



## POTENCIAL GEOTÉRMICO DA BACIA SEDIMENTAR DE TAUBATÉ BASEADO EM DADOS DE PERFILAGEM GEOFÍSICA EM POÇOS

### *GEOHERMAL POTENTIAL OF SEDIMENTARY BASIN OF TAUBATÉ BASED IN GEOPHYSICAL LOGGING DATA IN WELLS*

Mario Nascimento Souza Filho<sup>1</sup>; Sueli Yoshinaga Pereira<sup>2</sup>; Danilo Barbuena<sup>3</sup>

Artigo recebido em: 27/01/2012 e aceito para publicação em: 22/08/2012

**Abstract:** Geothermal fields were studied in the Taubaté sedimentary basin, situated in the eastern portion of the state of São Paulo. Geophysical log data of thirty-seven supply wells were analyzed allowing determination of crystalline basement depths, descriptions of lithological profiles (percentage of sandstones, siltstones and shales), and temperature values. Results indicated deeper sediment filled areas in Pindamonhangaba and Taubaté regions. The most dominant types of lithology are: sandstones occurring in areas between Jacarei and São José dos Campos and between Lorena and Cachoeira Paulista; siltstone in Taubaté, Pindamonhangaba and Lorena, and shale occurring in areas between Pindamonhangaba and Guaratinguetá. Analysis of geophysical profiles indicated low values of thermal gradients in areas of sandstones, relative to those in shale areas, attributed to differences in thermal conductivities of these lithologies. The region extending from Taubaté to Guaratinguetá is found to have geothermal gradients of 70° C/km, considered anomalous. The average geothermal gradient of Taubaté basin is estimated to be 57° C/ km, which is also considered high for stable tectono-thermal regions of Brazil. It is possible that the relatively high values of geothermal gradient in this basin are due to the residual heat of intrusive alkaline rocks.

**Keywords:** Taubaté sedimentary basin. Temperature. Geophysical logging. Supply wells. Geothermal resources.

**Resumo:** Foram estudados os campos geotermiais na bacia sedimentar de Taubaté, situada a leste do estado de São Paulo. Trinta e sete perfis geofísicos de poços tubulares profundos para abastecimento foram analisados definindo a profundidade do embasamento, as descrições das litologias atravessadas (em porcentagem de arenito, siltito e folhelho), e a temperatura. Os resultados indicam pacotes sedimentares mais espessos nas áreas de Pindamonhangaba e em Taubaté. Os tipos litológicos mais predominantes são: arenito na região entre Jacarei e São José dos Campos e entre Lorena e Cachoeira Paulista; siltito em Taubaté, Pindamonhangaba e Lorena, e folhelho entre Pindamonhangaba e Guaratinguetá. A análise das perfilagens indicou baixos gradientes térmicos em áreas de ocorrência de arenitos, e altos gradientes em áreas de ocorrência de folhelhos, atribuído à diferença nas suas condutividades térmicas. As áreas de anomalias geotermiais identificadas na região entre Taubaté e Guaratinguetá apresentam gradientes geotérmicos de 70° C/km. O valor médio do gradiente geotérmico da bacia foi estimado em 57° C/km, que também é elevado em relação a outras regiões brasileiras, com regime tectotermal estável. É possível que os altos valores de gradiente geotermal nesta bacia sejam decorrentes do calor residual de rochas alcalinas intrusivas.

**Palavras-Chave:** Bacia sedimentar de Taubaté. Temperatura. Perfilagem geofísica. Poços tubulares profundos. Recursos geotermiais.

## INTRODUÇÃO

Os indícios de anomalias geotermiais na Bacia de Taubaté já são conhecidos há algum tempo. O aproveitamento deste recurso se limitou até o momento, a utilização de águas quentes em balneário (RAMPANELLI et al., 2011). Com o advento de novas tecnologias, há possibilidade de aproveitamento de recursos geotermiais como fonte de energia elétrica, apesar de se tratar de sistema de baixa entalpia.

Estudos em situações similares procuraram viabilizar o aproveitamento energético com a produção de energia elétrica através de fontes geotermiais, de baixa entalpia, através de perfurações profundas como na Austrália (BEARDSMORE, 2008) e Espanha (UNGEMACH, HIDALGO e ANTICS, 2008), onde os contextos geológicos e estruturais em muito se parecem com a da bacia sedimentar de Taubaté.

<sup>1</sup> Perfil Master Comercio e Serviços de Perfilagem Ltda (mnsf0301@terra.com.br).

<sup>2</sup> IG UNICAMP (sueliyos@ige.unicamp.br).

<sup>3</sup> IG UNICAMP (danilobarbuena@hotmail.com).

Até hoje, no Brasil, o aproveitamento geotermal limitou-se ao lazer através da perfuração de poços com intuito de captar água subterrânea quente, como os do Aquífero Guarani, na Bacia do Paraná.

O principal objetivo deste estudo é avaliar o potencial geotérmico da Bacia de Taubaté, com base em gradiente geotérmicos determinados em poços profundos na área em estudo. Os trabalhos desenvolvidos aqui, que fazem parte de dissertação de mestrado na Universidade de Campinas, São Paulo (NASCIMENTO FILHO, 2012), foram elaborados sobre a interpretação dos perfis geofísicos corridos na Bacia de Taubaté, em poços perfurados para a captação de água subterrânea, desde Jacareí até Cachoeira Paulista no Estado de São Paulo, em uma extensão aproximada de 140 quilômetros.

Neles, os dados principais coligidos foram raios gama, resistividades e potencial espontâneo ou sônico, normalmente utilizados na busca dos melhores horizontes para a distribuição dos filtros e dos tubos lisos na prospecção de água subterrânea através de poços tubulares profundos.

A temperatura, também registrada nos perfis, sempre foi considerada um indicador das condições em subsuperfície a mais e não o foco dos trabalhos, como é proposto nesta pesquisa.

Deste modo, o presente trabalho pretende

apresentar uma contribuição na caracterização do potencial geotérmico da região, com vista ao aproveitamento deste recurso de baixa entalpia para o desenvolvimento de tecnologias de geração de energia elétrica alternativa e de baixo impacto ambiental.

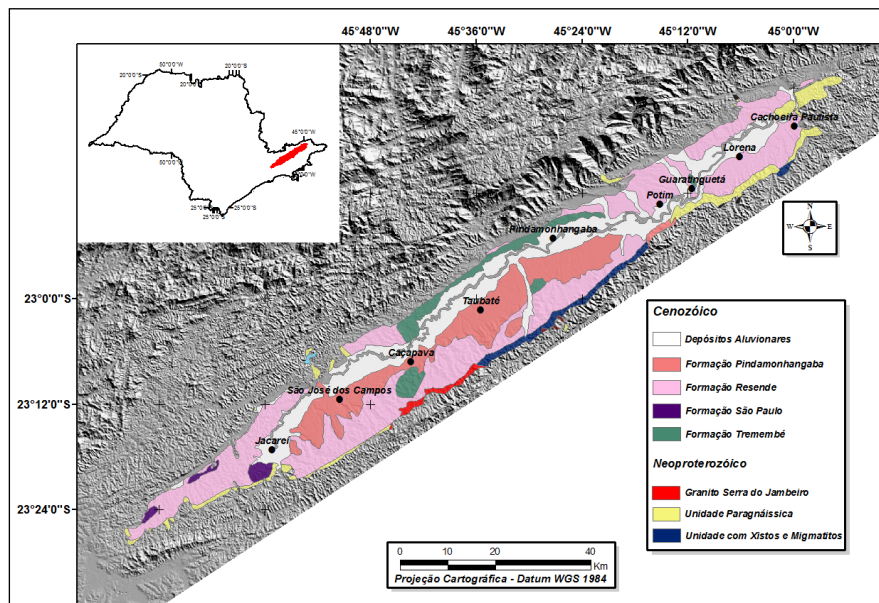
## GEOLOGIA

A área em estudo está localizada na porção leste do estado de São Paulo e abrange uma área de aproximadamente 2.800 quilômetros quadrados e estende-se desde Itaquaquecetuba até Queluz.

Trata-se de uma bacia sedimentar tipo *rift* continental (RICCOMINI, 1989), associada à abertura do oceano Atlântico Sul, e está assentada sobre o escudo pré-cambriano no denominado cinturão de dobramentos Ribeira (HASUI & PONÇANO, 1978).

A compartimentação a que foi submetida a bacia isola pacotes sedimentares com granulometria variada, desde a porção mais arenosa situada próxima a Jacareí até a porção mais argilosa situada próxima a Pindamonhangaba, esta caracterizada pela formação Tremembé, de idade Oligocênica.

A espessura estimada dos sedimentos que a compõem pode atingir até 850 metros (RIBEIRO, 2004). O mapa da Figura 1 mostra a localização e a geologia da bacia alvo da pesquisa.

