54	+ 0,26	+ 0,31	+ 0,40	+ 0,56	+ 0,39	+ 0,43