

### 3.1 Resultados da Modelagem 1D

A modelagem 1D foi concebida no modelo de múltiplos poços (*Multiwell*<sup>19</sup>), ou pseudo 3D, segundo Silva (2006). Serão apresentados os resultados dos quatro poços selecionados, em ordem alfabética, nos próximos itens. As Formações são representadas no programa de modelagem pelo nome de *Markers*, termo traduzido como marcadores no presente Estudo, seguido da sua respectiva profundidade.

Segundo Giotto (2005), a modelagem 1D é adequada para análise dos fenômenos de evolução térmica e maturação em bacias para as quais, o banco de dados é restrito, como é o caso da Bacia do Paraná. Na modelagem 1D é assumido pelo programa que os vetores de Fluxo Térmico são verticais, essa abordagem permite estimar a temperatura a partir de limites definidos no caminho do poço estudado, porém exclui quaisquer efeitos térmicos laterais (HAUNTSCHHEL & KAUERAUF, 2009).

Os quatro poços selecionados para a modelagem 1D resultaram em figuras/mapas de Histórico de Soterramento das Litofácies (*Burial Analysis History*), Temperatura, Gradiente Térmico, Fluxo Térmico/*Heat Flow*, Ro - Refletância da Vitrinita (*EASY%Ro*) e Pressão Capilar (*Wetting Phase Saturation - WFS*<sup>20</sup>) por poço. As conclusões da Modelagem 1D dos quatro poços encontram-se integradas no item 3.1.5, onde as figuras/mapas resultantes foram interpretadas.

Os resultados gráficos da modelagem 1D foram editados e inseridos em um único mapa com os dados de litofácies acima, ou seja, das formações, como forma de incrementar a visualização e o entendimento do contexto do poço.

---

19 *GeoGrid Multiwell* - O resultado da modelagem é produzido a partir dos dados de todos os poços inseridos em um único *Geogrid*, de forma a facilitar o gerenciamento de uma grande quantidade de poços, porém não gera resultados 3D.

20 *Wetting Phase Saturation* - Valores de capacidade de saturação da rocha (Livre tradução) entre 0 e 1, onde as rochas com maior capacidade de saturação representam valores próximos de 1, (Byrnes, 2011).

### 3.1.1 1FR01SC

O poço 1FR01SC possui as características extraídas dos dados contidos nas pastas de poços da ANP (2014) e descritas na Tabela 08 (os dados dos demais poços encontram-se no Anexo C). A Formação Irati possui uma intrusão de diabásio de 9 metros de espessura nesse poço (Tabela 09) e teve o LOG representado no programa de modelagem em vista frontal 3D, como ilustrado na Figura 15.

O embasamento não foi alcançado nesse poço, com a perfuração terminando na Formação Furnas. O valor de COT inicial é o maior entre os poços selecionados para modelagem e é um dos poços que possui indícios de óleo, segundo ANP (2014).

Tabela 08 – Características do poço 1FR01SC.

<b>1FR01SC Formação</b>	<b>Profundidade/ (Cota) (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Litologia</b>	<b>COT (%)</b>
Serra Geral	0 (354)	912	5 ígnea	-
Botucatu	912	38	2 arenito	-
Rio do Rasto	950	235	-	-
Teresina	1285	586	-	-
Serra Alta	1871	107	-	-
Irati com intrusão	1978	70	1 folhelho	4
Palermo	2048	88	-	-
Rio Bonito	2136	133	2 arenito	-
Itararé	2269	569	-	-
Ponta Grossa	AUSENTE	-	-	-
Furnas	2838	-	2 arenito	-

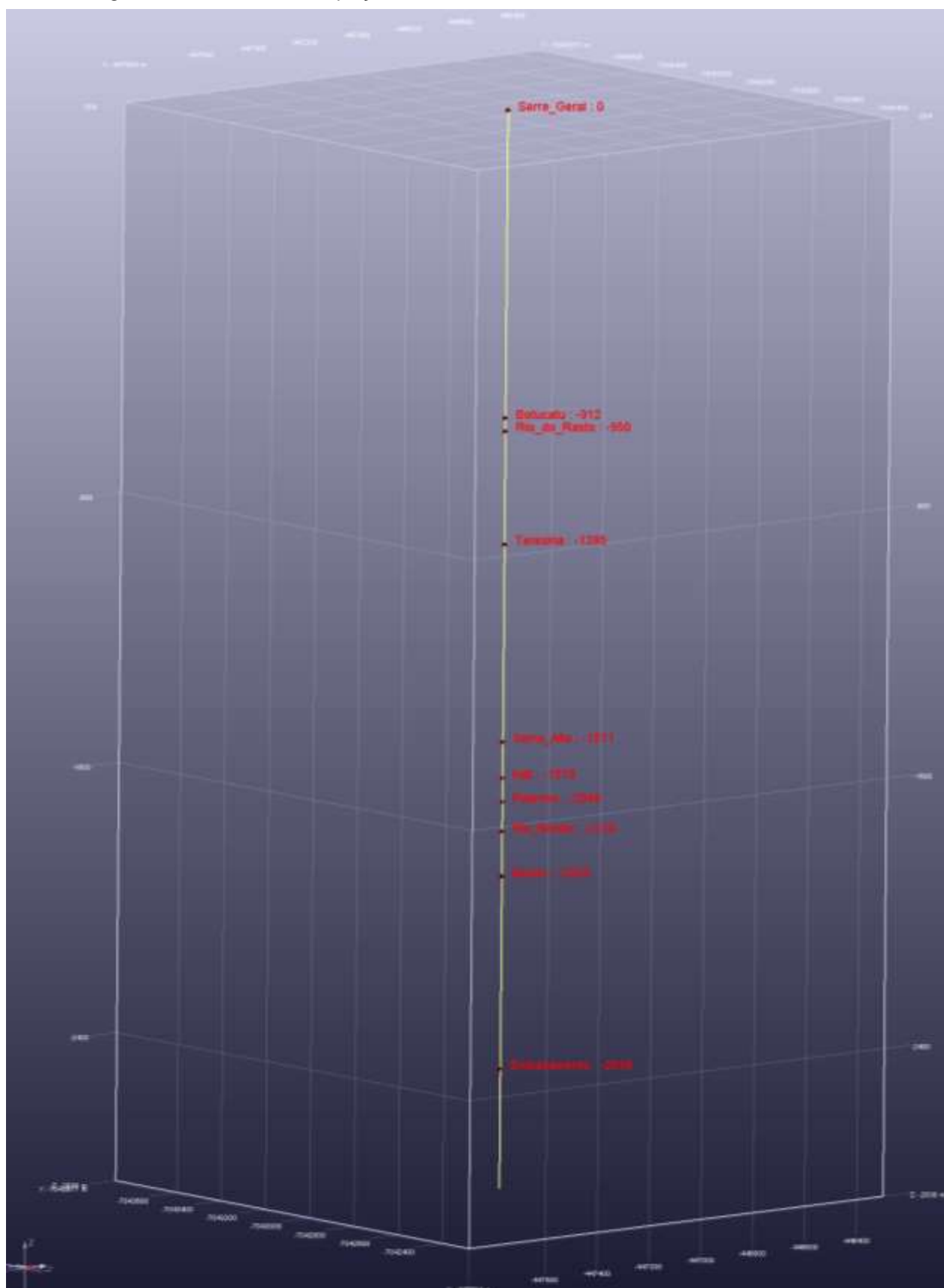
Fonte: ANP(2014).