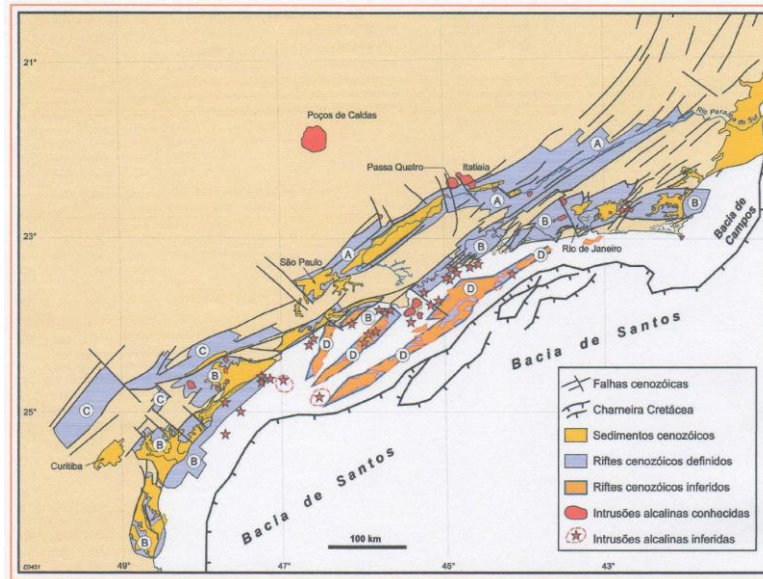


**Figura 1** – Bacia sedimentar de Taubaté de acordo com o Mapa das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo (modificado de CPRM, DAEE, IG e IPT, 2005).

**Figure 1** – Sedimentary basin of Taubaté according to Groundwater Map of São Paulo State (CPRM, DAEE, IG and IPT, 2005, modified).

A Figura 2 apresenta a situação da bacia sedimentar de Taubaté em relação às estruturas *rift*, sistemas de falhamentos profundos, e proximida-

des de intrusões de rochas alcalinas, possíveis estruturas que geralmente são atribuídas como causas de anomalias geotérmicas.



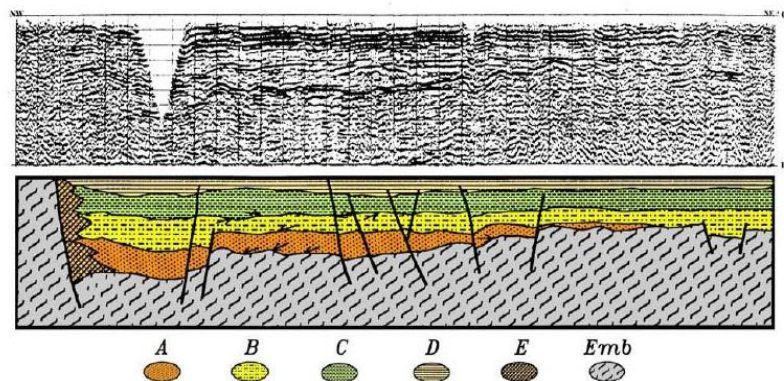
**Figura 2** – Mapa indicativo dos Sistemas de *Rifts* Cenozoicos do Sudeste Brasileiro segundo Zalán e Oliveira (2005).

**Figure 2** – Map of Cenozoic Rifts Systems of Southeast of Brazil, according to Zalán and Oliveira (2005).

As bacias sedimentares de Taubaté, Resende, São Paulo, Volta Redonda, Curitiba e a depressão de Guanabara formam o sistema de *rifts* da Serra do Mar (ALMEIDA, 1976), de evolução terciária da região sul-sudeste do país.

Basicamente, a bacia de Taubaté apresenta sedimentação continental. A estruturação interna da bacia é caracterizada por *grabens* assimétricos, limitados por falhas, que mudam de vergência formando padrão alternado (RIBEIRO, 2004).

A seção sísmica da Figura 3 (FERNANDES, 1993), de direção NW – SE, contempla a escala vertical em milissegundos e sua interpretação não menciona a escala de profundidade, porém percebe-se que próxima à borda NW existe uma espessura maior de sedimentos. Esta localização situa-se próxima ao contato da bacia com o embasamento.



**Figura 3** – Seção sísmica da sub-bacia de Roseira, apresentando a relação espacial dentre as unidades A, B, C, D, E e o embasamento (modificado de Fernandes 1993).

**Figure 3** – Seismic cross - section of Roseira sub-basin showing spatial relationships between units A, B, C, D, E and crystalline basement (modified after Fernandes 1993).

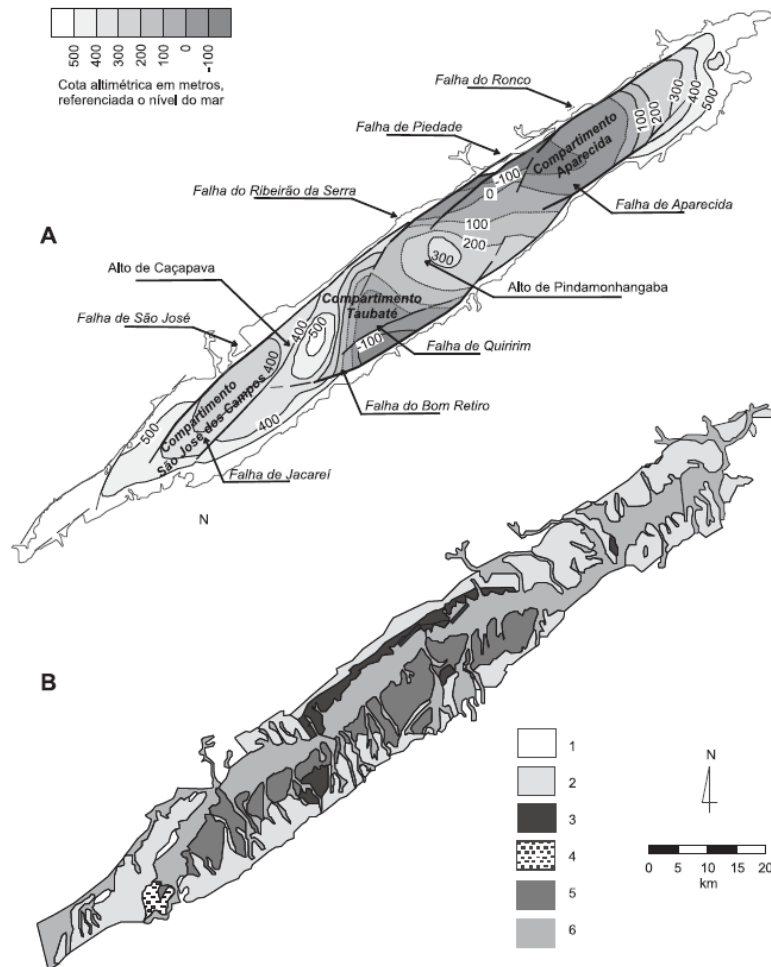


A Figura 4 apresenta o mapa geológico da bacia de Taubaté, segundo Ricomini (1989, apud VIDAL et al, 2004).

A bacia apresenta vários blocos segmentados (São José dos Campos, Taubaté, Aparecida) separados pelo altos de Pindamonhangaba e Caçapava, e por falhas (de Jacareí, São José, Bom Retiro, Quiririm, Ribeirão da Serra, Piedade e de Aparecida).

O compartimento Jacareí – São José dos Campos apresenta profundidade máxima de 300

metros e é composto por rochas da Formação Resende; já o compartimento Quiririm – Taubaté possui profundidade máxima de 600 m e predomínio de arenitos e conglomerados nas bordas e folhelhos no centro. O compartimento Aparecida-Lorena apresenta profundidade máxima de 800 metros a oeste com o predomínio de sedimentos lacustres e a leste sedimentos de origem fluvial (VIDAL et al, 2004).



**Figura 4** – Mapa geológico segundo Ricomini (1989, modificado de Vidal et al, 2004). (A) Mapa do arcabouço estrutural da Bacia de Taubaté; (B) Mapa geológico esquemático da Bacia de Taubaté: (1) rochas do embasamento; (2) Formação Resende; (3) Formação Tremembé; (4) Formação São Paulo; (5) Formação Pindamonhangaba; (6) depósitos quaternários.

**Figure 4** – Geological map according to Ricomini (1989, modified by Vidal et al. 2004). (A) Map of structural basement of Taubaté basin; (B) Schematic geological map of Taubaté basin: (1) basement rocks; (2) Resende Formation; (3) Tremembé Formation; (4) São Paulo Formation; (5) Pindamonhangaba Formation; (6) Quaternary deposits.

O Grupo Taubaté, do Paleógeno, é subdividido nas formações Resende, Tremembé e São Paulo. A Formação Resende é formada a partir de

sedimentos de sistema de leques aluviais associados a planície fluvial de rios entrelaçados; as fácies proximais são conglomerados polimíticos, interdi-

gitados por arenitos e lamitos arenosos, oriundos de corridas de lama. As porções distais apresentam sedimentos de ambientes de planície aluvial, arenitos intercalados por lamitos.

