

ESTUDO HIDROGEOTÉRMICO DAS BACIAS DO ESPÍRITO SANTO E MUCURI

HYDROTHERMIC STUDY OF THE ESPÍRITO SANTO AND MUCURI BASINS

Antônio Cosme Del Rey¹ e Sylvio Geraldo Zembruscki²

RESUMO — Foi realizado um estudo hidrogeotérmico das bacias do Espírito Santo e Mucuri. Neste trabalho, consideraram-se fatores perturbadores das medidas de temperatura de fundo do poço, e propõe-se uma metodologia que diminua as incertezas na sua determinação. Foram medidos valores de condutividade térmica em 218 amostras obtidas de testemunhos das diversas litologias presentes nas bacias. Os resultados obtidos mostraram uma relação linear entre a profundidade e os valores de condutividade térmica dos arenitos, folhelhos e carbonatos. Com base nos dados de temperatura de fundo de poço e condutividade térmica, foram calculados valores de fluxo geotérmico pelo método de resistividade térmica cumulativa e confeccionados mapas de isofluxo geotérmico que indicaram anomalias relacionadas aos principais traços estruturais das bacias. Os estudos hidrodinâmicos e as análises químicas das águas das formações sugerem condições estagnantes para aquelas bacias, sem interferência de águas meteóricas e sem movimentação de fluidos.

(Originais recebidos em 08.11.89).

ABSTRACT — *A hydrothermic study of the Espírito Santo and Mucuri basins was conducted, taking into account the factors that affect bottomhole temperature measurements. A methodology that reduced uncertainty in ascertaining these temperatures is proposed. Thermal conductivity values were obtained from 218 core samples of different lithologic types found in these basins. Results reveal a linear relationship between depth and thermal conductivity values for sandstones, shales, and limestones. Based on bottomhole temperature and thermal conductivity data, heat flow values were calculated by means of the cumulative thermal resistivity method and heat flow maps were then drawn up; these indicate anomalies related to the major structural delineations. Hydrodynamic studies and chemical analysis of formation water suggest that conditions in these basins are stagnant, experiencing no affect from meteoric waters or fluid motion.*

(Expanded abstract available at the end of the paper).

1 — INTRODUÇÃO

Estudos hidrogeotérmicos em bacias sedimentares têm-se mostrado eficazes como ferramenta auxiliar de pesquisa na interpretação da geração, migração e armazenamento de hidrocarbonetos. Internacionalmente, tem crescido sobremaneira o número de trabalhos nesta linha de pesquisa.

No Brasil, mais precisamente no âmbito da PETROBRÁS, os primeiros estudos sobre o regime geotérmico e as condições hidrodinâmicas das bacias sedimentares vêm-se desenvolvendo desde a década de 60, porém, na medida das necessidades e em trabalhos independentes. Atualmente, entretanto, trabalhos associando matérias afins, que se auxiliam mutuamente, são cada vez mais freqüentes.

Os trabalhos anteriores sobre o regime geotér-

mico das bacias do Espírito Santo e Mucuri foram realizados por Meister (1973), Wolff (1979), Rossi Filho (1981) e Zembruscki (1984a). Quanto ao regime hidrodinâmico, nenhum trabalho foi até agora realizado. Geoquimicamente, a Bacia do Espírito Santo e os campos de óleo conhecidos foram analisados por Estrella *et al.* (1989).

Este trabalho apresenta uma revisão e atualização das informações sobre temperaturas em subsuperfície, integradas aos parâmetros hidroquímicos e hidrodinâmicos das bacias do Espírito Santo e Mucuri; define o valor da condutividade térmica dos diversos tipos litológicos presentes e apresenta um estudo sobre o regime geotérmico regional (gradiente e fluxo) e sua associação com as características químicas das águas das formações, com a hidrodinâmica e com a estruturação destas bacias.

1 - Divisão Regional de Operações Geológicas (DIRGEO), Distrito de Exploração do Espírito Santo (DEXES), BR 101 — km 67,5, São Mateus-ES, Brasil.
2 - *In Memoriam.*

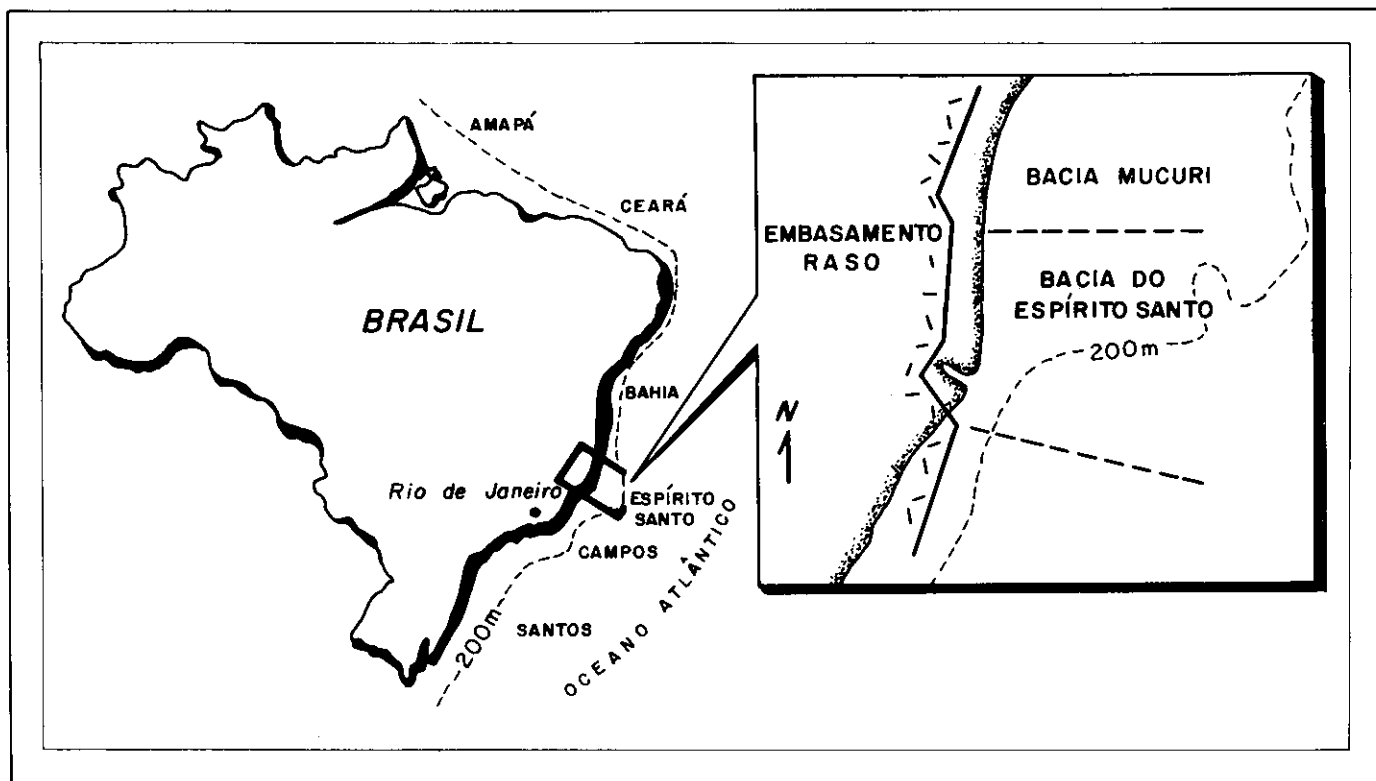


Fig. 1 - Localização das bacias do Espírito Santo e Mucuri (modificado de Estrella *et al.* 1984).
 Fig. 1 - Location of the Espírito Santo and Mucuri basins (modified from Estrella *et al.* 1984).

2 – ASPECTOS GEOLÓGICOS

As bacias do Espírito Santo e Mucuri abrangem uma área aproximada de 30 000 km² em suas porções emersa e submersa (fig. 1).

Possuem uma coluna sedimentar desenvolvida desde o Cretáceo Inferior até o Quaternário (figs. 2 e 3). Nas diversas províncias geológicas dessas bacias identificam-se feições paleogeomorfológicas, sendo as mais significativas os *canyons* de Regência, Fazenda Cedro e Mucuri, e as plataformas de Regência e São Mateus (fig. 4).

Estruturalmente, ao nível do topo do embasamento, as bacias estudadas apresentam-se como um homoclinal composto por blocos falhados com mergulho para leste. Isto é apresentado esquematicamente na figura 3.

As falhas exibem direções principais NNW-SSE, N-S e NE-SW e rejeitos variáveis. As falhas alinhadas segundo N-S parecem possuir atuação mais tardia, exercendo importante controle na estruturação de toda a coluna sedimentar até o topo do Cretáceo Inferior (Albiano), dando origem aos principais *trends* estruturais de interesse para prospecção de hidrocarbonetos.

Alguns destes falhamentos apresentam-se como planos preferenciais de fraqueza desde as primeiras fases de construção dessas bacias mantendo-se ativos, em alguns casos, até o Terciário. Como exemplo

temos a Falha de Cedro, que ocorre no *Canyon* de Fazenda Cedro, cortando sedimentos desde o topo do embasamento até o Terciário, com rejeitos de até 1 km.

A seção estratigráfica situada abaixo do topo do Andar Alagoas (Formação Mariricu) apresenta comportamento estrutural consistente com o padrão estrutural do embasamento, mostrando mergulhos regionais crescentes de oeste para leste. Nesta seção predominam falhas normais; os blocos são, em geral, escalonados e rebaixados para leste, mas a oeste do feixe de falhas do Rio Doce aumenta a ocorrência de falhas antitéticas.

Na seção albiana (Formação Barra Nova), predominam falhas adiastróficas de geometria lítrica; o padrão de falhamentos é mais intenso, gerando pequenos blocos individualizados (fig. 3). No bloco alto, a leste do feixe de falhas do Rio Doce, verifica-se a ocorrência de estruturas mais amplas.