Tabela 09 – Características da Formação Irati no poço 1FR01SC.

<b>1FR01SC Formação IRATI</b>	<b>Profundidade Cota do poço (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>
Folhelho	1978 (354)	11
Diabásio	1989	9
Folhelho	1998 - 2048	50

Fonte: ANP (2014).

Figura 15 – Markers do poço 1FR01SC.



Fonte: ANP (2004) e *OpenFlow* (2015).

Figura 16 – Litofácies e temperatura do poço 1FR01SC.

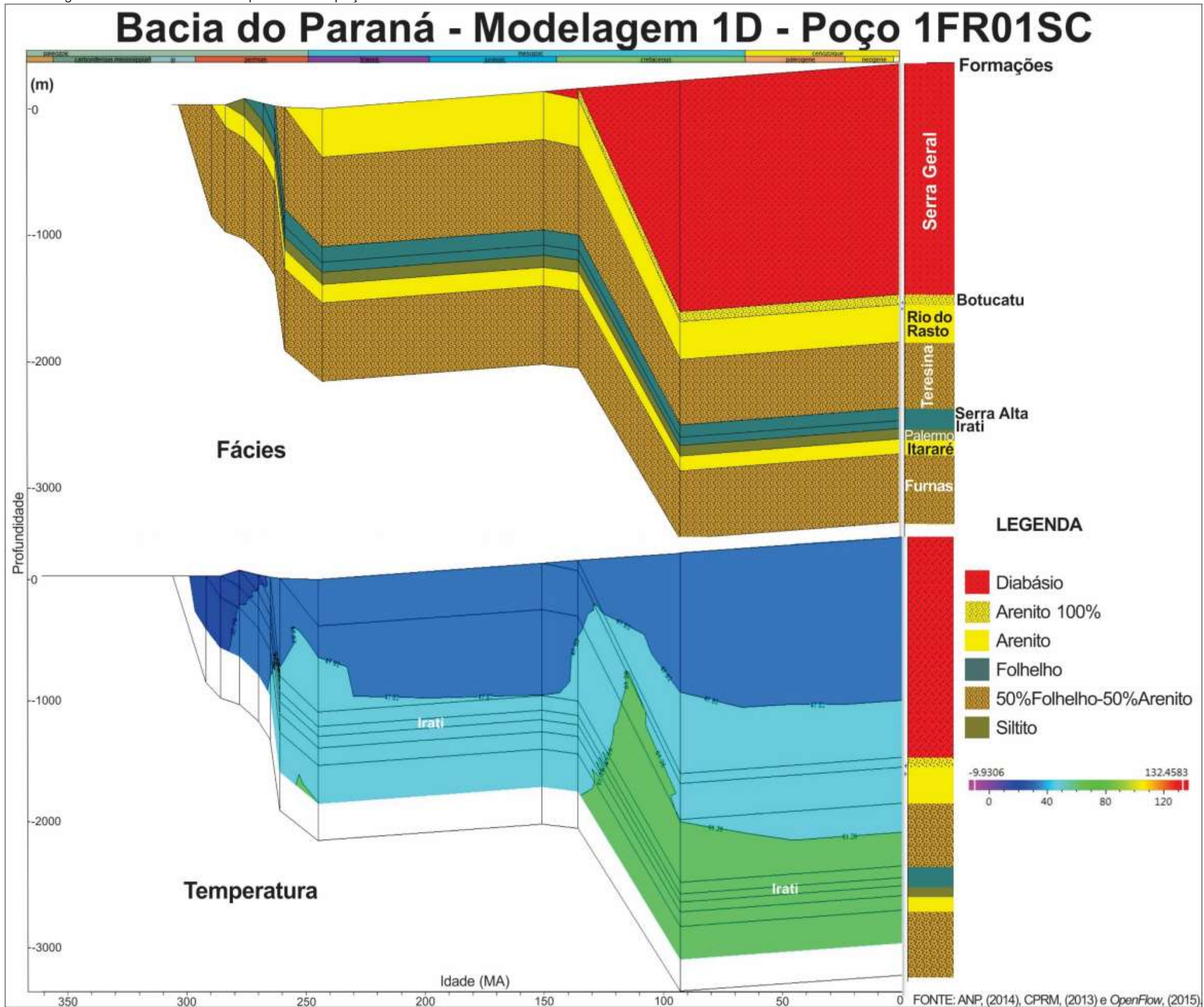




Figura 17 – Gradiente térmico do poço 1FR01SC.