A Formação Tremembé possui interdigitação horizontal e vertical com os sedimentos da Formação Resende, e é significativa na porção central da bacia. É composta por folhelhos verde maciços, dolomitos tabulares, ritmitos formados pela alternância de folhelhos e margas, arenitos com estratificação cruzada sigmoidal e granodercrescência de areia média até silte e arenitos grossos, arcoseanos.

A Formação São Paulo é um sistema fluvial meandrante cujas principais fácies sedimentares são formadas por arenitos grossos, conglomeráticos, siltitos e folhelhos laminados e arenitos médios e grossos gradando para mais finos.

A Formação Pindamonhangaba, do Neoterciário, é composta por sedimentos de sistema fluvial meandrante, bem desenvolvidos na porção central da bacia e aflorante em faixa alongada ao sul do rio Paraíba do Sul. Os sedimentos quaternários, aluvionares e coluvionares situam-se ao longo das principais drenagens da região.

## CONTORNO ESTRUTURAL DO EMBASAMENTO

Fernandes e Chang (2001) apresentam resultados de modelagem gravimétrica na bacia de Taubaté, definindo dois compartimentos principais com profundidades diferentes: a primeira na porção NE, mais profundo (800 metros) e outro na porção SW (menor que 300 metros). De acordo com Fernandes e Chang (2001), a porção mais profunda apresenta feições típicas de *rift*, com espessura sedimentar de cerca de 450-500m, e máximos de 800m. O alto de Caçapava, mais raso, apresenta-se como divisor, onde os autores modelaram um corpo alcalino ao norte de Caçapava, em Campos do Jordão. Destaca-se ainda a feição dos maciços alcalinos de Passa Quatro e Itatiaia, ligado a intrusão de magma alcalino diferenciado.

Molinari (2003) apresenta o contorno estrutural da bacia, elaborado com base em trabalhos de campo, revisão bibliográfica e linhas sísmicas. Molinari, (2003) apresenta as curvas do contorno estrutural do embasamento destacando as sub-bacias de Quiririm e Aparecida, a sub-bacia de

Lorena, e os altos que compartimentam as sub-bacias, que são o alto de Caçapava, alto de Pindamonhangaba e alto de Guaratinguetá.

De uma maneira geral as rochas sedimentares da bacia possuem espessuras variadas da ordem de 70 até 250 metros nos poços perfurados. Existem alguns poços e furos de sondagem, perfilados, com espessuras que atingiram profundidades maiores, como por exemplo, em Taubaté com 640 dos quais 450 metros perfilados e Pindamonhangaba com 732 metros, porém este último não atingiu o embasamento cristalino.

Em todas as perfilagens executadas na bacia e interpretadas no presente trabalho, nunca foi observada a presença de pacotes sedimentares contendo margas ou dolomitos, caracterizados, geralmente, por ter uma contagem muito baixa de raios gama naturais e elevadíssima resistividade.

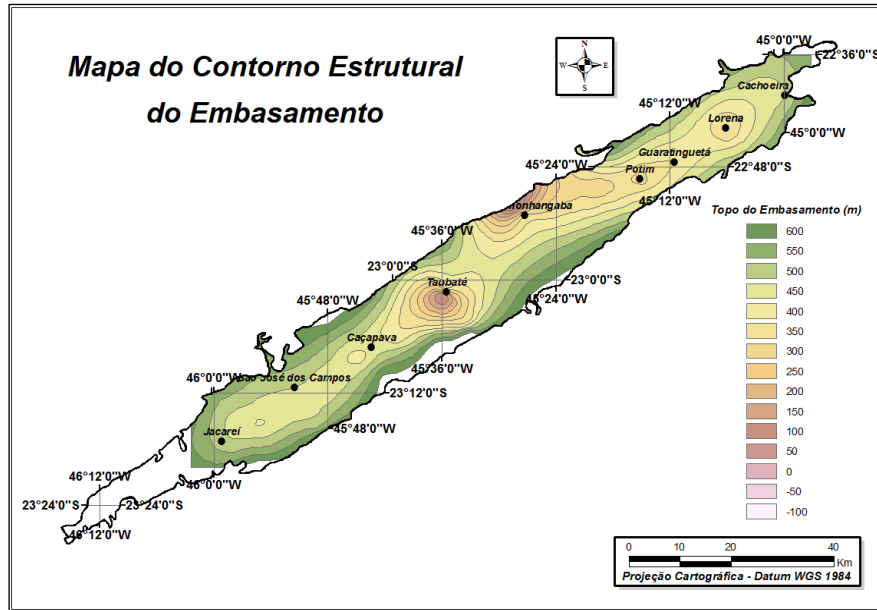
O traçado do mapa do contorno estrutural do topo do embasamento é apresentado na Figura 5. O trecho entre Taubaté a Pindamonhangaba foi o mais profundo da bacia definido pela análise dos resultados da perfilagem dos poços.

O perfil SW – NE (Figura 6), entre Jacareí e Cachoeira Paulista mostra a maior profundidade do embasamento cristalino.

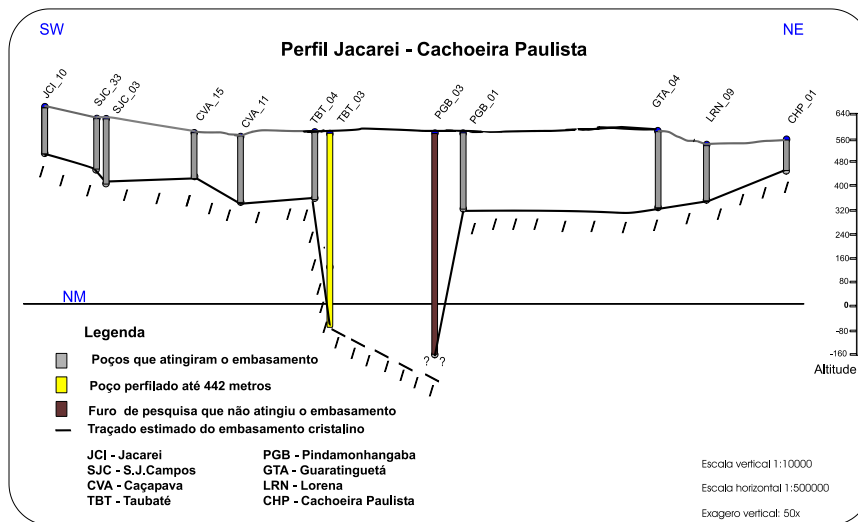
O trabalho de Vidal et al. (2004) mostrou que existiam três baixos estruturais no embasamento na bacia: um em Taubaté, outro em Pindamonhangaba e o terceiro mais discreto entre Potim e Lorena que podiam ser interpretados como abatimento de blocos ou mesmo conformação espacial da bacia.

No entanto, os valores de desníveis do embasamento encontrados nos perfis de poços entre Jacareí, São José dos Campos, Caçapava e Taubaté, (da ordem de 100 metros), não caracterizou o comportamento de um alto estrutural, mas sim um declive suave da paleo-topografia do cristalino.

Já entre Taubaté e Pindamonhangaba, existiu aprofundamento abrupto, formado por falhamentos de direção NW. Os desníveis passaram de 480 metros, sem atingir o embasamento cristalino no furo de Pindamonhangaba, o que indicava que o abatimento devia ser ainda maior. No perfil construído apresentado na figura 6, não apareceram os altos estruturais de Caçapava, Pindamonhangaba e Lorena, conforme constavam nos trabalhos pesquisados.



**Figura 5** – Mapa do contorno estrutural do embasamento da bacia sedimentar de Taubaté.  
**Figure 5** – Map of structural basement outline of Taubate sedimentary basin.



**Figura 6** – Perfil esquemático do topo do embasamento - direção SW – NE.  
**Figure 6** – Schematic cross section of basement topography – SW – NE direction.

## HIDROGEOLOGIA E GEOTERMIA

Em termos hidrogeológicos, a bacia de Taubaté apresenta grande potencial de exploração de seus aquíferos, porém de elevada heterogeneidade (VIDAL et al 2004), sendo São José dos Campos e Lorena as mais promissoras para exploração de água subterrânea, com vazões que variam de 10 a 200 m<sup>3</sup>/h. As regiões de Taubaté e Pindamonhangaba são as menos favoráveis com vazões entre 20 e 30 m<sup>3</sup>/h. Os autores também definem que os aquíferos são do tipo multicamada.

Há evidências da presença de águas ter-

mais na região, como as águas exploradas pelo balneário Onsen Termas de Taubaté (hoje fechado), com temperatura de 50 °C em Taubaté (RAM-PANELLI et al., 2011).

Em relação aos estudos geotermiais, Hamza et al (2010) apresentam resultados de medições de gradiente geotermal de 44 locais brasileiros. As áreas do embasamento pré-cambriano apresentam baixas temperaturas variando entre 6 a 20° C/km, enquanto que bacias sedimentares mais jovens apresentam variação entre 15 a 35° C/km. O estudo

conclui que as condições mais favoráveis a exploração de energia geotermal no Brasil estão nas bacias sedimentares mais jovens; no entanto define que a bacia sedimentar do Paraná o melhor local, especificamente a Formação Botucatu (que integra o Sistema Aquífero Guarani), com temperaturas que variam de 40 a 90°C, considerada de baixa entalpia.