Os folhelhos, do Cretáceo Superior ao Terciário (Formação Urucutuca), depositaram-se predominantemente no bloco baixo do feixe de falhas do Rio Doce e nos *canyons* de Fazenda Cedro, Regência e Mucuri. Neles, observam-se falhas predominantemente de geometria lítrica, guardando forte condicionamento com falhas antigas do embasamento e indicando, em alguns casos, uma possível reativação.

Estas falhas parecem ser os principais condutos para a migração de fluidos nesta seção, pois estão

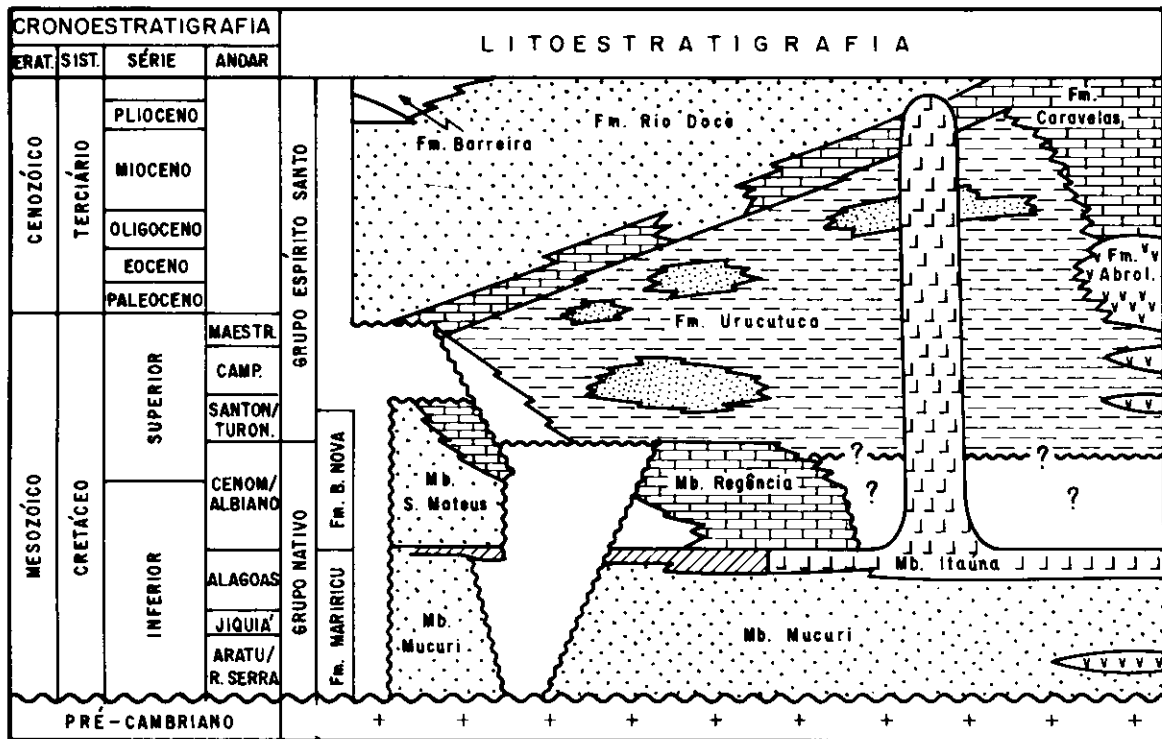


Fig. 2 - Coluna estratigráfica da Bacia do Espírito Santo (modificado de Dauzacker, 1981. In: Rangel, 1984).
 Fig. 2 - Stratigraphic column of the Espírito Santo Basin (modified from Dauzacker, 1981. In: Rangel, 1984).

associadas a algumas das principais acumulações de hidrocarbonetos presentes nas duas bacias.

Durante o Cretáceo Superior e Terciário, as bacias do Espírito Santo e Mucuri foram palco do intenso magmatismo que originou o Complexo Vulcânico de Abrolhos.

3 – AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS

3.1 – Temperaturas e Gradiente Geotérmico

Para este estudo, foram coletados dados de temperatura em 336 poços exploratórios, obtidos durante

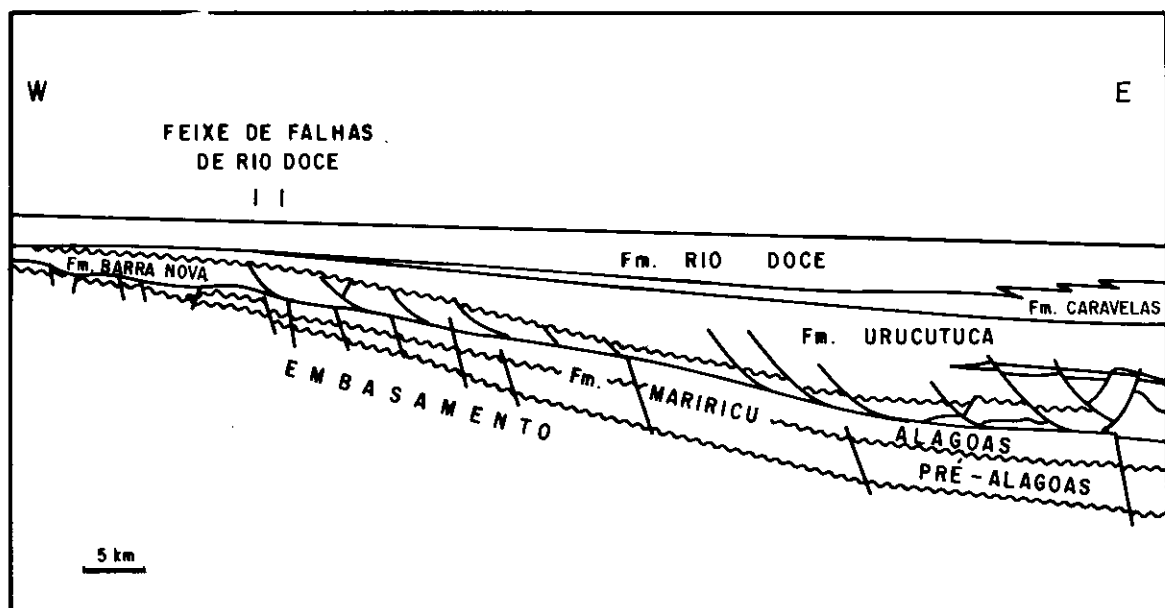


Fig. 3 - Seção geológica esquemática da Bacia do Espírito Santo (DEXES/DINTER).
 Fig. 3 - Schematic geological section of the Espírito Santo Basin (DEXES/DINTER).

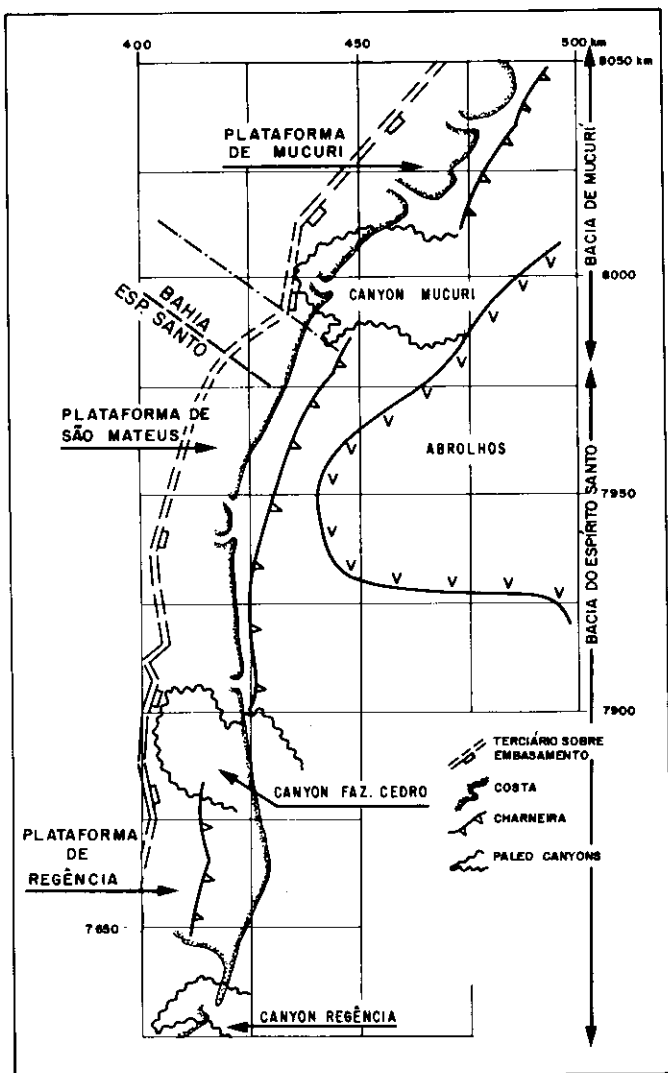


Fig. 4 - Feições paleogeomórficas das bacias do Espírito Santo e Mucuri (coordenadas UTM MC 39° W).

Fig. 4 - Paleogeomorphic features of the Espírito Santo and Mucuri basins (coordinates UTM MC 39° W).