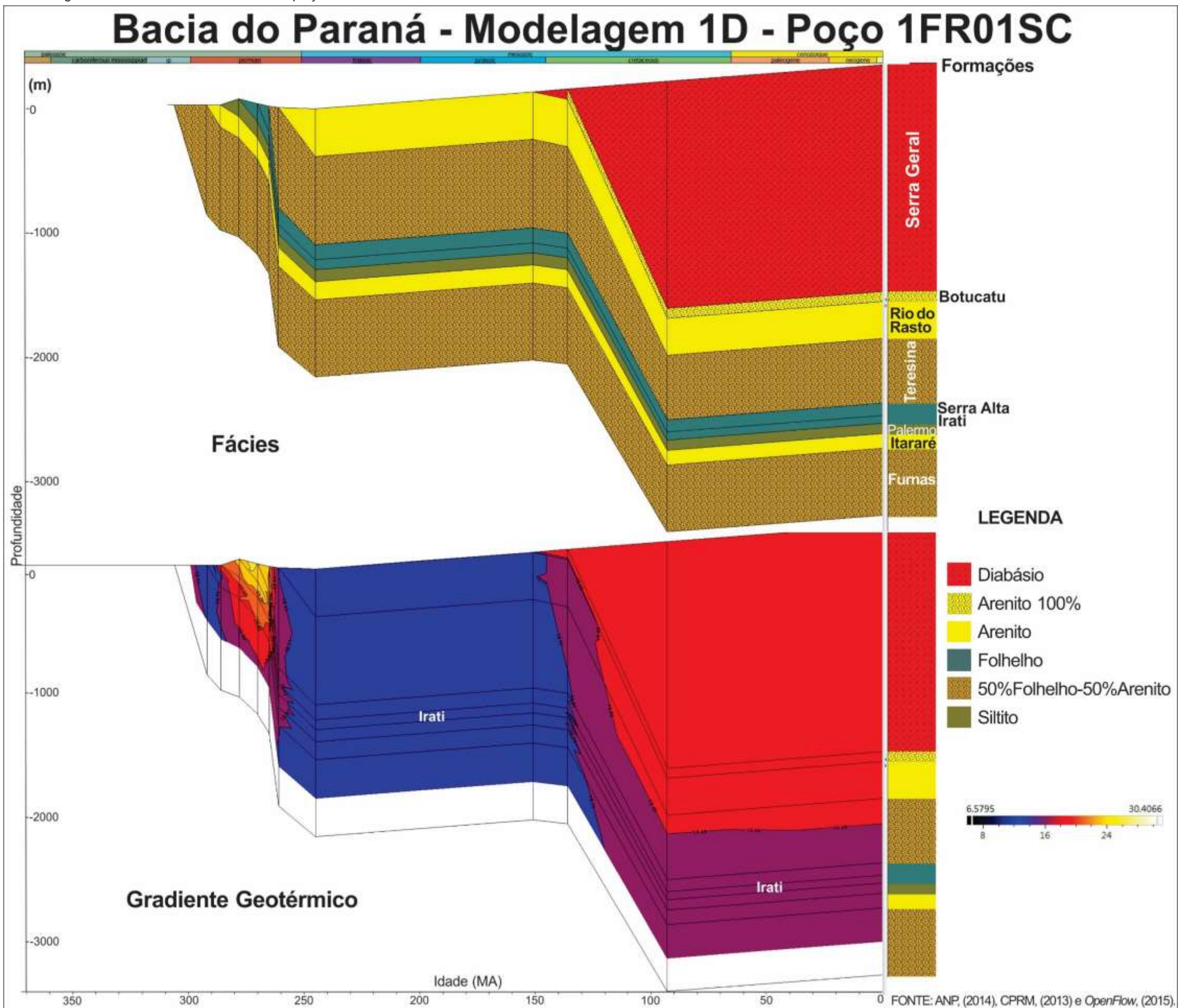




Figura 18 – Fluxo térmico do poço 1FR01SC.

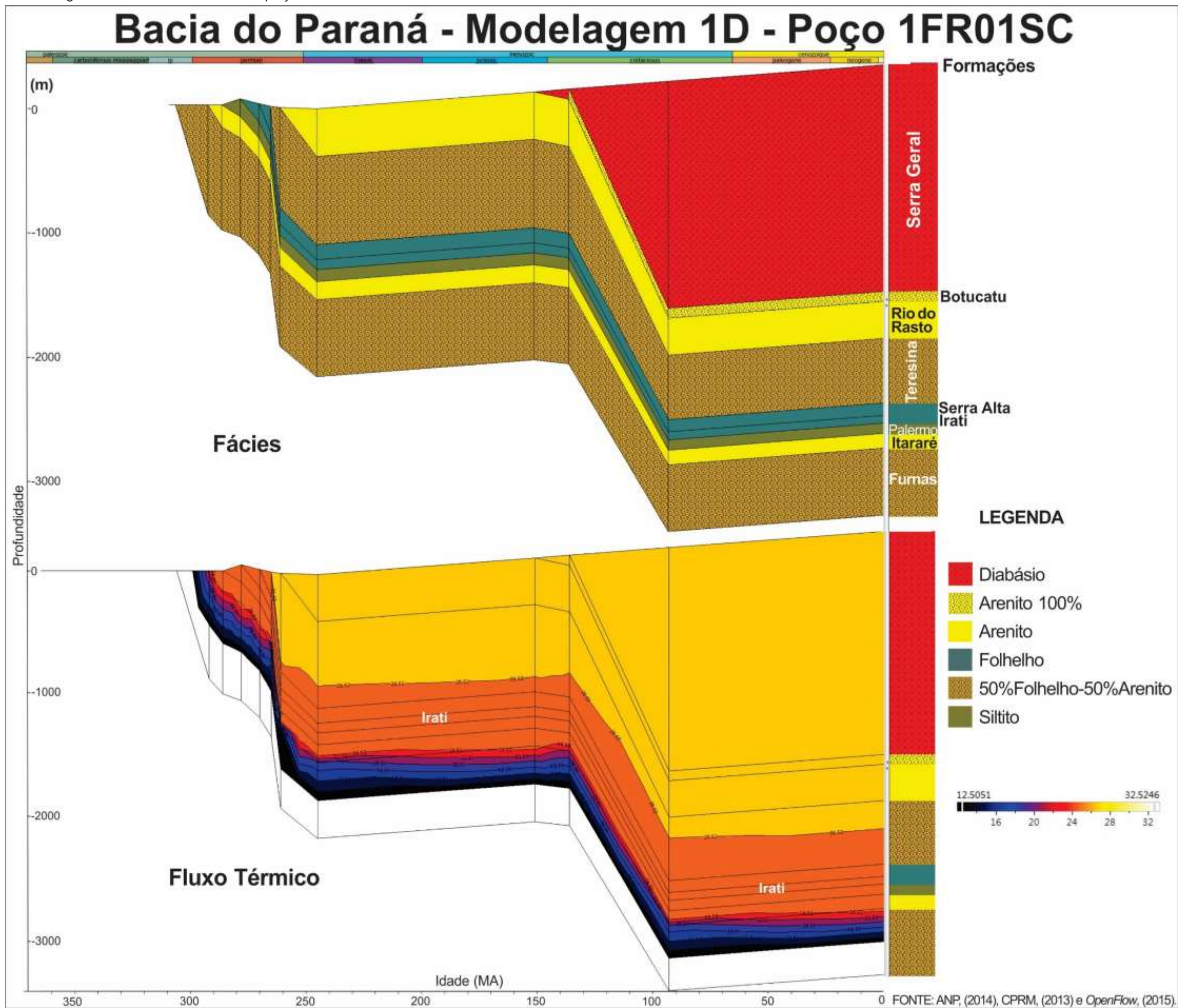




Figura 19 – Refletância da vitrinite do poço 1FR01SC.