Gomes e Hamza (2003 e 2005) apresentam uma avaliação dos recursos geotermiais de 72 localidades do estado do Rio de Janeiro, por meio de medidas de gradientes geotermiais e condutividade termal, e determinação da densidade de fluxo de calor. Concluem que na maioria das áreas o fluxo de calor está na faixa de baixa a normal, sendo menor que 60 mW/m<sup>2</sup>. Em áreas isoladas, próximos a intrusões alcalinas e sistemas de falhas, o fluxo de calor é maior do que o normal atingindo valores de 100 mW/m<sup>2</sup>. Os valores de gradiente encontrados em rochas pré-cambrianas situam-se entre 14 e 26° C/km; nas bacias sedimentares (Campos, Resende e Carapebus) são maiores, entre 19 a 33° C. Acima deste último valor, locais próximos a intrusões alcalinas, como em São Gonçalo e Rio Bonito.

O gradiente e fluxo térmico encontram-se mais elevados na parte oeste do estado, atribuído às associações de rochas alcalinas intrusivas terciárias situadas entre Itatiaia e Cabo Frio; o calor residual destas intrusões pode ser um dos mecanismos responsáveis pela anomalia térmica delimitada.

## MÉTODO

### **Crítérios para a seleção dos poços analisados**

De todos os poços perfilados na bacia foram selecionados aqueles que com certeza atingiram o embasamento cristalino, exceto um em Pindamonhangaba, o mais profundo. O poço de Taubaté, perfurado inicialmente até 442 metros, para captação de água subterrânea para uma indústria automobilística local, foi aprofundado e concluído com 640 metros, dentro do embasamento. O valor da temperatura utilizado e tratado foi o registrado no perfil. Outro poço em Pindamonhangaba, na Fazenda Morro Agudo, um furo para estudo da gênese da bacia, foi paralisado aos 732 metros por problemas mecânicos e não atingiu o embasamento. Estes dois poços, apesar de conter informações incompletas foram incluídos face à profundidade atingida e suas anomalias geotérmicas observadas.

### **Coleta de dados**

Os perfis de 37 perfurações selecionadas formam a base de dados compilados para o presente estudo. Todos os dados tratados foram cedidos pela empresa Perfil Master Comércio e Serviços de Perfilagem Ltda, sediada em Araraquara SP e que tem trabalhado em perfilagem geofísica e ótica para as empresas de perfuração de poços e usuários de água subterrânea.

As ferramentas possuíam uma sensibilidade térmica de 0,074° C e acurácia de cerca de 5%, conforme as especificações do fabricante, e apresentaram o intervalo de amostragem usado de 2 (dois) a 10 (dez) centímetros por dado registrado.

### **Perfilagens de poços tubulares profundos**

Todos os perfis foram corridos, desde abril de 1998, por um equipamento montado em um veículo tipo furgão, composto por um guincho com 1.000 (mil) metros de cabo de aço, um *logger* para transferência dos dados da ferramenta a um *notebook* e das sondas específicas: indução e multifunção (Users Guide, <http://www.century-geo.info/dnn/EquipmentSales/LoggingTools/9044UsersGuide.aspx> e <http://www.century-geo.info/dnn/EquipmentSales/LoggingTools/9512UsersGuide.aspx>, acesso em 24 de março de 2012).

As sondas específicas de indução e multifunção registram, a cada intervalo especificado: (1) raios gama naturais, condutividade do meio e temperatura do bulbo interno da ferramenta (ferramenta indução - modelo 9511), e (2) raios gama naturais, resistividades ôhmicas do meio e temperatura do trecho amostrado (ferramenta multifunção - modelo 9043). Todos os dados foram digitalizados na origem, ou seja, na ferramenta e, na transferência o arquivo em disco; quando em operação, não havia perda de qualidade do sinal lido no ponto de amostragem.

A resposta da ferramenta indução para mudanças no valor da condutividade elétrica do meio é transformada em sinal do sensor e enviada para o *logger* e deste ao computador para arquivo temporário, com a denominação de condutividade aparente em cps. Esta por sua vez compara com o valor da condutividade no ar, também em cps (zero) e a corrige pela temperatura do bulbo interno da ferramenta, salvando as duas curvas: a condutividade aparente e a real.

### Interpretação dos perfis escolhidos

A interpretação litológica foi feita levando-se em conta os valores das resistividades (Induzida e Lateral). Os registros dos sensores de raios gama naturais não apresentam respostas com a necessária e confiável segurança, para a interpretação litológica na Bacia de Taubaté. Nos sedimentos da bacia é comum a presença de leitos com arenito arcossiano, que contém feldspato potássico e este por sua vez, responde com uma contagem elevada de raios gama por causa do  $^{40}\text{K}$  nele contido. Essa contagem elevada propicia a interpretação de perfis de tal forma que os pacotes de arenitos podem ser confundidos como sendo siltitos ou mesmo folhelhos.

Os registros de perfis utilizam unidades de graus API, sendo que um  $^{\circ}\text{API}$  (*American Petroleum Institute*) vale 1,04 CPS (choque por segundo) unidade de medida da intensidade da radioatividade natural das rochas. De uma maneira geral os intervalos e valores medidos obedecem aos seguintes limites:

- (1) até  $35^{\circ}$  API (36,4 CPS) – Arenitos;
- (2) de  $35$  até  $70^{\circ}$  API (72,8 CPS) – Siltitos;
- (3) acima de  $70^{\circ}$  API – Folhelhos.

Esses limites são usados e recomendados pelo fabricante do equipamento de perfilagem utilizado nos trabalhos (marca Century Geophysical Corp – Tulsa – OK - USA).

Tratamento dos dados. Para a interpretação litológica simplificada dos 37 poços analisados, foram considerados os valores das diferentes amplitudes das curvas de Indução e Resistividade Ôhmica (Lateral). Não havia registro na literatura de um padrão numérico como o que foi proposto, porém os resultados obtidos ao longo de anos de coleta, interpretação e sugestão para a colocação de filtros e tubos lisos em poços perfurados na área de estudo, avaliavam e endossavam sua utilização, de acordo com as seguintes faixas de valores associadas às litologias atravessadas:

(1) Arenitos – Curva de Indução – Valores acima de 6 Ohm-m e Curva Lateral – Valores acima de 10 Ohm-m;

(2) Siltitos – Curva de Indução – Valores acima de 4 e abaixo de 6 Ohm-m e Curva Lateral – Valores acima de 6 e abaixo de 10 Ohm-m;

(3) Folhelhos – Curva de Indução – Abaixo de 4 Ohm-m e Curva Lateral – Valores abaixo de 6 Ohm-m.

Cada perfil foi então interpretado e uma coluna litológica, bem simplificada, foi acrescida à direita da curva de temperatura, em todos os perfis, e suas espessuras somadas e convertidas em porcentagem dos diferentes litotipos.

Nas informações fornecidas pelos sensores da ferramenta multifunção, foi adicionada a curva de indução e seu traçado refletiu com todas as inflexões a semelhança entre os dois parâmetros, variando apenas a amplitude. A unidade de medida e a escala utilizada foram as mesmas em todos os poços; a forma diferente de obtê-las (resistividades) e a leitura de ambas mostra que a indução lia valores mais baixos do que a lateral da multifunção e isso se repetiu em todos os perfis que foram executados, mostrando que a metodologia da interpretação litológica usada foi confiável.

A ferramenta indução lia o valor da condutividade do meio em CPS, enviava para o *logger* e deste ao computador para arquivo temporário, com a denominação de condutividade aparente em CPS. Esta por sua vez comparava com o valor da condutividade no ar, também em CPS (zero) e a corrigia pela temperatura do bulbo interno da ferramenta, salvando as duas curvas: a condutividade aparente e a real.

As temperaturas foram dispostas em uma coluna separada, em escalas adequadas mostrando o comportamento crescente com a profundidade perfilada.

Foram escolhidos poços perfilados nas seguintes localidades: Jacareí, São José dos Campos, Caçapava, Taubaté, Pindamonhangaba, Potim, Guaratinguetá, Lorena e Cachoeira Paulista.

Os dados físicos dos poços foram planilhados (Tabela 1), com informações referentes à identificação do poço (localização, códigos de identificação do poço, empresa perfuradora), a execução da perfilagem (data, profundidade do poço, altimetria, sonda utilizada), características geológicas interpretadas (espessuras de arenito, siltitos e folhelhos, embasamento) e do poço (revestimento, profundidade útil).



**Tabela 1** – Informações sobre a localização e as profundidades de poços e os respectivos intervalos de perfilagem geofísica.**Table 1** – Information on locations, depth values of wells and intervals of geophysical logs.