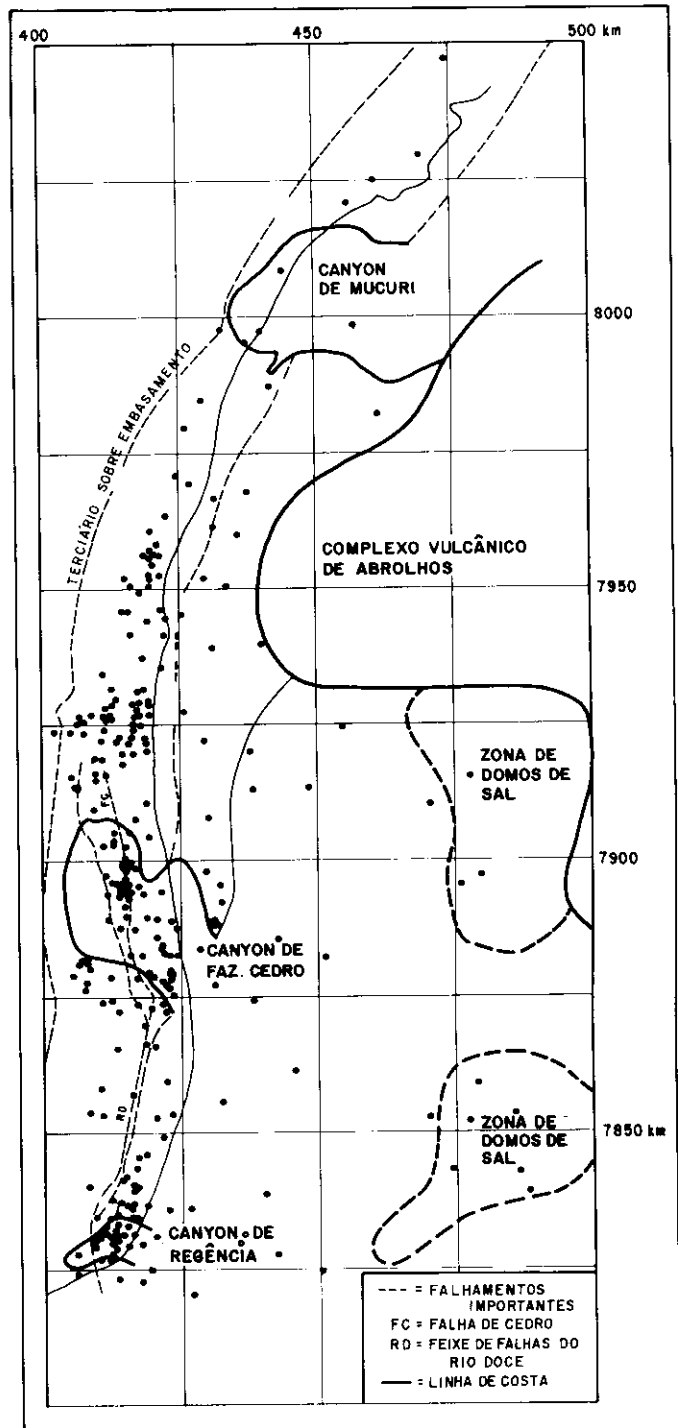


Fig. 5 - Distribuição dos poços nas duas bacias.
Fig. 5 - Distribution of wells in the two basins.

perfilagens elétricas e testes de formação (fig. 5). Na maioria dos casos, dispõe-se de apenas uma medida de temperatura à profundidade final do poço.

As temperaturas obtidas de testes de formação foram consideradas como valores estáticos, ou seja, medidas não afetadas pela atividade de perfuração; já aquelas registradas em perfilagens elétricas foram corrigidas para tal efeito através do método proposto por Bullard (1947).

Pode-se representar o retorno do meio às condições originais através da expressão a seguir, simplificada para as condições em que são registradas as temperaturas de fundo de poço.

$$T_s = T_f - \frac{Q}{4\pi K} \ln \left(\frac{t_d + t_s}{t_s} \right)$$

onde:

T_s = temperatura da formação após um tempo t_d do término da circulação;

- T_f = temperatura da formação não perturbada;
- t_s = tempo em que a formação foi perturbada pela atividade de perfuração;
- t_d = tempo decorrido após o término da circulação;
- Q = quantidade de calor retirada da formação por unidade de tempo;
- K = condutividade térmica das rochas.

Foi considerado "tempo de perturbação da formação" aquele em que a temperatura da formação é reduzida pela ação de perfurar, como o tempo necessário para perfurar os últimos 16 m, mais o tempo de circulação da lama no poço após o término de perfuração. Considerou-se, também, que o tempo em que o termômetro ficou no fundo do poço foi suficiente para estabilizar a leitura de temperatura.

Nas perfilagens onde foi realizada mais de uma descida, foi possível a obtenção da temperatura da formação, corrigida para o efeito da perfuração através de uma regressão linear entre $\ln(t_d + t_s)/t_s$ e T_s . Além do valor T_f , foi possível obter valores de $Q/4\pi K$ que, plotados em função da profundidade das leituras, fornecem uma distribuição relativamente regular de pontos (fig. 6). Pode-se verificar na figura 6 um aumento deste fator com a profundidade, que pode ser atribuído à combinação de: 1) um aumento progressivo da condutividade térmica das rochas com a profundidade, e 2) um aumento da diferença entre a temperatura do fluido de perfuração e a da formação. Desta forma, foi estabelecida a seguinte relação geral entre a profundidade e o fator $Q/4\pi K$, considerada válida para as bacias estudadas:

$$Q/4\pi K = 1\,079 - 1\,024 \times 10^{-3} \text{ prof.} + 5.24 \times 10^{-6} \text{ prof.}^2$$

Esta relação foi utilizada para a correção dos valores de temperatura em °F com apenas um registro. Os dados assim obtidos possuem grau de incerteza de $\pm 5^\circ\text{C}$.

No geral, os valores de temperatura cadastrados apresentam bom grau de coerência, mostrando serem confiáveis. Este fato pode ser constatado na figura 7, onde estão plotados os valores de temperatura *versus* profundidade de todos os poços estudados.

Inicialmente, tentou-se realizar uma regressão linear com base nestes valores, sendo obtido um gradiente de temperatura médio para as duas bacias, de $29^\circ\text{C}/\text{km}$, com uma temperatura de superfície de 18°C . Este valor de temperatura de superfície é anômalo em relação às demais bacias (tabela I) e indicam a influência dos poços da porção marinha, que possuem uma temperatura superficial menor que a da porção terrestre.

Realizou-se, então, um estudo separado das porções mar e terra, obtendo-se valores mais coerentes com os observados em outras bacias. Desta forma, foi possível o cálculo dos gradientes geotérmicos médios para cada poço, através das seguintes expressões:

$$\text{Gradiente geotérmico (para medidas em poços terrestres)} = \frac{\text{temperatura (em } ^\circ\text{C)} - 24^\circ\text{C}}{\text{profundidade}}$$

$$\text{Gradiente geotérmico (para cálculos nos poços da área marinha)} = \frac{\text{temperatura (em } ^\circ\text{C)} - 8^\circ\text{C}}{\text{profundidade}}$$

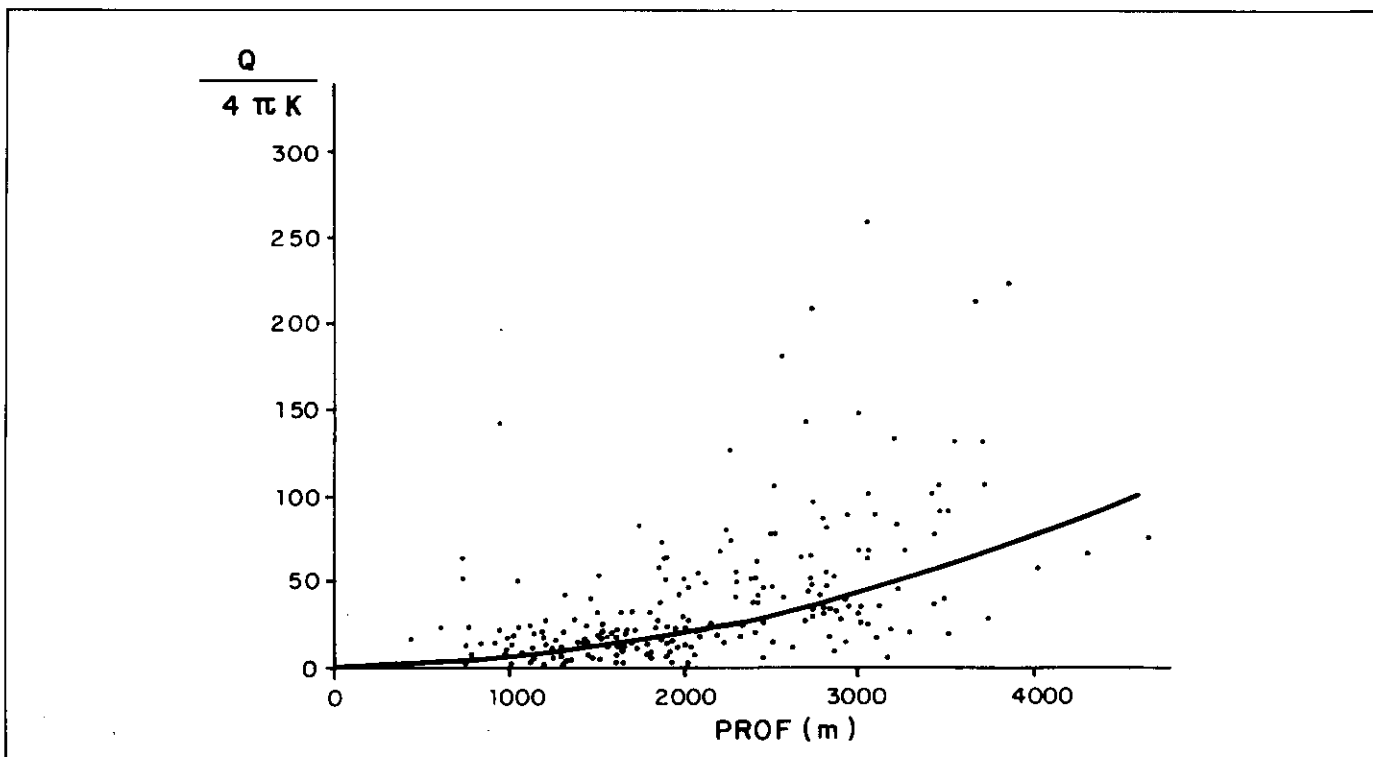


Fig. 6 - Relação entre os valores do fator $Q/4\pi K$ com a profundidade; a curva marcada foi obtida através do ajuste de um polinômio de segundo grau.

Fig. 6 - Relationship between the values of the $Q/4\pi K$ factor with depth; the curve marked was obtained by an adjustment of a second degree polynomial.