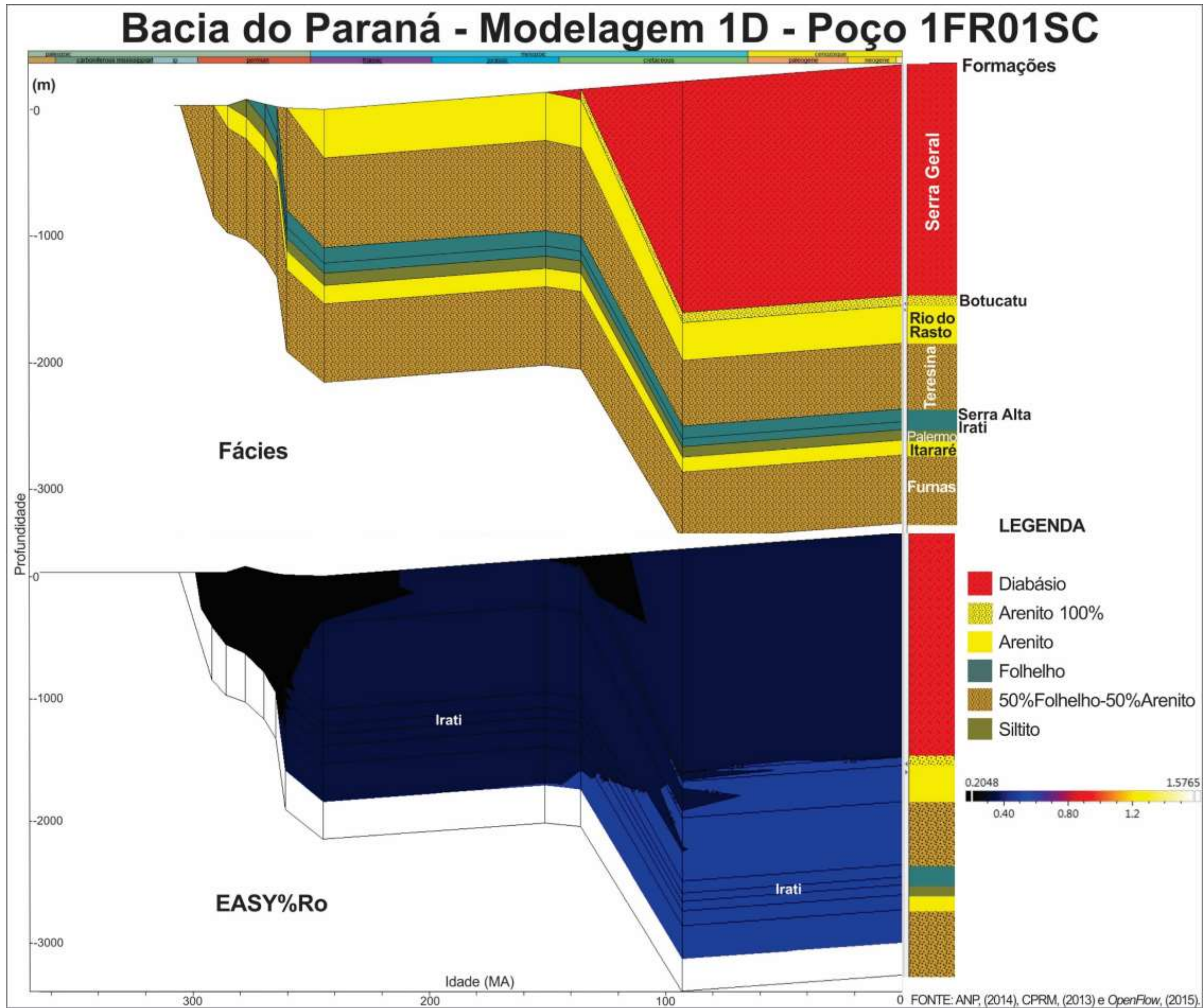
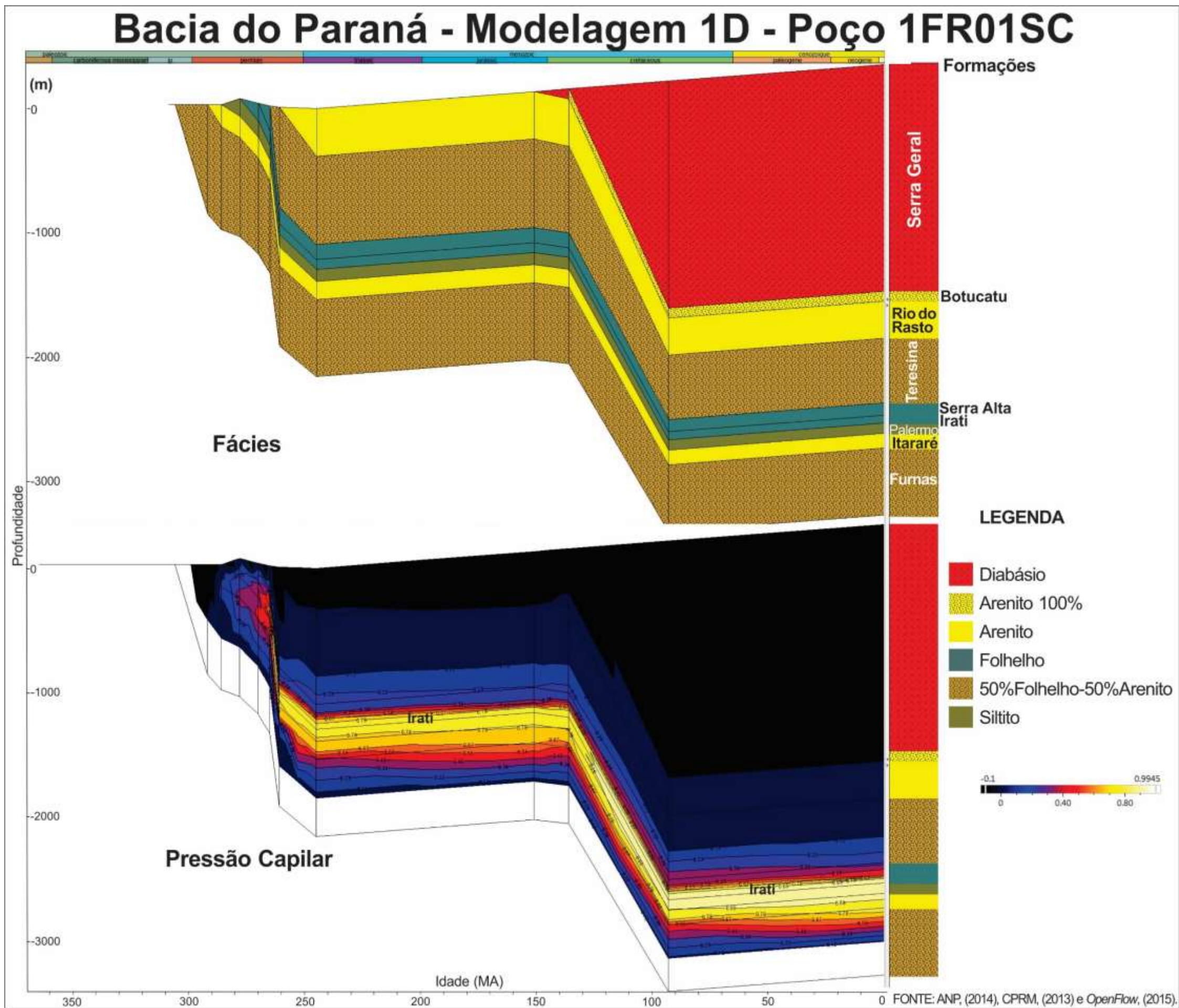




Figura 20 – Pressão Capilar do poço 1FR01SC.





### 3.1.2 1GO01SC

O poço 1GO01SC possui as características extraídas das pastas de poços da ANP (2014) descritas na Tabela 10. A Formação Irati possui duas ocorrências de intrusões de diabásio no poço (Tabela 11) e teve o LOG representado no programa de modelagem em vista frontal 3D, como ilustrado na Figura 21.

Tabela 10 – Características do poço 1GO01SC.

<b>1GO01SC Formação</b>	<b>Profundidade/ (Cota) (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Litologia</b>	<b>COT (%)</b>
Serra Geral	0 (908)	1244	5 ígnea	-
Botucatu	1244	340	2 arenito	-
Rio do Rasto	1504	496	1 folhelho	0,03
Teresina	2080	380	1 folhelho	0,07
Serra Alta	2460	115	1 folhelho	0,22
Irati com intrusão	2575	167	1 folhelho	1,96
Palermo	2742	159	3 siltito	0,29
Rio Bonito	2901	99	3 siltito	0,33
Itararé	3000	676	2 arenito	0,35
Ponta Grossa	3676	61	3 siltito	0,33
Furnas	3737	343	2 arenito	-
Embasamento	4080	-	-	-