Município	Poço	Latitude	Longitude	Prof. (m)	Intervalo (m)
Caçapava	CVA_11_SP	-23,099309	-45,680538	216,00	198,0
Caçapava	CVA_15_SP	-23,120234	-45,723836	172,00	132,0
Caçapava	CVA_17_SP	-23,137451	-45,738246	200,00	185,0
Cachoeira Paulista	CHP_01_SP	-22,672351	-44,998767	117,00	105,0
Cachoeira Paulista	CHP_02_SP	-22,607779	-45,046413	73,00	56,0
Guaratinguetá	GTA_01_SP	-22,819739	-45,192821	156,00	136,0
Guaratinguetá	GTA_04_SP	-22,791894	-45,192500	207,00	186,0
Jacareí	JCI_04_SP	-23,298123	-45,913237	169,00	163,0
Jacareí	JCI_05_SP	-23,275136	-45,917107	160,00	140,0
Jacareí	JCI_08_SP	-23,209367	-45,952591	128,00	118,0
Jacareí	JCI_09_SP	-23,286763	-45,986726	106,00	75,0
Jacareí	JCI_10_SP	-23,296370	-45,913965	154,00	142,0
Jacareí	JCI_11_SP	-23,286218	-45,955751	110,00	90,0
Lorena	LRN_06_SP	-22,756048	-45,111665	174,00	162,0
Lorena	LRN_07_SP	-22,730136	-45,101888	256,00	238,0
Lorena	LRN_09_SP	-22,754612	-45,099851	185,00	168,0
Pindamonhangaba	PGB_01_SP	-22,885838	-45,455063	250,00	235,0
Pindamonhangaba	PGB_03_SP	-22,861203	-45,476179	732,00	712
Potim	POT_02_SP	-22,833579	-45,320730	285,00	285
Potim	POT_06_SP	-22,846123	-45,252331	170,00	155
Potim	POT_07_SP	-22,833302	-45,322319	290,00	290,0
Potim	POT_10_SP	-22,821300	-45,252688	282,00	262,0
São Jose dos Campos	SJC_01_SP	-23,139668	-45,762218	202,00	162,0
São Jose dos Campos	SJC_13_SP	-23,182697	-45,793870	166,00	148,0
São Jose dos Campos	SJC_14_SP	-23,191006	-45,858030	152,00	132,0
São Jose dos Campos	SJC_16_SP	-23,252487	-45,944529	134,00	116,0
São Jose dos Campos	SJC_22_SP	-23,251239	-45,946200	188,00	164,0
São Jose dos Campos	SJC_26_SP	-23,252051	-45,936807	160,00	148,0
São Jose dos Campos	SJC_29_SP	-23,173296	-45,789428	190,00	179,0
São Jose dos Campos	SJC_31_SP	-23,211930	-45,858070	170,00	152,0
São Jose dos Campos	SJC_32_SP	-23,254737	-45,923897	231,50	229,5
São Jose dos Campos	SJC_33_SP	-23,196144	-45,887564	150,00	135,0
São Jose dos Campos	SJC_34_SP	-23,155564	-45,785941	130,00	115,0
São Jose dos Campos	SJC_35_SP	-23,260676	-45,818371	165,00	150,0
Taubaté	TBT_03_SP	-23,020751	-45,591933	442,00	419,0
Taubaté	TBT_04_SP	-23,020487	-45,591917	221,00	211,0
Taubaté	TBT_06_SP	-23,080990	-45,558033	254,00	243,0

## RESULTADOS OBTIDOS

Os 37 poços perfilados apresentam-se distribuídos ao longo da bacia. As cotas mais baixas estão situadas no Distrito de Potim, e municípios

de Pindamonhangaba e de Guaratinguetá, ao redor de 550 metros e as mais altas em Jacareí e São Jose dos Campos, que passam dos 650 metros.

Os dados de temperaturas foram obtidos diretamente do perfil, em duas colunas: uma da temperatura lida no perfil aos 50 metros de profundidade ( $T_{50}$ ) e a outra lida diretamente no fundo do poço (designado na literatura geotérmica como “*Bottom Hole Temperature*” - BHT). Em vários dos perfis analisados, os valores de temperatura aos 50 metros de profundidade são maiores do que no fundo do poço. Acredita-se que essas diferenças de temperaturas são decorrentes de contrastes de temperaturas dos fluidos armazenados nos tanques de circulação.

Os dados de temperaturas registradas no

perfil (na profundidade de 50 metros -  $T_{50}$  e no fundo do furo -  $T_{FP}$ ) foram utilizados nas determinações de gradiente de temperatura, com base na relação:

$$\Gamma = (T_{FP} - T_{50}) / H \quad (1)$$

no qual  $T_{FP}$  é a temperatura do fundo do poço,  $T_{50}$  é a temperatura na profundidade de 50 metros e  $H$  a profundidade do poço.

Encontram-se reunidos na Tabela 2 teores de arenito, siltito e folhelho (em porcentagens) nos poços perfilados, junto com dados de temperaturas e as altitudes dos locais.

**Tabela 2** – Estimativas de arenito, siltito e folhelho (em porcentagens) com base nos perfis de poços, junto com os dados das temperaturas observadas (em 50 metros de profundidade -  $T_{50}$  e no fundo do poço - BHT) as altitudes locais.

**Table 2** – Estimates of sandstone, siltstone and shale (in percentage) derived from from well logs, along with values of observed temperatures (at 50 meters depth -  $T_{50}$  and at well bottom - BHT) and local altitudes.

Poço	Cota	Arenito (%)	Siltito (%)	Folhelho (%)	Temperaturas (°C)	
	(m)				$T_{50}$	BHT
CVA_11_SP	561	34,34	12,63	53,03	30,90	31,65
CVA_15_SP	575	65,91	28,03	6,06	27,57	27,42
CVA_17_SP	575	40,54	22,70	36,76	26,90	26,78
CHP_01_SP	557	74,29	25,71	0,00	23,91	24,06
CHP_02_SP	553	62,50	37,50	0,00	23,37	23,71
GTA_01_SP	535	33,82	15,44	50,74	29,44	29,44
GTA_04_SP	552	27,96	28,49	43,55	33,88	33,88
JCI_04_SP	665	77,91	19,02	3,07	24,60	24,70
JCI_05_SP	598	62,86	30,71	0,00	26,60	26,40
JCI_08_SP	616	88,14	11,86	0,00	24,70	24,70
JCI_09_SP	568	90,67	9,33	0,00	23,50	23,50
JCI_10_SP	660	81,69	18,31	0,00	25,00	24,00
JCI_11_SP	572	71,11	14,44	11,11	24,80	24,80
LRN_06_SP	542	45,68	53,09	1,23	25,80	25,70
LRN_07_SP	541	64,71	34,45	0,84	23,52	23,70
LRN_09_SP	533	55,36	26,19	10,71	27,69	29,18
PGB_01_SP	570	1,70	28,94	69,36	32,70	33,30
PGB_03_SP	570	30,76	59,83	9,41	29,44	48,33
POT_02_SP	544	10,53	23,51	65,96	32,65	40,00
POT_06_SP	533	30,32	38,71	30,97	26,46	25,58
POT_07_SP	546	5,86	15,86	78,28	31,70	32,50
POT_10_SP	547	14,89	6,87	78,24	33,00	33,16
SJC_01_SP	588	63,58	5,56	30,86	24,34	34,39
SJC_13_SP	572	41,22	4,73	54,05	25,73	25,70
SJC_14_SP	604	53,79	36,36	9,85	27,00	26,40
SJC_16_SP	577	59,48	31,90	8,62	27,60	27,36
SJC_22_SP	572	57,93	18,29	23,78	24,50	24,80
SJC_26_SP	606	61,49	12,84	25,68	29,70	29,67
SJC_29_SP	617	46,37	7,26	46,37	22,30	21,78
SJC_31_SP	575	52,63	11,18	27,63	27,40	26,60
SJC_32_SP	614	54,03	6,54	39,43	30,80	30,00
SJC_33_SP	602	60,00	11,85	28,15	27,11	26,70
SJC_34_SP	558	39,13	8,70	52,17	24,10	23,39
SJC_35_SP	652	82,00	5,33	12,67	25,20	24,78
TBT_03_SP	570	18,85	16,71	64,44	30,70	32,55
TBT_04_SP	576	54,50	17,06	28,44	30,00	31,28
TBT_06_SP	605	29,22	65,84	4,94	26,59	26,70

### Distribuição espacial dos sedimentos e de gradiente geotermal na bacia de Taubaté

As espessuras das rochas sedimentares atravessadas foram somadas em cada perfil executado e convertidas em porcentagens do total perfurado. Tais dados permitiram construir os mapas de isovalores das distribuições espaciais das porcentagens de arenitos, siltitos e folhelhos.