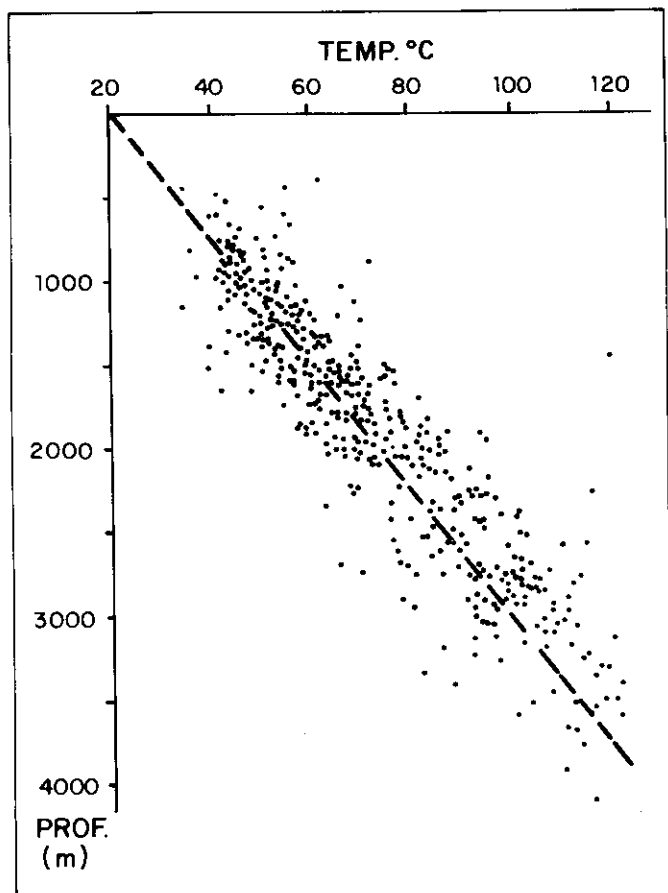


Fig. 7 - Gráfico de temperaturas versus profundidade de todos os poços exploratórios das duas bacias, até dezembro 1987.

Fig. 7 - Graph of temperature versus depth of all the exploratory wells in the two basins, up to December 1987.

Os gradientes geotérmicos obtidos, abstraindo-se os valores extremos isolados (não confiáveis), variam entre 17 e 47°C/km; os maiores valores ocorrem na borda oeste das duas bacias, próximo ao embasamento raso, e nas regiões submersas onde

há maior espessura de sedimentos marinhos pelíticos.

3.2 - Condutividade Térmica

Foram realizadas medidas de condutividade térmica em 218 amostras, obtidas de testemunhos dos poços 2-N-1-ES, 1-RA-1-ES, 1-PDI-1-ES, 1-FCN-2-ES, 2-CB-1-ES, 1-BS-1-ES e 7-LP-10-ES. Esta amostragem procurou abranger, em vários níveis de profundidade, todos os litotipos da coluna estratigráfica das bacias em estudo, a fim de se obterem valores médios representativos. O método utilizado para realização das medidas foi o da fonte linear de calor (Von Herzen e Maxwell, 1969) adaptado para o espaço semi-infinito, conforme proposto por Maragoni e Del Rey (1986). Quando possível, foram feitas determinações da condutividade térmica nas direções perpendicular e paralela ao acamamento ou laminação das rochas. Com isto, visou-se analisar a anisotropia térmica das rochas, constatando-se que na maioria das amostras este fator é pouco importante, pois a diferença entre as condutividades paralela e perpendicular é inferior ao erro experimental.

Inicialmente, optou-se pelo estabelecimento de valores médios de condutividade para cada litologia, conforme listado na tabela II.

Analisando-se a tabela II constata-se que não há diferença significativa entre a condutividade térmica média dos mesmos tipos litológicos nas diversas formações, excetuando-se a Formação Rio Doce. Por outro lado, analisando-se os valores obtidos, verifica-se um aumento progressivo e linear da condutividade térmica das rochas com a profundidade. Na figura 8, observa-se esta relação para os arenitos, folhelhos e carbonatos amostrados.

Desta forma, optou-se pela utilização destas relações para se estimar a condutividade térmica das rochas nas bacias do Espírito Santo e Mucuri.

TABELA I / TABLE I

GRADIENTES GEOTÉRMICOS E TEMPERATURAS DE SUPERFÍCIE DE ALGUMAS BACIAS BRASILEIRAS ESTUDADAS GEOTHERMAL GRADIENTS AND SURFACE TEMPERATURES OF SOME BRAZILIAN BASINS STUDIED

Bacia	Gradiente (°C/km)	Temperatura de Superfície (°C)	Referência
Médio Amazonas	23	27	Zembruscki (1984b)
Barreirinhas	23	30	Zembruscki, Azevedo (1987)
Parnaíba	19	28	Zembruscki, Campos (1988)
Marajó	22	24	Zembruscki (1984a)
Espírito Santo — terra	26	24	Valores obtidos neste trabalho
Espírito Santo — mar	34	08	Valores obtidos neste trabalho

TABELA II / TABLE II
VALORES MÉDIOS DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA EM W/m °C
AVERAGE THERMAL CONDUCTIVITY VALUES IN W/m °C

Formação	Argila/ Folhelho	Areia/ Arenito	Carbonatos	Anidrita	Outros
Rio Doce	1,6+/-0,9	1,9+/-0,3	—	—	—
Caravelas	—	—	2,3+/-0,3	—	—
Urucutuca	1,9+/-0,5	2,7+/-0,8	—	—	—
Barra Nova	1,7+/-0,5	2,5+/-0,8	3,0+/-0,3	—	—
Mariricu	2,4+/-0,5	2,8+/-0,7	2,9+/-0,4	5,7+/-0,4	—
Básicas	—	—	—	—	2,1+/-0,2
Embasamento	—	—	—	—	3,9+/-0,2

Este tipo de constatação é freqüente em bacias sedimentares e vem sendo atribuído ao efeito de compactação das rochas sobre a condutividade

térmica. Este efeito tende a reduzir o espaço poroso de algumas rochas, aumentando a sua condutividade.

Por outro lado, a condutividade térmica diminui com o aumento da temperatura, em função de um desordenamento molecular dos elementos formadores das rochas (Hamza, 1987). Esta variação torna-se substancial quando o aumento de temperatura é superior a 50 °C, sendo necessário estabelecer uma correção dos valores de condutividade medidos. Com este fim, foi utilizada a relação empírica proposta por Chapman *et al.* (1984), válida para a maioria das rochas estudadas:

$$K_z = K_o \times T_o/T_z$$

onde:

K_z = condutividade térmica em W/m°C da rocha a uma temperatura T_z em Kelvin ($T^\circ\text{C} + 273$);

K_o = condutividade térmica a uma temperatura T_o .

Desta forma, foram utilizadas as seguintes expressões para definir a condutividade térmica das rochas compactáveis a uma profundidade "z", em quilômetros:

Pelitos

$$K_{flh} = (1,40 + 0,4 Z) \times 303/(291 + 29 Z)$$

Psamitos

$$K_{arn} = (1,25 + 0,6 Z) \times 303/(291 + 29 Z)$$

Carbonatos

$$K_{carb} = (1,85 + 0,6 Z) \times 303/(291 + 29 Z)$$

Para rochas pouco ou não compactáveis, foram utilizadas as seguintes expressões:

Anidrita/halita

$$K_{and} = 5,7 \times 303/(291 + 29 Z)$$

Basalto

$$K_{bas} = 2,1 \times 303/(291 + 29 Z)$$

Gipsita

$$K_{gip} = 1,3 \times 303/(291 + 29 Z)$$

Metamórficas

$$K_{mni} = 3,9 \times 303/(291 + 29 Z)$$

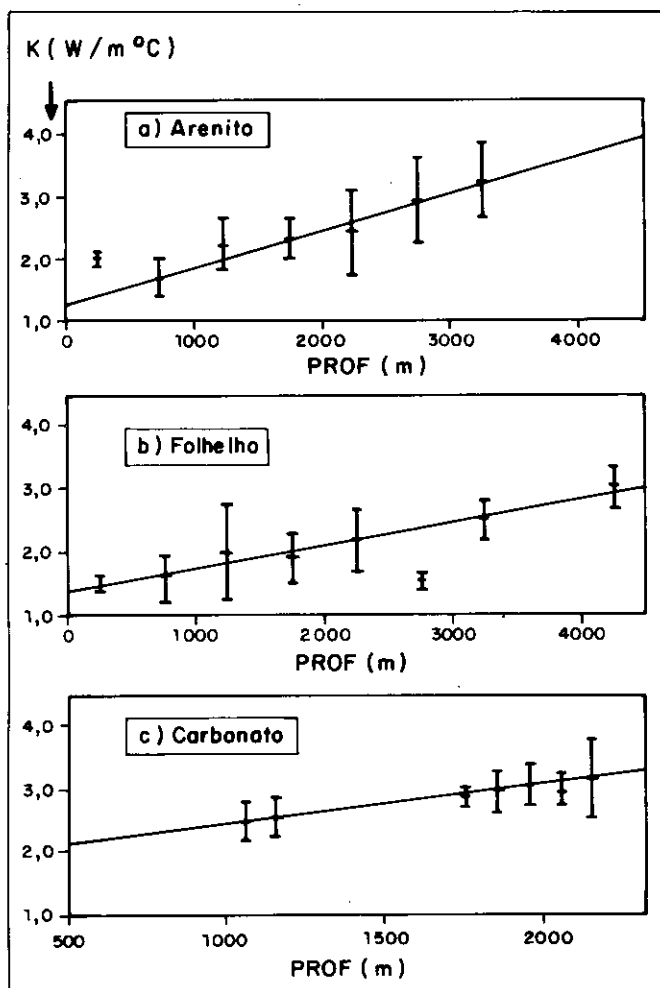


Fig. 8 - Relação entre condutividade térmica e profundidade obtida de amostras de testemunhos. As barras representam o desvio-padrão das médias.

Fig. 8 - Relationship of thermal conductivity and depth obtained from core samples. The bars represent the standard deviation of the mean.

A faixa de variação dos valores de condutividade térmica das rochas assim obtida é coerente com aquela descrita em Kappelmeyer e Haenel (1974). A relação estabelecida para os carbonatos mostra, além do efeito da compactação, o de progressiva dolomitização, pois as condutividades passam, com a profundidade, a variar de valores próximos àqueles da calcita (1,7 - 2,7 W/m°C), para valores próximos aos da dolomita (2,5 - 3,8 W/m°C).