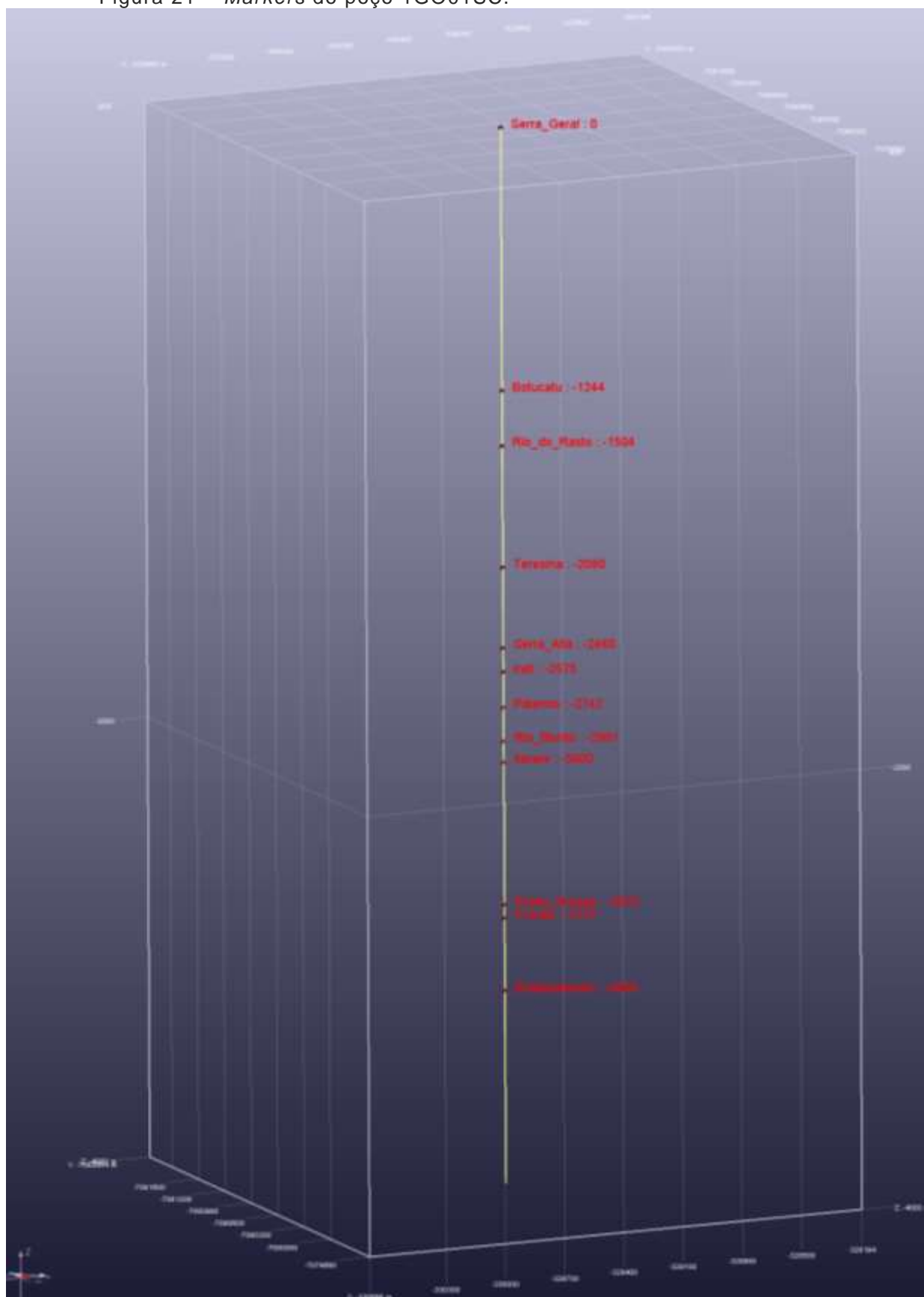
Fonte: ANP (2014).

Tabela 11 – Características da Formação Irati no poço 1GO01SC.

<b>1GO01SC Formação Irati</b>	<b>Profundidade Cota do poço (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>
Folhelho	2575 (908)	58
Diabásio	2633	10
Folhelho	2643	19
Diabásio	2662	73
Folhelho	2735-2742	7

Fonte: ANP (2014).

Figura 21 – Markers do poço 1GO01SC.



Fonte: ANP (2004) e *OpenFlow* (2015).



Figura 22 – Litofácies e Temperatura do poço 1GO01SC.

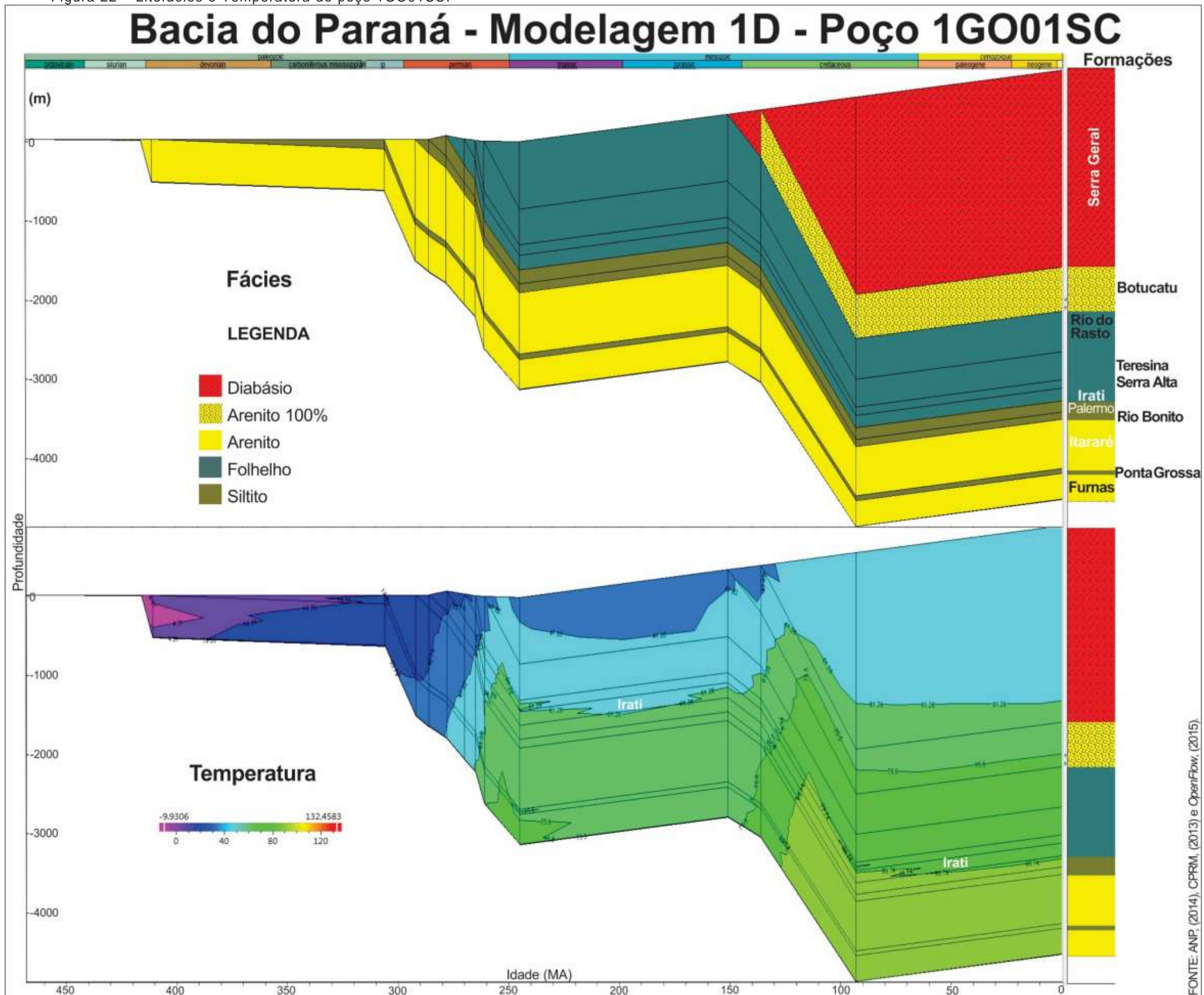




Figura 23 – Gradiente térmico do poço 1GO01SC .