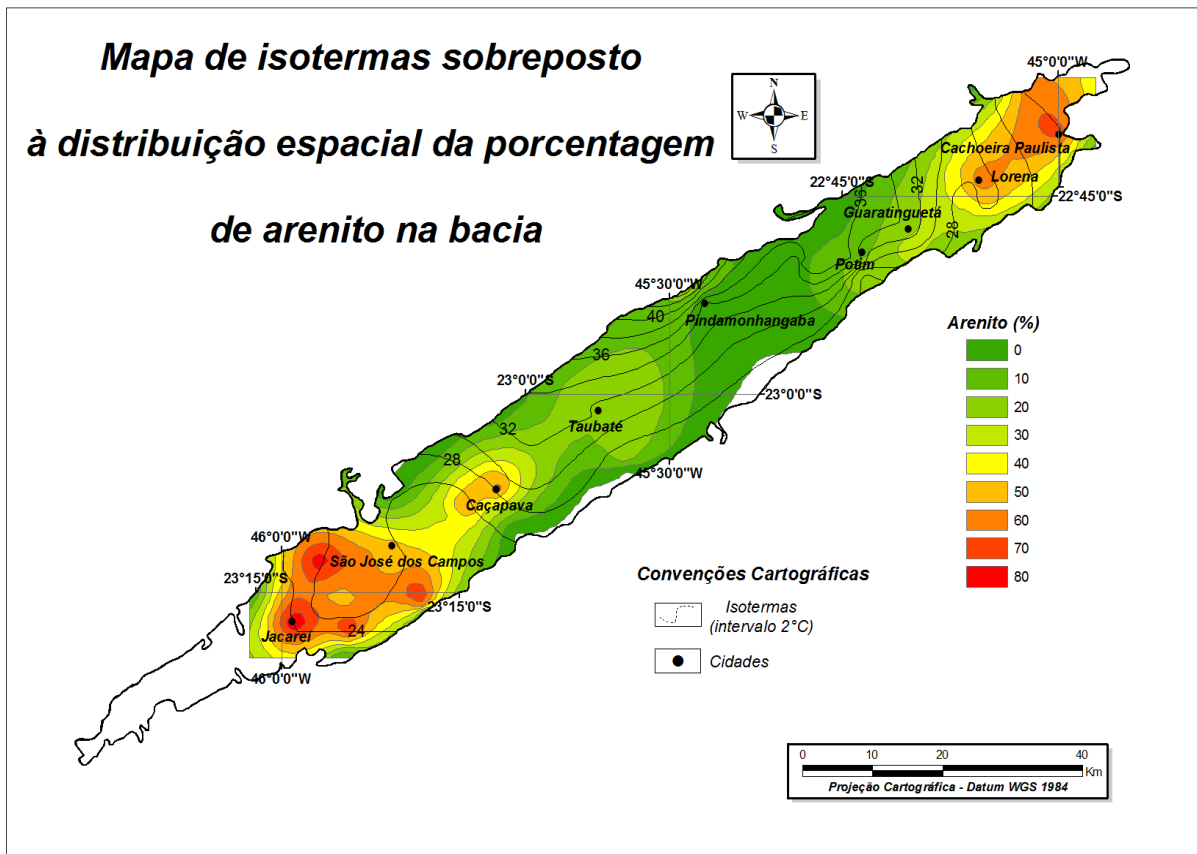
A distribuição espacial das porcentagens de arenitos mostra ocorrência nas faixas que vão de Jacareí a Caçapava e de Lorena a Cachoeira Paulista (Figura 7). De fato tratam-se das localidades onde estão os poços mais produtores da bacia.

Inicialmente foram traçadas curvas de isovalores de temperaturas do fundo dos poços perfurados, ou seja, as temperaturas medidas no topo do embasamento cristalino. No geral, ao longo da

bacia, a temperatura no topo do embasamento cristalino varia na faixa de 24° a 32° C, de acordo com a espessura do pacote sedimentar sobreposto. A exceção ficou por conta dos pontos anômalos encontrados em Pindamonhangaba e Potim.

O ponto de maior temperatura foi perfilado na Fazenda Morro Agudo, em Pindamonhangaba, que alcançou 48° C a 732 metros de profundidade, muito próximo ao contato da bacia com o afloramento do embasamento.

Os traçados das isotermas onde se concentram os arenitos indicam águas de menores temperaturas (entre 20 a 24° C ao sudoeste da bacia e entre 24 e 28° C na porção nordeste).

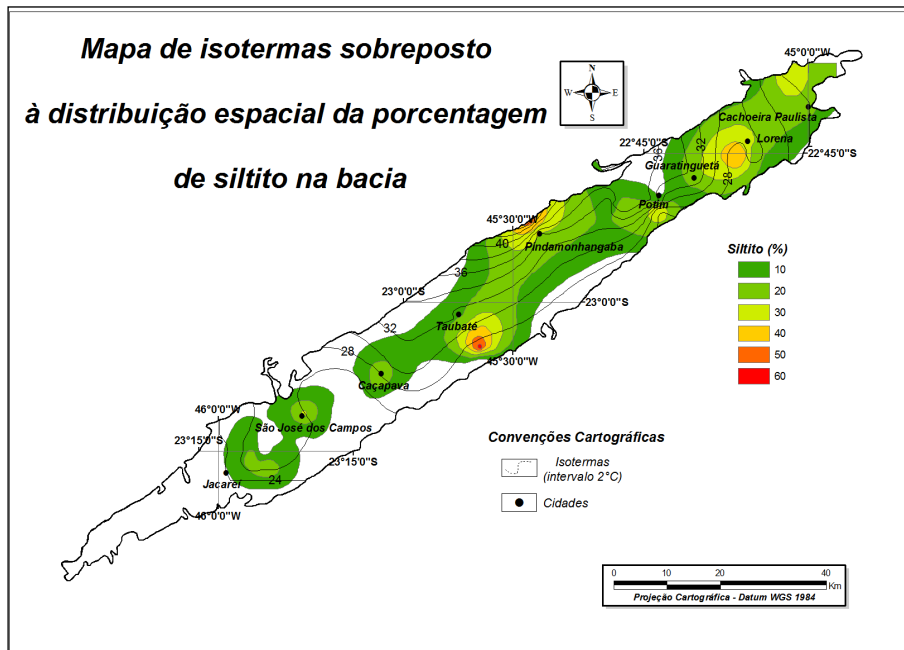


**Figura 7** – Distribuições espaciais dos teores de Arenito (em porcentagem) e das Temperaturas (em °C) na bacia sedimentar de Taubaté.

**Figure 7** – Spatial distribution of sandstone (in percentage) and temperatures (°C) in the Taubaté sedimentary basin.

A distribuição espacial dos siltitos, Figura 8, mostra teores relativamente elevados próximos a Taubaté (60%), em uma área pequena e restrita. Em Pindamonhangaba não chega a ter 50% do total das perfurações. Entre Guaratinguetá e Lorena o percentual destes alcança 40%.

Em relação às temperaturas, não há um padrão relacionado deste parâmetro com a distribuição de siltitos; os valores variam de 28° C a 42° C aproximadamente nas áreas de maiores porcentagens deste sedimento.

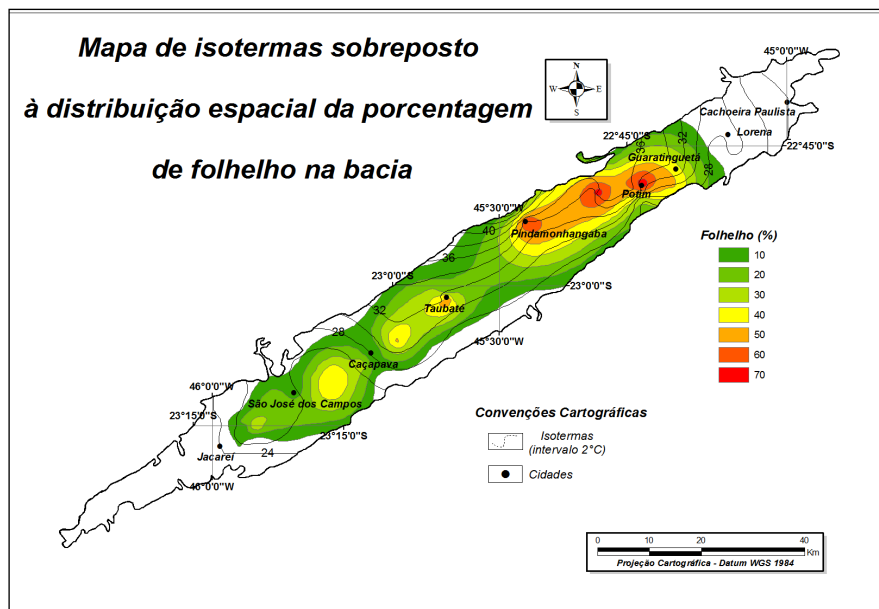


**Figura 8** – Distribuições espaciais dos teores de Siltito (em porcentagem) e das temperaturas (em °C) na bacia sedimentar de Taubaté.

**Figure 8** – Spatial distributions of siltstone (in percentage) and of temperatures (in °C) in the Taubaté sedimentary basin.

Quanto à distribuição espacial dos folhelhos nota-se uma concentração na região entre Jacareí e Taubaté. A soma, dos

percentuais de siltitos e folhelhos passa dos 90% nessas áreas (Figura 9).