3.3 – Fluxo Geotérmico

O método utilizado para determinação do fluxo geotérmico condutivo foi o da resistência térmica cumulativa, proposto por Bullard (1930). Este método relaciona as variações de temperatura em uma coluna de rochas a uma resistência térmica através da seguinte expressão:

$$dT = q_0 \times \int_A 1/K(Z) dZ$$

onde:

dT = variação da temperatura entre os pontos de uma coluna de rochas com espessura A ;

$K(Z)$ = condutividade térmica de uma camada de profundidade Z com espessura dZ ;

q_0 = fluxo geotérmico condutivo.

Este método parte da premissa de que o fluxo de calor se processa na vertical e com intensidade constante, ou seja, que não há geração ou fluxo lateral de calor no intervalo pesquisado. Isto, normalmente, é válido nos poços analisados.

A fim de agilizar os cálculos das resistências térmicas cumulativas dos poços, foi confeccionado um programa em FORTRAN, que utiliza o arquivo geral de poço do DEPEX na opção LITOLOGO. Este programa calcula as resistências térmicas no poço a cada 100 m, tomando por base os valores de condutividade térmica obtidos a partir das expressões acima apresentadas, e as espessuras das camadas digitalizadas no arquivo. Desta forma, foi possível se chegar rapidamente às resistências térmicas cumulativas para o cálculo do fluxo geotérmico.

A variação de temperatura foi considerada como a medida no poço, subtraída da média de superfície, considerando-se a diferença entre os poços de terra (24°C) e mar (8°C).

Os valores de fluxo geotérmico obtidos variaram entre 24 e 112 mW/m², com uma média de 47 mW/m² para os poços de terra e 68 mW/m² para os poços do mar. A distribuição dos valores é assimétrica; com moda entre 40 e 50 mW/m², mostrando maior espalhamento nos valores superiores a 50 mW/m². Estes dados apresentam boa concordância com os obtidos em outras bacias marginais (Sclater *et al.* 1980).

3.4 – Parâmetros Hidrodinâmicos e Química das Águas de Formação

A exemplo de estudos que integram parâmetros geotérmicos com os de hidrodinâmica, tais como efetuados nas bacias do Médio Amazonas (Campos e Zembruscki, 1987) e Parnaíba (Zembruscki e Campos, 1988), procedeu-se a um mapeamento das pressões estáticas medidas em testes de formação e análises químicas das águas de formação, principalmente salinidade e composição iônica (fornecidas pelo DEPEX/DIAF/SETRA), parâmetros estes que indicam o condicionamento hidrodinâmico atual das bacias.

As formações visadas foram aquelas que apresentam melhores indícios e/ou produção de hidrocarbonetos, ou seja, as formações Urucutuca (Cretáceo Superior ao Terciário), Barra Nova (Albiano) e Mariricu (Cretáceo Inferior), onde se concentra a grande maioria das medições.

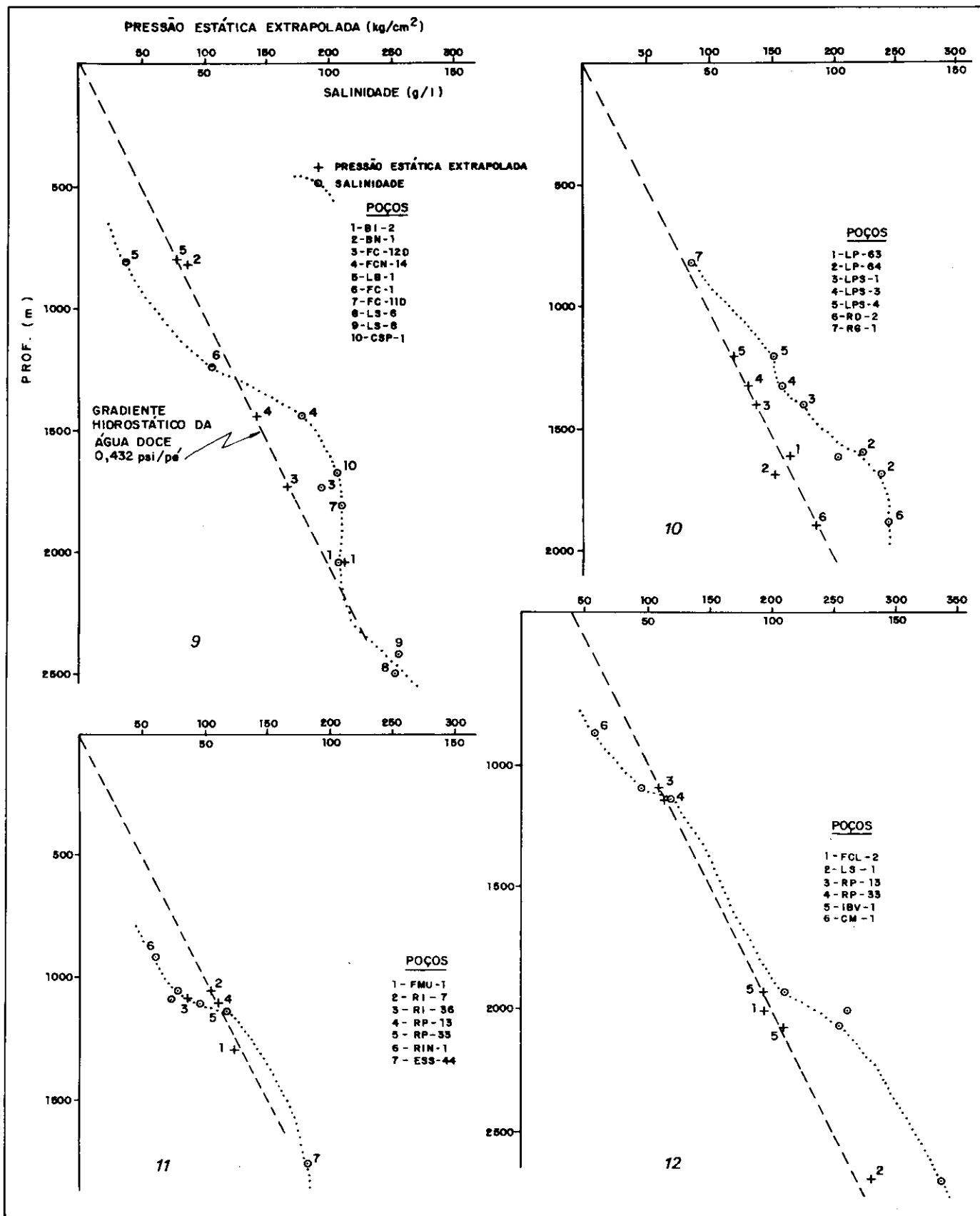
Com relação à pressão estática extrapolada, a Formação Urucutuca tem dados confiáveis em 11 poços, distribuídos principalmente nas regiões do *Canyon* de Regência e plataformas contíguas; a Formação Barra Nova apresenta dados em 12 poços mais dispersos, desde a Plataforma de São Mateus até o extremo sul da Bacia do Espírito Santo; e a Formação Mariricu tem dados em 30 poços mais concentrados na Plataforma de São Mateus e *Canyon* de Fazenda Cedra.

Cerca de 700 análises químicas de água de formação foram efetuadas em amostras de aproximadamente 200 poços. Destas, apenas 71 foram consideradas adequadas aos estudos hidrogeoquímicos por sua congruência de conjunto, a maioria concentrada na Formação Mariricu. Para a classificação genética das águas e cálculo de parâmetros hidrogeoquímicos, utilizou-se um número bem menor (19 análises).

Sabe-se que as amostras coletadas são frequentemente contaminadas pelos fluidos de perfuração e pelos "colchões" aplicados aos testes de formação. As análises químicas detectam todos os ingredientes envolvidos, aqueles naturais das formações e os adicionados. Por isso é que, de um número grande de análises, decidiu-se aproveitar apenas os resultados de análises mais coerentes (ou seja, mais agrupados) e que, portanto, seriam mais confiáveis.

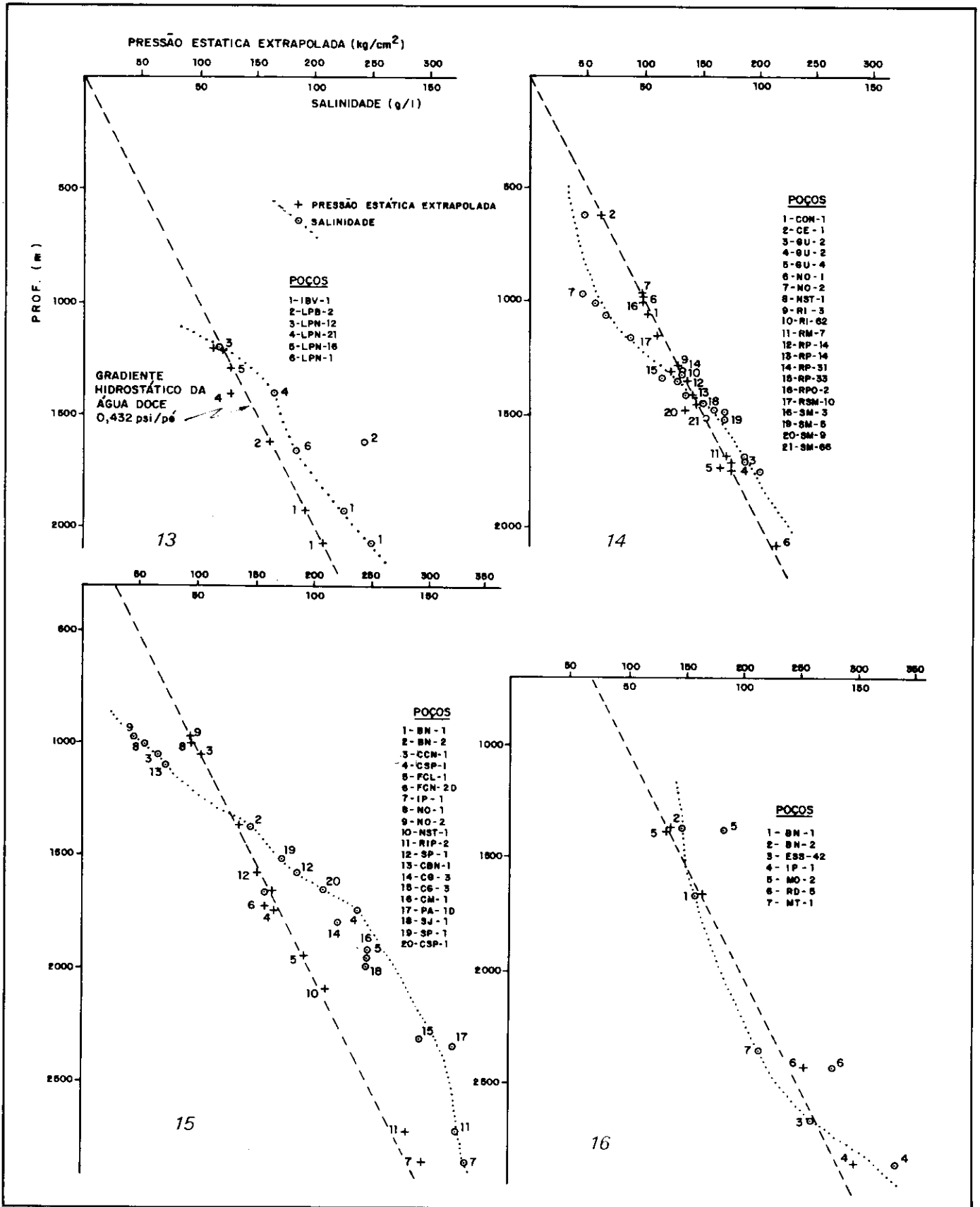
Foram elaborados oito gráficos de pressão estática extrapolada *versus* profundidade. Cada gráfico refere-se a uma mesma formação, em diversas províncias geológicas (figs. 9 a 16). Nestes gráficos, foram plotados também os respectivos dados de salinidade.