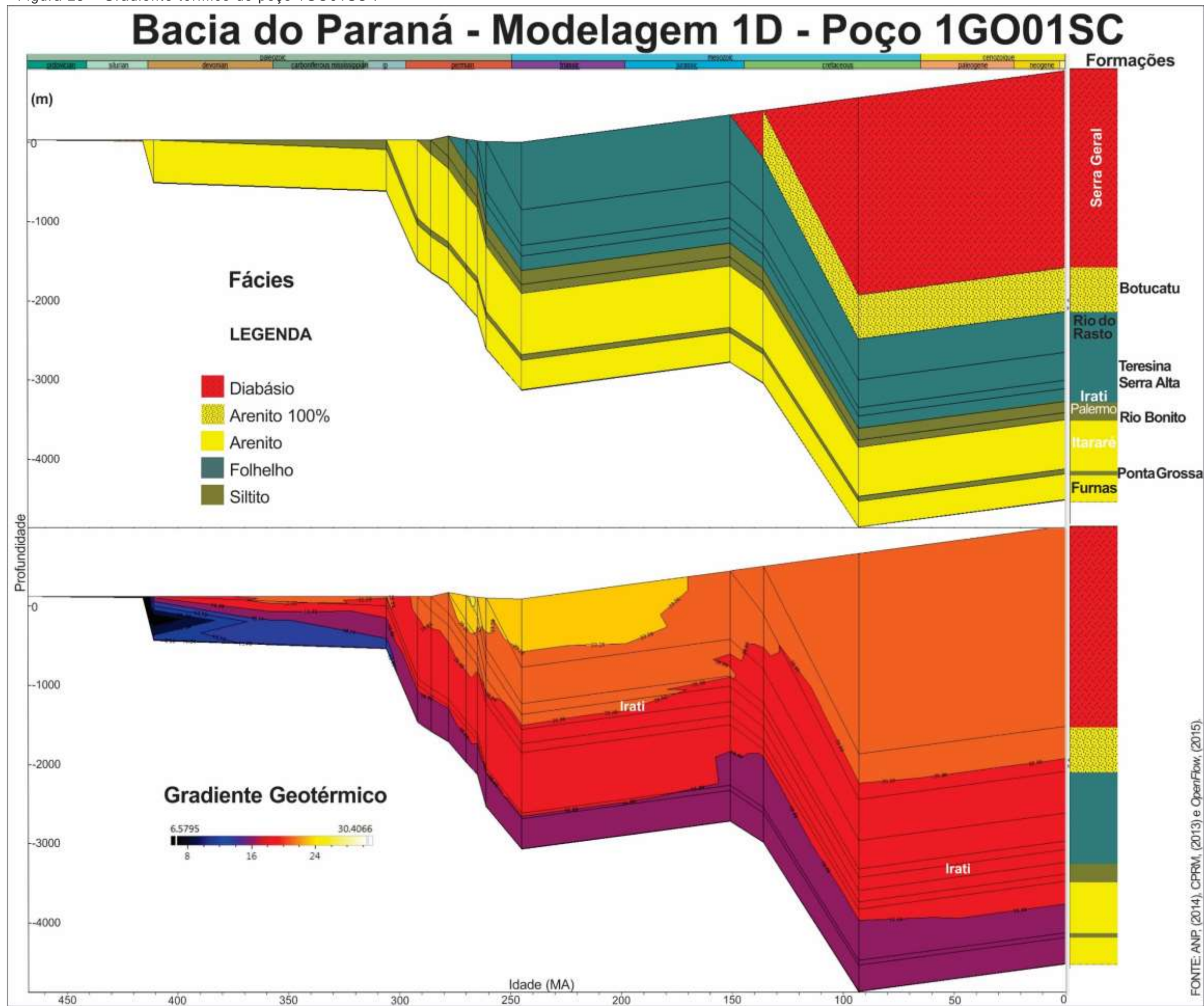




Figura 24 – Fluxo térmico do poço 1GO01SC.