**Figura 9** - Distribuições espaciais de Folhelho (em porcentagem) e das Temperaturas (em °C) na bacia sedimentar de Taubaté.

**Figure 9** - Spatial distributions of shale (in percentage) and temperatures (in °C) in the Taubaté sedimentary basin.



Aventa-se a hipótese de que as diferenças observadas nas distribuições de sedimentos e nos campos de temperaturas estariam decorrentes das seguintes características na evolução tectônica da área de estudo:

- A Bacia de Taubaté desenvolveu 3 (três) blocos distintos: um de Jacareí até Taubaté, outro de Taubaté até Pindamonhangaba e outro de Pindamonhangaba até Cachoeira Paulista;
- O bloco Taubaté – Pindamonhangaba abateu-se e adernou para NW.

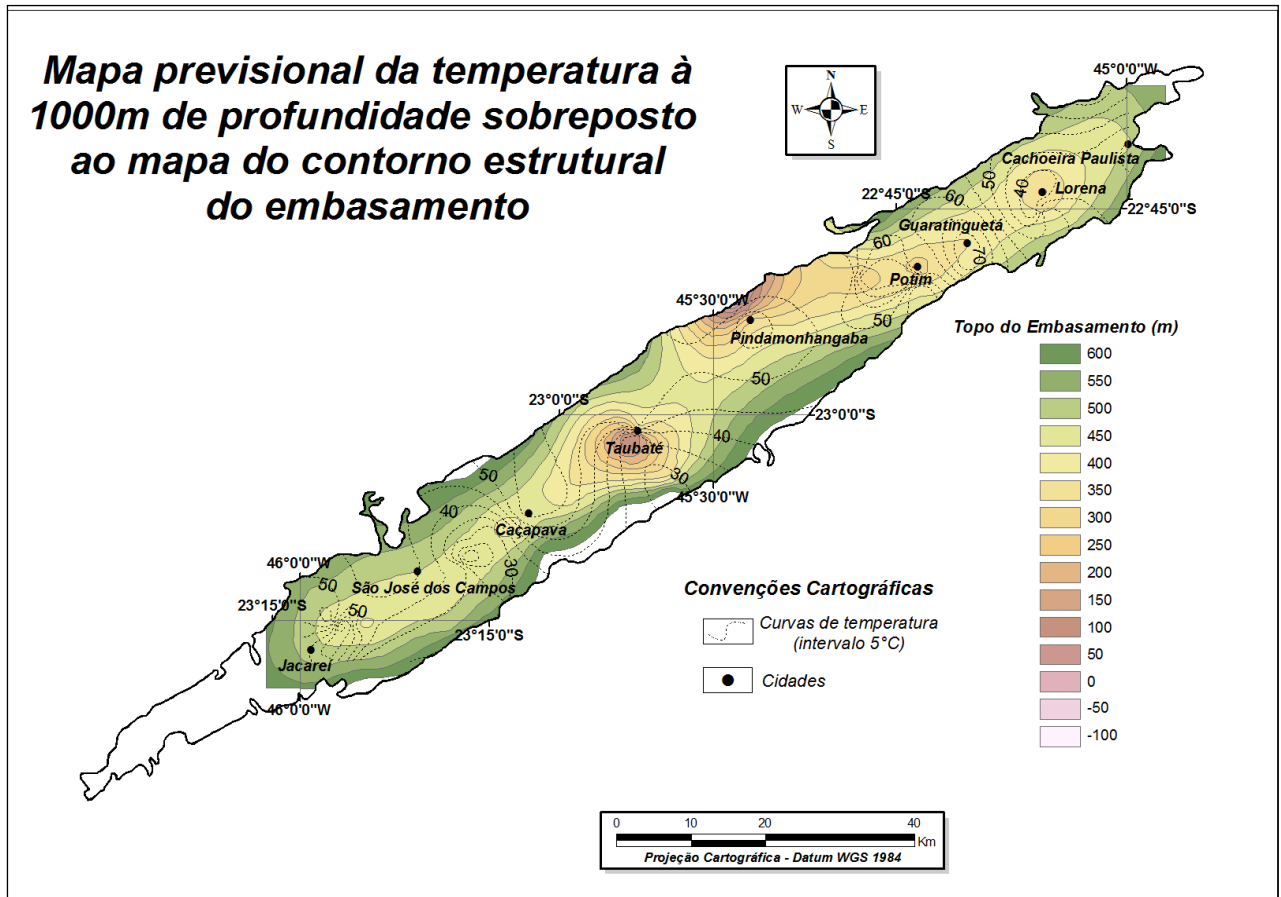
**Análise da temperatura no topo do embasamento na bacia**

Dados de gradientes geotérmicos calculados foram utilizados nas determinações de temperaturas do topo do embasamento. Os resultados

foram utilizados na elaboração dos mapas previsionais (a 1.000 metros de profundidade), sobrepostos ao contorno estrutural do embasamento, conforme Figura 10.

A área de Potim e Guaratinguetá apresentou então os maiores valores de temperaturas, que superam os 70° C aos 1.000 metros de profundidade (ou seja, 70° C/km, em comparação de outros pontos na bacia, entre 30 e 50° C/km).

Não foi observada uma associação entre os diferentes tipos litológicos predominantes na bacia e a distribuição dos valores de temperatura previstos para a profundidade de 1.000 metros, muito menos com o contorno do topo do embasamento cristalino.

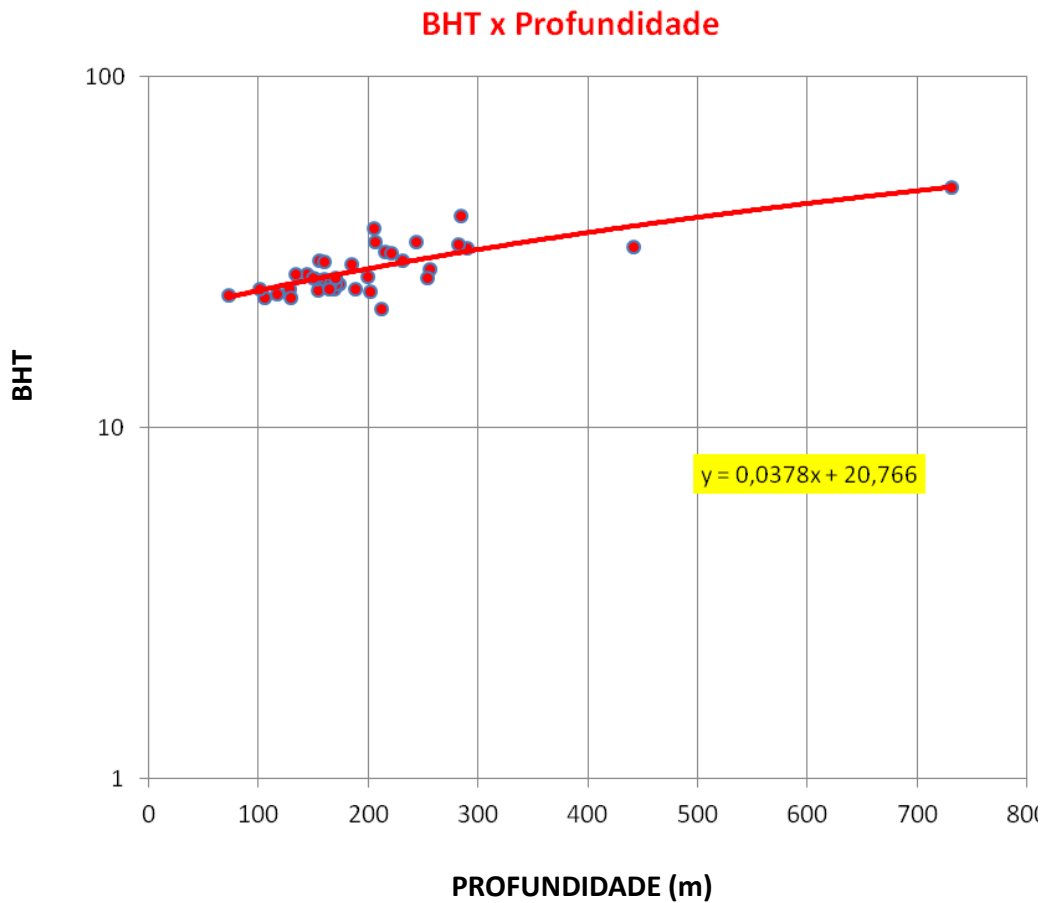


**Figura 10** – Distribuição das temperaturas estimadas a 1.000 metros de profundidade, sobreposto ao mapa do contorno estrutural embasamento na bacia sedimentar de Taubaté.

**Figure 10** – Predicted distributions of temperatures at 1000 meter depth superimposed on by the structural basement map of the Taubaté sedimentary basin.

Os resultados da correlação entre os valores de temperatura (BHT) e as porcentagens de arenito, siltito e folhelho apresentaram leve tendências, porém coeficiente de correlação menor que 50%. Mesmo assim, há uma tendência da temperatura decrescer com o aumento da porcentagem de arenito. Os resultados da temperatura de todas as perfis analisadas, não havia variação de temperatura na presença de arenito ao longo do perfil. A não existência de gradiente geotérmico em arenitos pode contribuir com esta tendência negativa.