Há que se notar, entretanto, que não se procedeu a um estudo hidrogeoquímico exaustivo ou completo, e sim, somente aos parâmetros que pudessem se correlacionar ou complementar a interpretação geotérmica.



Figs. 9 a 12 - Gradientes de pressão estática extrapolada e salinidade, ambos versus profundidade, para as seguintes formações e regiões: fig. 9 - Urucutuca, Canyon de Fazenda Cedro; fig. 10 - Urucutuca, Canyon de Regência; fig. 11 - Barra Nova, Plataforma de São Mateus; fig. 12 - Barra Nova, Canyon de Fazenda Cedro.

Figs. 9 to 12 - Extrapolated static pressure and salinity gradients, both versus depth, for the following formations and regions: fig. 9 - Urucutuca, Cedro Fazenda Canyon; fig. 10 - Urucutuca, Regência Canyon; fig. 11 - Barra Nova, São Mateus Platform; fig. 12 - Barra Nova, Cedro Fazenda Canyon.



Figs. 13 a 16 - Gradientes de pressão estática extrapolada e de salinidade, ambos *versus* profundidade, para as seguintes formações e regiões: fig. 13 - Barra Nova, Plataforma de Regência e Canyon de Regência; fig. 14 - Mariricu, Plataforma de São Mateus; fig. 15 - Mariricu, Canyon de Fazenda Cedro; fig. 16 - Mariricu, Canyon de Regência.

Figs 13 to 16 - Extrapolated static pressure and salinity gradients both *versus* depth for the following formations and regions: fig. 13 - Barra Nova, Regência Platform; fig. 14 - Mariricu, São Mateus Platform; fig. 15 - Mariricu, Cedro Fazenda Canyon; fig. 16 - Mariricu, Regência Canyon.

4 – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS DADOS

4.1 – Anomalias Geotérmicas e suas Relações Geológicas

Na figura 17, é apresentado o mapa de gradiente geotérmico médio das bacias. Pode-se notar um forte alinhamento de anomalias térmicas com direção aproximada N-S. Estes alinhamentos estão condicionados, na maioria dos casos, às principais falhas, notadamente às de Cedro e do Rio Doce.

Na região da Falha de Cedro, nota-se uma alternância de altos e baixos gradientes alinhados ao longo de seu traço, indicando um forte controle na distribuição subsuperficial de temperaturas. A fim de se analisarem estas anomalias em profundidades foi con-

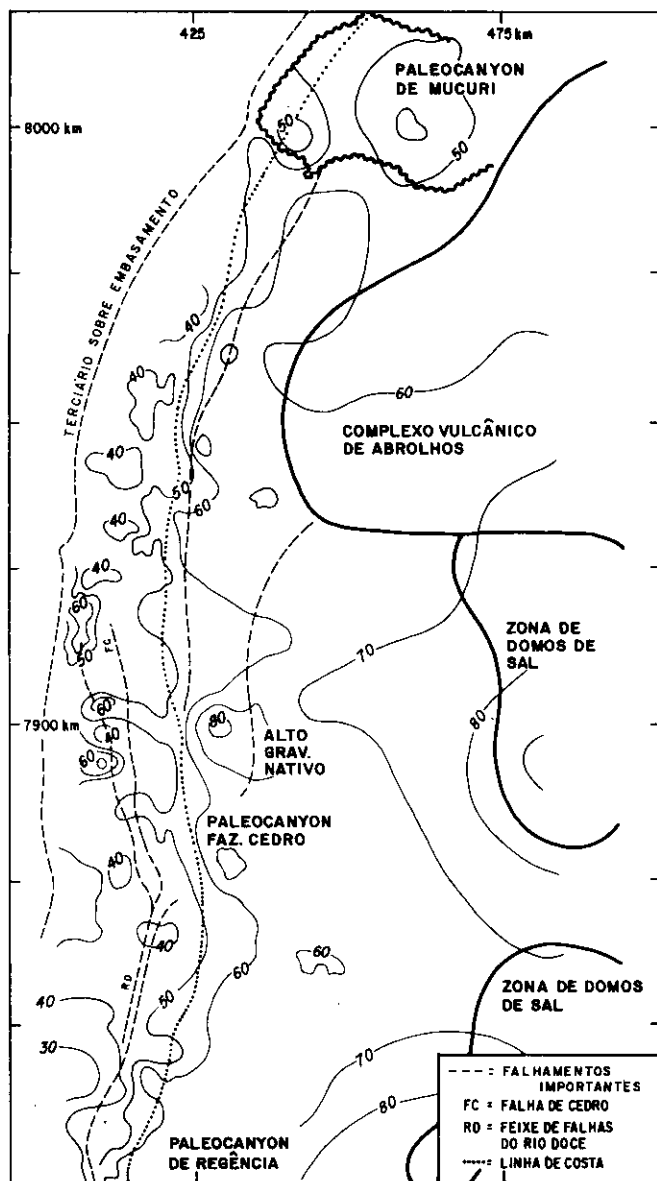


Fig. 17 - Mapa do gradiente geotérmico (°C/km).
Fig. 17 - Geothermic gradient map (°C/km).

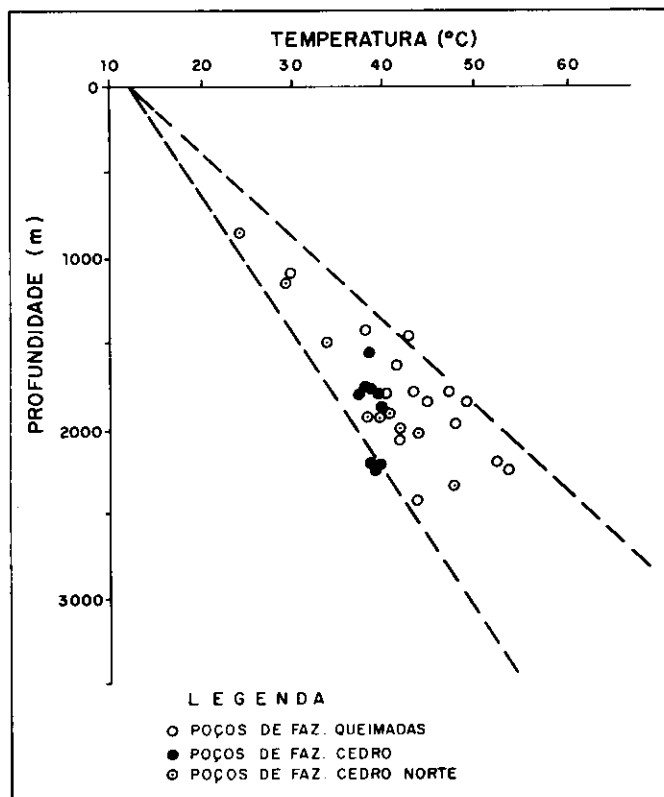


Fig. 18 - Gráfico de temperatura versus profundidade de poços da área nordeste do Canyon de Fazenda Cedro.

Fig. 18 - Graph of temperature versus depth of wells in the north east Cedro Fazenda Canyon.

feccionado um gráfico de temperatura versus profundidade (fig. 18), onde nota-se um aumento progressivo de temperaturas, partindo-se do Campo de Fazenda Cedro para o de Fazenda Queimadas.

Foram constatados outros alinhamentos de anomalias com direção NE-SW. Destes, o que está mais evidente passa aproximadamente pelo eixo deposicional do Canyon de Fazenda Cedro. Esta feição paleogeomorfológica teria sido instalada ao longo de uma zona deprimida do embasamento, que possivelmente está associada a falhamentos (Rangel, 1984). Estes falhamentos ainda não foram rastreados sismicamente devido à deficiência de sinal a este nível nas seções sísmicas da área (Silveira, 1988).

Na figura 19, é apresentado o mapa de fluxo geotérmico através da coluna sedimentar, no qual foram considerados os efeitos da variação da condutividade térmica. Neste mapa, podem-se notar anomalias maiores, da ordem de dezenas de quilômetros de extensão, ligadas às principais estruturas das bacias.