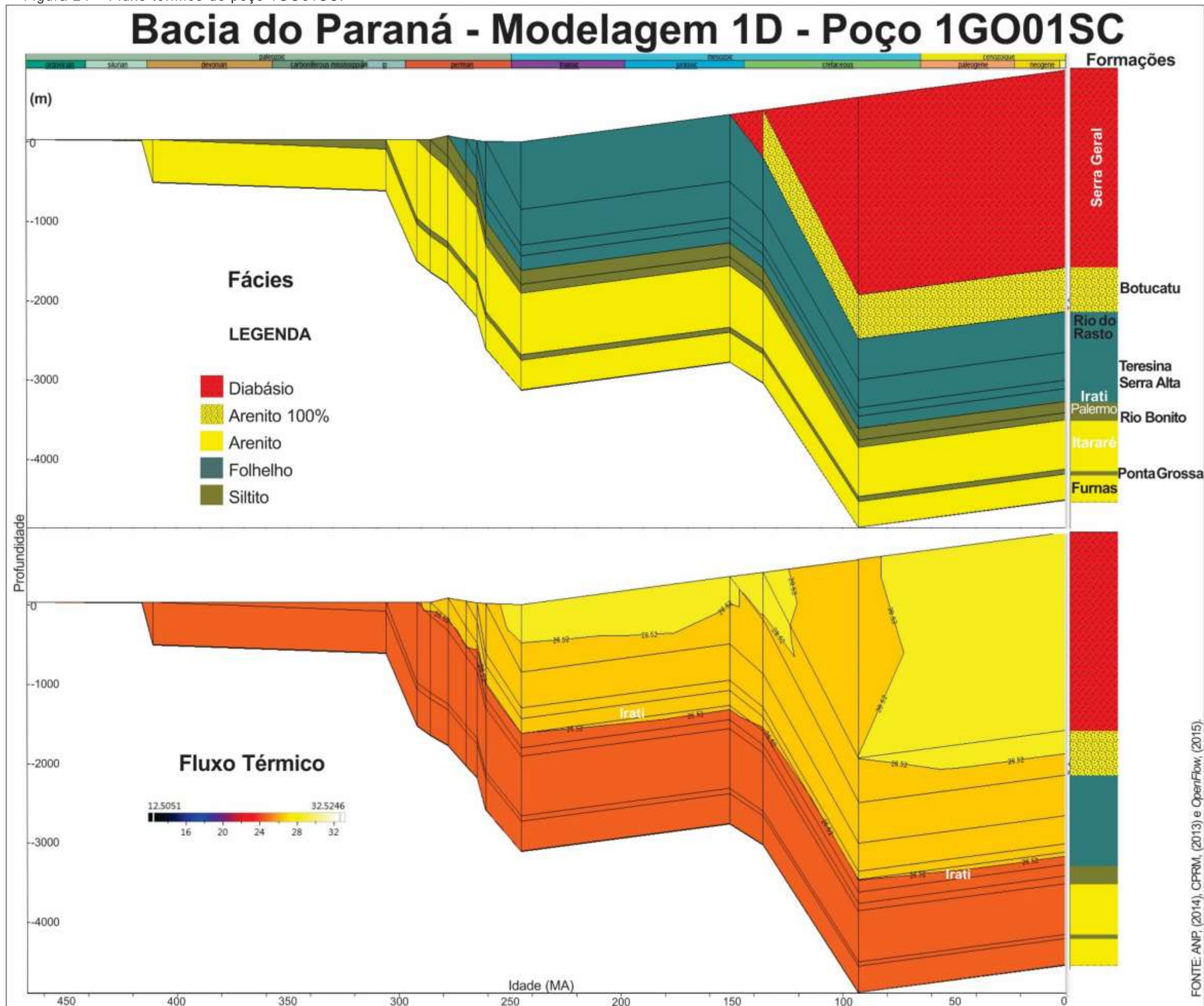




Figura 25 – Refletância da vitrinita do poço 1GO01SC.

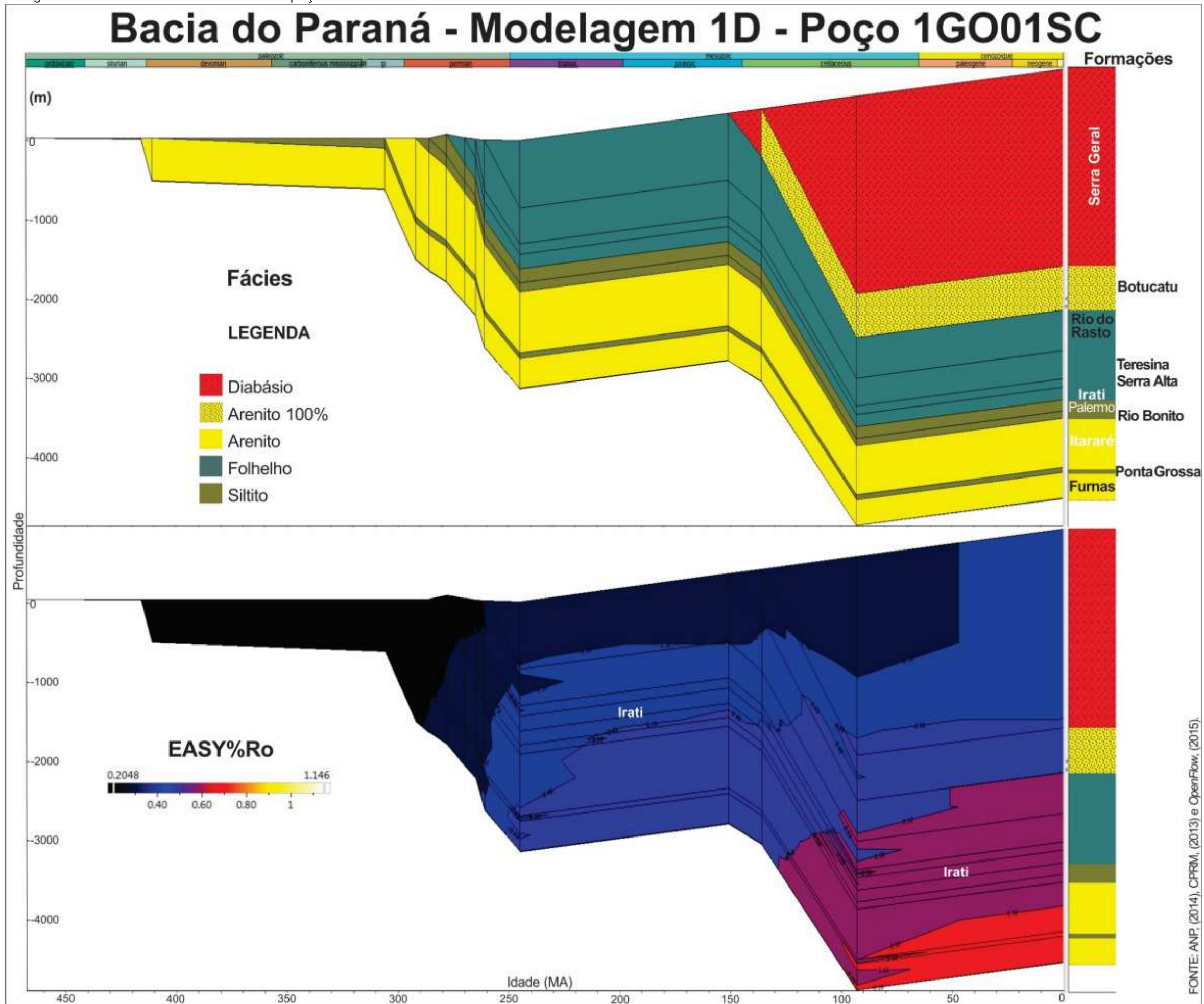
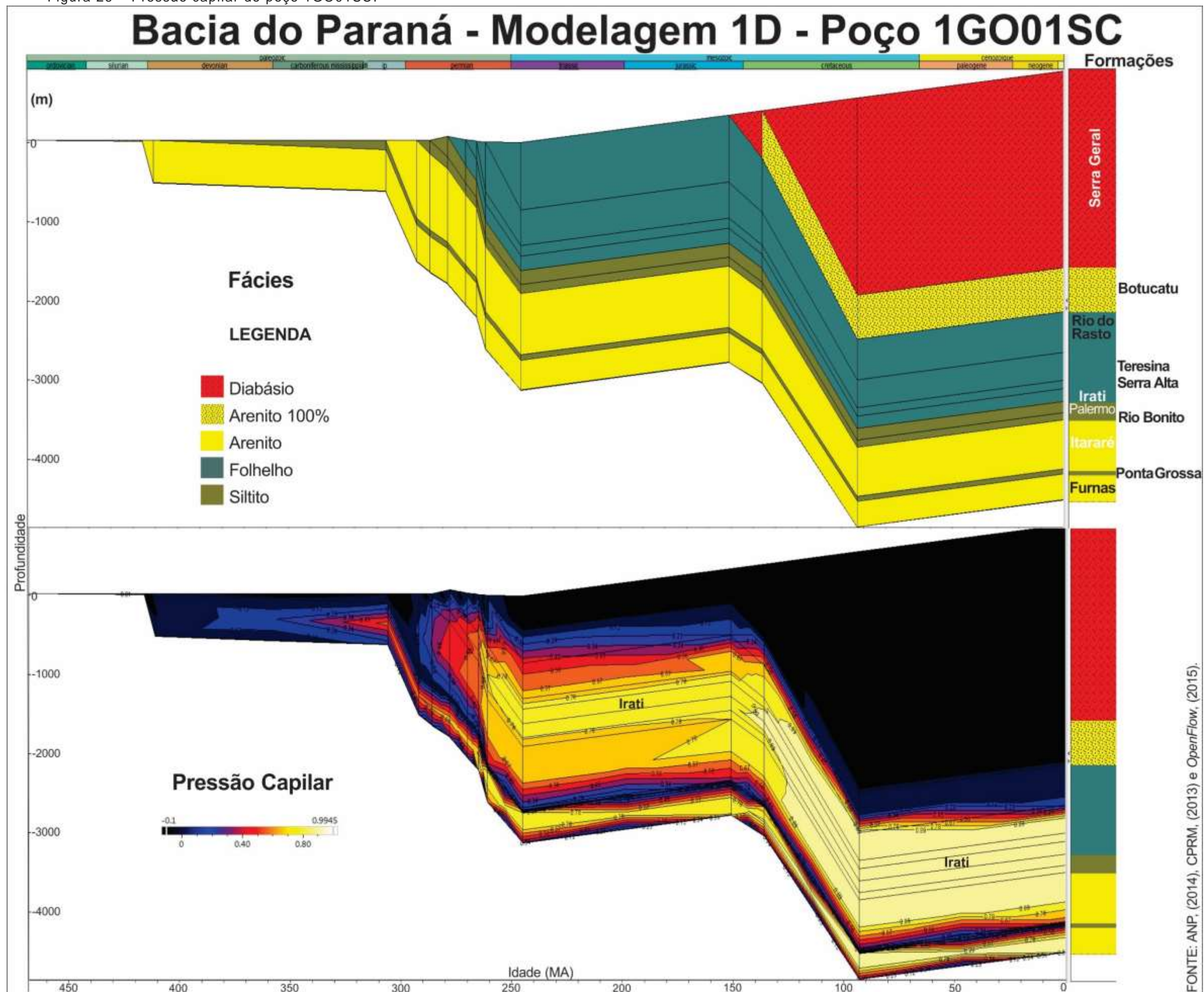