Nos siltitos e folhelhos, nota-se uma leve tendência de aumento da temperatura em relação a maior porcentagem de ocorrência destes sedimentos, e a correlação entre a espessura do pacote sedimentar e a temperatura esperada do fundo dos poços foi positiva. A Figura 11 apresenta uma correlação entre a temperatura e a profundidade. Ao ser utilizada a fórmula obtida da equação da reta de tendência, mostrou que a 1.000 metros de profundidade, em média, a bacia deveria ter 57,7° C e a 2.000 metros, 94,7° C.



**Figura 11** - Correlação entre os valores de temperaturas de fundo do poço (BHT) e as profundidades dos poços.

**Figure 11** - Correlation of values of bottom-hole temperatures (BHT) and depths of wells.

## DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Os dados plotados dos poços escolhidos mostraram que de Jacareí até São José dos Campos e de Lorena a Cachoeira Paulista, apesar das variações de espessuras, os poços possuíam uma temperatura no topo do embasamento em torno de 24° C. As maiores concentrações desse tipo litológico nesta porção da bacia corroboraram com a tendên-

cia negativa verificada entre temperatura e porcentagem de arenitos.

A isoterma de 20° C a 50 metros de profundidade, linha base e ponto de partida para avaliação geotermal no sudeste brasileiro, segundo Hamza (comunicação verbal), foi utilizada para uma das duas formas de calcular o gradiente da

bacia. Rodrigues e Arruda (2007) usaram 22° C como ponto de partida para avaliar gradiente da bacia. Este autor chegou a gradientes variáveis de 18 a 50° C por quilometro, com um poço anômalo de 55° C/km na parte central da bacia, nas coordenadas 45,6° longitude oeste e 23,05° latitude sul.

A maior temperatura encontrada, de cerca de 48° C foi no furo da fazenda Morro Agudo em Pindamonhangaba, aos 712 metros de profundidade. Pelo procedimento de Hamza (comunicação verbal), descontados os 50 metros iniciais, com uma temperatura de 20° C, houve um incremento de cerca de 28° C para 662 metros perfurados restantes.

O resultado de gradiente de 42,79° C/km, é bem acima do valor médio obtido no conjunto dos poços analisados, caracterizando desta forma a anomalia geotermal, porém, bem abaixo do valor máximo calculado por Rodrigues, de 55° C/km (2007).

Para a Bacia de Resende, contígua, os valores obtidos variaram de 19 a 33° C por quilometro segundo Gomes e Hamza (2003 e 2005), utilizando o mesmo procedimento. Em termos geotérmicos, a Bacia de Taubaté é mais quente do que a de Resende.

Ao ser utilizado o parâmetro de 42,79° C/km e de acordo com os dados de espessura da bacia de Molinari (2003), a área possuiria pelo menos 1.000 metros de espessura. Assim inferiu-se uma temperatura de aproximadamente 56° C para o topo do embasamento. Projetada a profundidade de 2.000 metros, viável de ser atingida por uma perfuração, com a atual tecnologia existente no país, a área estudada poderia ter uma temperatura superior a 112° C, que seria viável para a produção de energia elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a AES – Tietê, na pessoa do gerente de P&D Daniel Marques dos Santos, pelo apoio a pesquisa, e a Perfil Master Ltda. pela cessão dos dados de perfuração dos poços.

## REFERÊNCIAS

BEARDSMORE, G. **Paralana Geothermal Play-Statement of estimated Geothermal Resources**. 2008. Petratherm Limited, Australia. (manuscrito).

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE), Instituto Geológico (IG), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Serviço Geológico do Brasil (CPRM). **Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo**: escala: 1:1.000.000. 3 v. 2005.

A título de comparação, Hamza e Eston (1981) e Hamza et al (2005), propuseram taxas de aumentos de temperaturas na bacia do Paraná de cerca de 1° C para cada 30 metros de profundidade ou 33° C por quilômetro. Paralelamente o DAEE utilizou a seguinte equação linear para projetar as temperaturas das águas do aquífero Guarani:

$$y = 0,02877 * x + 20 \quad (2)$$

Na equação (2) acima  $y$  representa temperatura das águas,  $x$  é a espessura do basalto (Formação Serra Geral) e o fator 20 representa a temperatura média anual da superfície.

De acordo com os resultados alcançados no presente trabalho, a equação semelhante que descreve a variação vertical de temperaturas na bacia de Taubaté, é dada por:

$$y = 0,0378 * x + 20,77 \quad (3)$$

Na equação (3) acima o fator 20,76 representa a temperatura na profundidade de 50 metros.

De acordo com Zalán e Oliveira (2005), há ocorrência de uma pequena intrusão alcalina, no local de coordenadas aproximadas de 45,6° longitude oeste por 22,76° latitude sul, distante a menos de 40 quilômetros da área anômala. As evidências geológicas complementares indicam existências de outras intrusões mais próximas, também de pequeno porte, que potencialmente podem ter contribuído para a caracterização da anomalia estudada, justificando o aumento da temperatura e o consequente grau geotérmico mais elevado.

Conclui-se que a área de Taubaté - Pindamonhangaba é, em principio, prospectável e mais promissora em termos de energia geotermal no estado de São Paulo.

FERNANDES, F., e CHANG, H. K. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté – Vale do rio Paraíba do Sul, leste do estado de São Paulo. **Brazilian Journal of Geophysics**. São Paulo. Vol. 19 (2), p.131-144. 2001.

FERNANDES, F.L. **Arcabouço estrutural e evolução da Bacia de Taubaté – SP**. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 1993. 147 p. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal de Ouro Preto.

- GOMES, A.J.L. E HAMZA, V.M. Geothermal gradient and heat flow in the State of Rio de Janeiro. **Brazilian Journal of Geophysics**. São Paulo. 23 (4): 325-347. 2005.
- GOMES, A.J. E HAMZA, V.M. Avaliação de recursos geotermiais do estado do Rio de Janeiro. In: 8th INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY. 2003. Rio de Janeiro. Proceedings... 6p.
- GOMES, A.J.L. **Avaliação de recursos geotermiais da Bacia do Paraná**. Rio de Janeiro. Brasil. 2009. 186p. Tese (Doutoramento em Geofísica). Observatório Nacional.
- HASUI, Y. & PONÇANO, W.L. Organização estrutural e evolução da Bacia de Taubaté. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30. 1978. Recife. **Anais S.B.G.**, 1978. V. 1, p. 368-381.
- HAMZA, V. M., CARDOSO, R. R., GOMES, A. J. L., ALEXANDRINO, C. H. Brazil: Country Update. In: WORLD GEOTHERMAL CONGRESS 2010. 2010. Bali, Indonesia, Proceedings... p. 25-29.
- HAMZA, V.M. and ESTON, S.M. **Assessment of geothermal resources of Brazil**. Zbl. Geol. Palaontol. Stuttgart. v.1, p.128-155, 1981.
- HAMZA, V.M., SILVA DIAS, F.J.S., GOMES, A.J.L., TERCEROS, Z.D. Numerical and functional representation of regional heat flow in South America. *Phys. Earth Planet. Interiors*. 152, p.223-256. 2005.
- MOLINARI, L. 2003. **Interpretação sísmo-estratigráfica da Bacia de Taubaté – SP**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003. 105p. Monografia (Graduação em Geologia). UFRJ.
- NASCIMENTO FILHO, M. S. **Avaliação do Potencial Geotermal da Bacia de Taubaté**. 2012. 103p. Campinas, SP, Brasil. Dissertação (Mestrado em Geociências). UNICAMP. Campinas, SP.
- RIBEIRO, M.T. 2004, **Fácies microclásticas de um sistema lacustre oligocênico do sudeste do Brasil**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2004. 122p. Dissertação (Mestrado em Geologia). UFRJ.
- RICCOMINI, C., 1989, **O Rift Continental da Serra do Mar**. São Paulo, SP, Brasil. 1989. 256p. Tese (Doutoramento em Geologia). Universidade de São Paulo.
- RODRIGUES, A. M.; ARRUDA, L. B. A utilização da energia geotérmica do sistema hidrotermal Aquífero Guarani. In: 24º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2007. Belo Horizonte. Anais... 11p.
- UNGEMACH, P., HIDALGO, R., ANTICS, M. **Geothermal Potential of Madrid Area: A tentative resource/reserve assessment**. 2008. (manuscrito).
- VIDAL, A.; FERNANDES, F. L.; CHANG, H. K. **Distribuição dos arenitos na Bacia de Taubaté**. São Paulo. Geociências UNESP, v.23, n1/2, p. 55-66. 2004.
- ZALÁN, P. V., OLIVEIRA, J. A. B. **Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil**. Rio de Janeiro. Boletim Geociências Petrobrás, v 13, n 2, p. 269-300, maio/novembro. 2005.