As zonas de ocorrência de domos de sal estão claramente marcadas por valores de fluxo superiores a 80 mW/m^2 , mostrando serem zonas preferenciais de condução de calor. O Alto Gravimétrico de Nativo também está marcado por uma anomalia positiva, com valores superiores a 80 mW/m^2 e extensão da ordem de 10 km , que pode estar relacionada a um fenômeno localizado provavelmente no embasamento. O Canyon

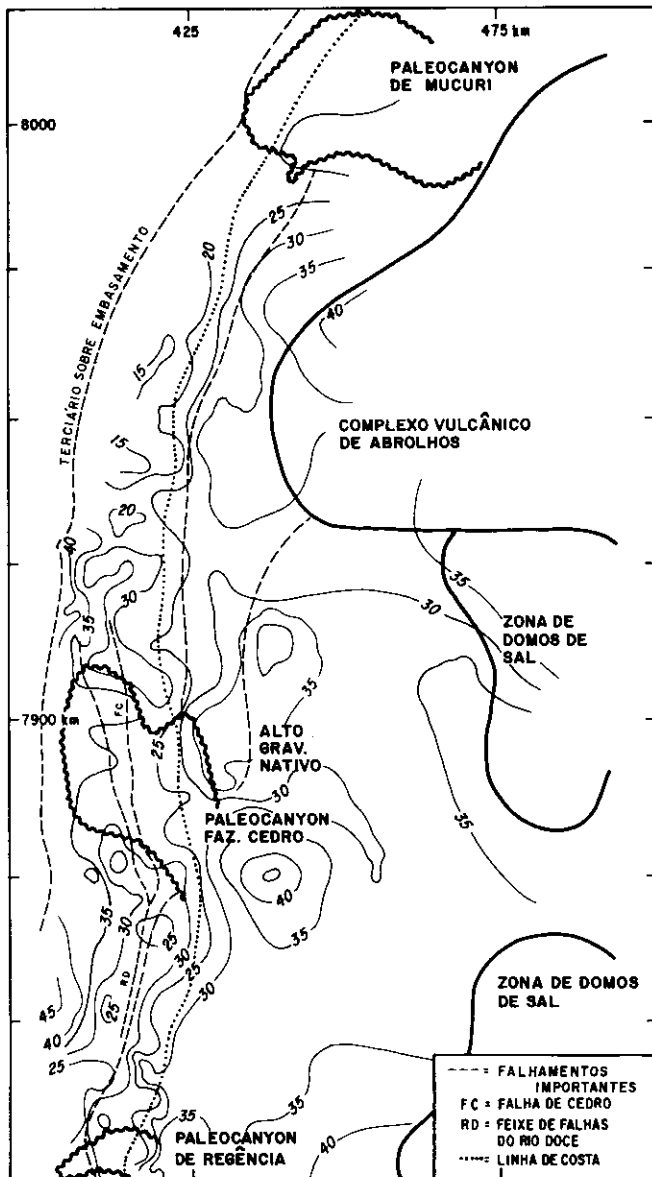


Fig. 19 - Mapa de fluxo geotérmico (mW/m^2).
Fig. 19 - Heat flow map (mW/m^2).

de Mucuri é marcado por um fluxo mais elevado na sua porção leste, diminuindo progressivamente para oeste, que pode estar relacionado a um fluxo hidrodinâmico local. A borda oeste de ambas as bacias é marcada por um fluxo geotérmico elevado, relacionado ao "efeito da borda" já identificado por Wolff (1979).

Na Plataforma de São Mateus fica evidenciada a alternância de altos e baixos fluxos que parecem relacionados com a estruturação do topo do embasamento. No geral, ficam marcadas as principais falhas que também apareceram no mapa de gradiente geotérmico.

4.2. — Análise Hidrogeoquímica e Hidrodinâmica

Os perfis de salinidade apresentam-se homogêneos; embora exibam algumas variações de valores e

tendam a aumentar proporcional e progressivamente com a profundidade (figs. 9 a 16). O gradiente total de salinidade da bacia emersa (fig. 20) mostra a mesma tendência.

Em geral, as águas das três formações estudadas variam de salinas a salmouras. A formação mais rasa dentre as analisadas — Urucutuca — já apresenta águas com salinidade superior a 20 g/l.

A baixa densidade e a má distribuição em área dos dados de salinidade permitiram a elaboração tão somente de um mapa, mesmo assim precário, para a Formação Mariricu (fig. 21), onde também se nota aumento da salinidade em direção à porção submersa das bacias, ou seja, em direção às maiores profundidades.

As análises químicas das 19 amostras de água selecionadas mostram, segundo o método de Sullin (1946), composição cloreto-cálcica, com IBE (*Index of Base Exchange*) positivo e acima de 2.0. Isto sugere um ambiente estagnante para as bacias, sem influência de águas meteóricas e sem movimentação de fluidos (Sullin, 1946; Tóth, 1980).

Os dados de pressão estática extrapolada levantados não possuem precisão suficiente para a realização de estudos potenciométricos confiáveis. Contudo, nos gráficos das figuras de 9 a 16, pode-se notar um comportamento bastante regular dos valo-

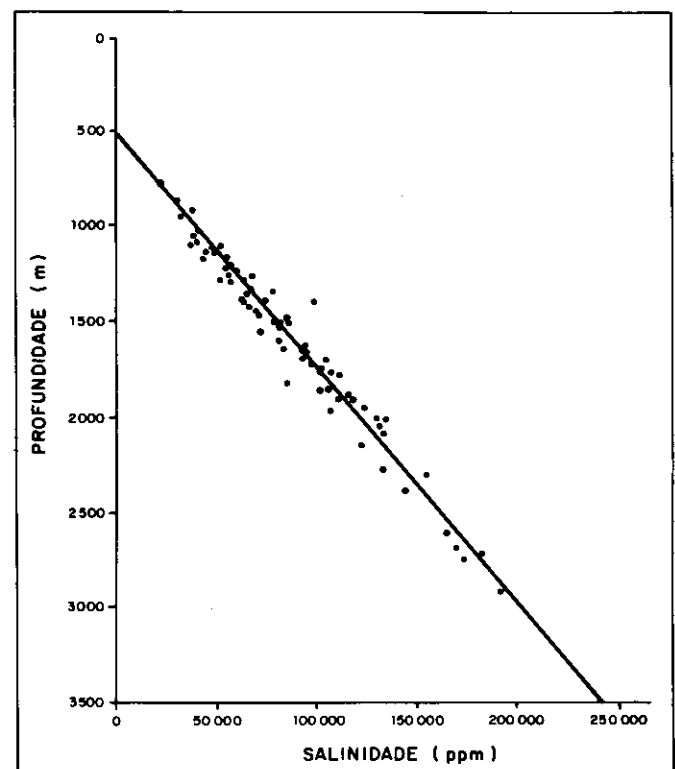


Fig. 20 - Gradiente de salinidade das águas das formações na área emersa da Bacia do Espírito Santo segundo dados do DEPEX/DIAP/SETEX.

Fig. 20 - Formation water salinity gradients in the area emerged in the Espírito Santo Basin from DEPEX/DIAP/SETEX data.

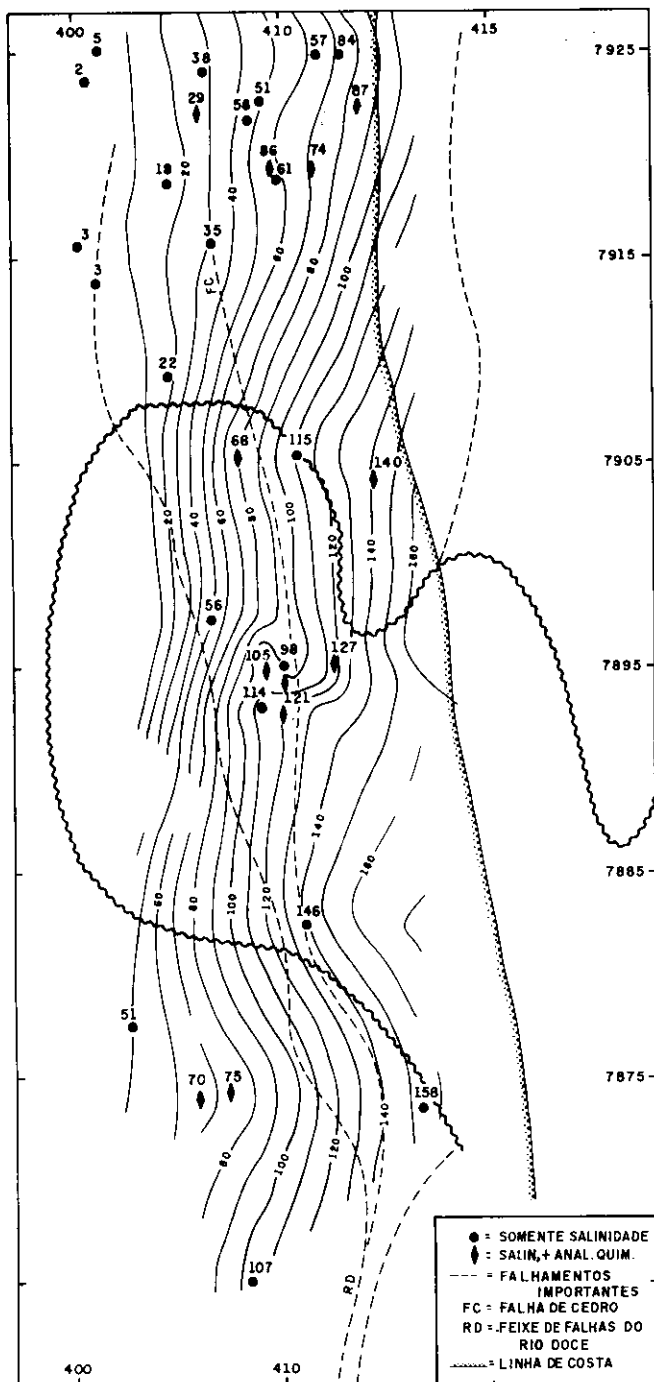


Fig. 21 - Mapa de isossalidade na Formação Marirucu, na região do Canyon de Fazenda Cedro e adjacências (g/l).

Fig. 21 - Isosality map of the Marirucu Formation in the Cedro Fazenda Canyon region and adjacent areas (g/l).

res de pressão estática, indicando que na bacia não há fluxo hidrodinâmico quantificável.

5 — CONCLUSÕES

As bacias do Espírito Santo e Mucuri apresentam comportamento geotérmico semelhante. Tanto o gradiente como o fluxo geotérmico apresentam valores mais elevados na seção sedimentar mais espessa das

bacias, ou seja, em direção ao seu depocentro (região mar afora) e na borda oeste (onde a seção sedimentar se adelgaça e o embasamento é raso). Na seção mais espessa, o gradiente e o fluxo geotérmico se elevam, respectivamente, em virtude da maior espessura de folhelhos da Formação Urucutuca e da ocorrência de domos de sal. Na borda oeste, o embasamento raso, por ser mais condutivo que o pacote sedimentar sobrejacente, torna-se condutor preferencial de calor, ocasionando os altos valores.

No geral, os parâmetros geotérmicos são mais elevados na porção mais espessa (gradiente de 34 °C/km e fluxo de 68 mW/m²) do que na borda oeste (gradiente de 26 °C/km e fluxo de 47 mW/m²) das duas bacias.

As medidas de condutividade térmica de rochas mostraram que este parâmetro tem relação linear com a profundidade, relação esta causada pelos processos diagenéticos que afetaram as rochas, destacando-se a compactação dos arenitos e folhelhos e a dolomitização dos carbonatos.

Através dos mapas de gradiente e fluxo geotérmico pode-se constatar um forte relacionamento entre as anomalias geotérmicas e a estruturação das duas bacias. Entre as estruturas mais caracterizadas geotermicamente estão as falhas do Rio Doce e de Cedro; cita-se também o eixo deposicional do Canyon de Fazenda Cedro. Estas estruturas também marcam os *trends* onde estão localizadas algumas das principais acumulações presentes nas duas bacias, mostrando a possibilidade de prospectos válidos para futuras locações.

Uma outra feição geotermicamente positiva, e que merece atenção para futuras prospecções, está associada ao Canyon de Mucuri. Esta estrutura está marcada por alto fluxo geotérmico na sua porção leste, constituindo-se, desta forma, em área propícia à geração de hidrocarbonetos. Recomendam-se, portanto, estudos mais detalhados nesta área, visando a propor locações.

Apesar da associação marcante das variações geotérmicas, no aspecto regional, com as feições estruturais comentadas anteriormente, existe uma exceção no Canyon de Fazenda Cedro: aí, as variações geotérmicas de detalhe não podem ser relacionadas, seja à diversidade da condutividade térmica da coluna litoestratigráfica — já que a mesma apresenta grande homogeneidade, tanto lateral como vertical —, seja à movimentação de fluidos. Somente um estudo de maior detalhe poderá explicar tais variações geotérmicas.

O estudo das análises químicas das águas de formação, embora baseado em poucos dados, sugere condições de bacia atualmente estagnante.

AGRADECIMENTOS

Aos geólogos Justo Camejo Ferreira e Lauri Medeiros de Araújo pelo auxílio nas interpretações

hidrodinâmica e geoquímica, ao geólogo Breno Wolff pela revisão do texto em inglês, ao ATG Jânio Lopes Gonçalves pelo auxílio nas medidas de condutividade térmica, a Francisco José Laiber pelos desenhos e a Telma Gonçalves de S. Carvalho pelos serviços de datilografia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BULLARD, E.C. Heat flow in South Africa. *Proc. Roy. Soc. London*, p. 474-502, 1930.
- BULLARD, E.C. The time taken for a borehole to attain temperature equilibrium. *Mon. Nat. R. Astr. Soc.*, v. 5, p. 127-130, 1947.
- CAMPOS, J.N. dos P., ZEMBRUSCKI, S.G. *Hidrogeologia e fluxo térmico da Bacia do Médio Amazonas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987. (Relatório interno).
- CHAPMAN, D.S. *et al.* Heat flow in the Uinta Basin determined from bottom hole temperature (BHT) data. *Geophysics*, v. 49, n. 4, p. 105-119, 1984.
- ESTRELLA, G. *et al.* The Espírito Santo Basin, Brazil: Source Rock characterization and petroleum habitat. In: DEMAISON, G., MURRIS, R.J. *Petroleum geochemistry and basin evaluation*. Tulsa: AAPG, 1984, p. 153-271 (AAPG memoir, 35).
- HAMZA, V.M. *Geotermia na prospecção e exploração de hidrocarbonetos*. São Paulo: IPT/DMGA/Laboratório de Geotermia, 1987, 161 p.
- KAPPELMEYER, O.E., HAENEL, R. *Geothermics with special reference to application*. Berlin: Gebr. Borntraeger, 1974, 238p. (Geoexploration monograph, 1,4).
- MARANGONI, Y.R., DEL REY, A.C. Condutividade térmica de amostras do Complexo Amparo. *Revista Brasileira de Geofísica*, n. 4, p. 61-71, 1986.
- MEISTER, E.M. Gradientes geotérmicos nas bacias sedimentares brasileiras. *Boletim Técnico da PETROBRÁS*, v. 16, n. 4, p. 221-232, 1973.
- RANGEL, H. D. *Geologic evolution of Fazenda Cedro Paleosubmarine Canyon Espírito Santo, Brazil*. Austin: University of Texas, 1984, 176p. (Tese de doutorado).

- ROSSI FILHO, J. *Mapa de gradiente geotérmico na Plataforma Continental Brasileira*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES/DIVEX, 1981. (Relatório interno).
- SCLATER, J.G., JAUPART, C.E., GALSON, D. The flow through oceanic and continental crust and heat loss of the Earth. *Rev. Geophysics Space Phys.*, v. 18, n. 1, p. 269-311, 1980.
- SILVEIRA, D.P. *Comunicação Pessoal*. [s. l.: s. n.], 1988.
- SULLIN, N.A. *Waters of oil reservoirs in the system of natural waters (In Russian)*. Moscow: Gostptekhzdat, 1946, p. 33-96.
- TOTH, J. Cross-formational gravity flow of groundwater: a mechanism of the transport and accumulation of petroleum (The generalized hydraulic theory of petroleum migration). In: ROBERTS III, W.H., CORDELL, R.J. *Problems of petroleum migration*. Tulsa: AAPG, 1980, p. 121-167.
- VON HERZEN, E., MAXWELL, A.E. The measurement of thermal conductivity of deep-sea sediments by a needle-probe method. *J. Geophys. Res.*, n. 64, p. 1557-1563, 1969.
- WOLFF, S. *Estudo geotérmico das bacias terrestres brasileiras*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/DISUD/DIRGEO, 1979, 25p.
- ZEMBRUSCKI, S.G. *Estudo geotérmico da Bacia de São Luiz*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1985, 31p. (Relatório CENPES, 648).
- ZEMBRUSCKI, S.C. *Estudo geotérmico da Bacia do Médio Amazonas e sua implicação nas análises estratigráficas e estruturais*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1984, 59p. (Relatório CENPES, 521).
- ZEMBRUSCKI, S.C. *Gradiente geotérmico das bacias terrestres brasileiras*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1984, 23p. (Relatório CENPES, 483).
- ZEMBRUSCKI, S.G., AZEVEDO, R.P. de. *Estudo geotérmico da Bacia de Barreirinhas*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1987. (Relatório CENPES, 759).
- ZEMBRUSCKI, S.G., CAMPOS, J.N. dos P. Comportamento geotérmico regional e provável movimentação de fluidos na Bacia de Parnaíba, Maranhão. *Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, v. 2, n. 2/4, p. 133-145, 1988.
- ZEMBRUSCKI, S.G., THOMAZ FILHO, A. *Correlação geotérmica dos campos de hidrocarbonetos do Recôncavo*. Rio de Janeiro: PETROBRÁS/CENPES, 1985. 38p. (Relatório CENPES, 599).

EXPANDED ABSTRACT

A hydrothermal study was conducted in the Espírito Santo and Mucuri basins in southeastern Brazil, taking into account the factors that affect bottomhole temperature (BHT) measurements. A methodology to reduce uncertainties is proposed.

Thermal conductivity values were obtained from 218 core samples of various lithologic types, by means of the half-space needle probe method. Results show a linear correlation between depth and thermal conductivity for sandstones, shales, and limestones, which is interpreted to be a consequence of diagenetic processes such as compaction and dolomitization.

Heat flow maps were generated through reliance on the cumulative thermal resistivity method, based on BHT and thermal conductivity data. The Espírito Santo and Mucuri basins display similar geothermal behavior. Generally speaking, high geothermal gradient and heat flow values correspond to thick sedimentary sections or the western border of the basins. In the case of the sedimentary sections, these high values are a result of the great thickness of shales in the Urucutua Formation and of local salt dome occurrences. In the case of the western borders, the high values are a result of shallow basement rock and its preferential heat conduction. Mean depocenters values were 34°C/km for the geothermal gradient and 68 mW/m² for heat flow. Basin borders are

characterized by mean values of 26°/km and 47 mW/m². Geothermal gradient and heat flow maps reveal a strong correlation between geothermal anomalies and the structural framework of the basins. Major faults, such as the Rio Doce and Cedro, as well as the depoaxis of the Fazenda Cedro paleocanyon, are the features best characterized by the anomalies.

The main oil accumulations are associated with, and probably controlled by, these same structural features, which points to the usefulness of geothermal anomalies in hydrocarbon exploration. The study detected an anomaly located in the Mucuri paleocanyon and characterized by high heat flow values; this area is probably of importance in the search for oil.

Plots of salinity versus depth show that salinity increases continuously with depth, with no significant anomalies.

The isosalinity map of the Mariricu Formation also shows a regular increase towards basin depocenters.

The chemical composition of 19 water samples selected is calcium chloride, with a positive base exchange index higher than 2.0, according to the Sullin (1946) method. This suggests that the environments of the Espírito Santo and Mucuri basins are stagnant, experiencing an affect from fluid motion or meteoric waters. The regular static pressure gradients detected agree with this hypothesis.