Figura 26 – Pressão capilar do poço 1G001SC.



### 3.1.3 1HV01SC

O poço 1HV01SC possui as características extraídas das pastas de poços da ANP (2014) descritas na Tabela 12. A Formação Irati, nesse poço, possui duas ocorrências de intrusões ígneas de 21 e 6 metros, respectivamente (Tabela 13), e teve o LOG representado no programa de modelagem em vista frontal 3D na Figura 27, com os marcadores e suas profundidades indicados nela. O embasamento foi encontrado em 2691 metros, o mais raso entre os poços escolhidos para as modelagens.

Tabela 12 – Características do poço 1HV01SC.

<b>1HV01SC Formação</b>	<b>Prof/ (Cota) (m)</b>	<b>Espess. (m)</b>	<b>Litologia</b>	<b>COT (%)</b>
Serra Geral	0 (650)	675	5 ígnea	-
Botucatu	675	120	2 arenito	-
Rio do Rasto	795	513	-	-
Teresina D	1308	85	3 siltito	-
Serra Alta	1663	100	3 siltito	-
Irati com intrusão	1753	85	-	3
Palermo	1838	102	-	-
Rio Bonito	1940	144	-	-
Itararé	2084	319	-	-
Furnas	2403	288	-	-
Embasamento	2691	-	-	-

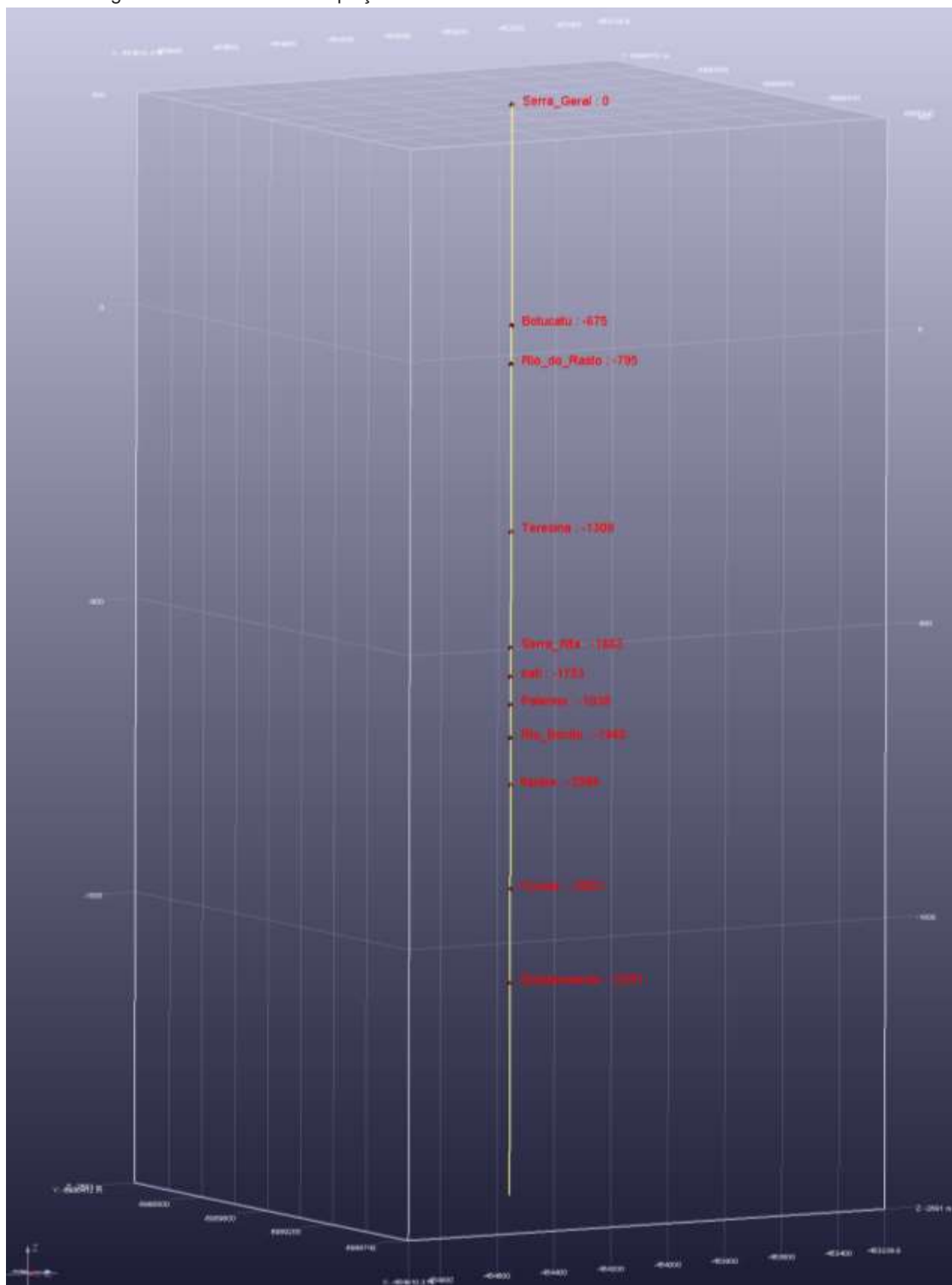
Fonte: ANP (2014).

Tabela 13 – Características da Formação Irati no poço 1HV01SC.

<b>1HV01SC Formação Irati</b>	<b>Profundidade Cota do poço (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>
Folhelho	1753 (650)	25
Diabásio	1778	21
Folhelho	1799	3
Diabásio	1802	6
Folhelho	1808-1838	30

Fonte: ANP (2014).

Figura 27 – Markers do poço 1HV01SC.



Fonte: ANP (2004) e *OpenFlow* (2015).



Figura 28 – Litofácies e Temperatura do poço 1HV01SC.

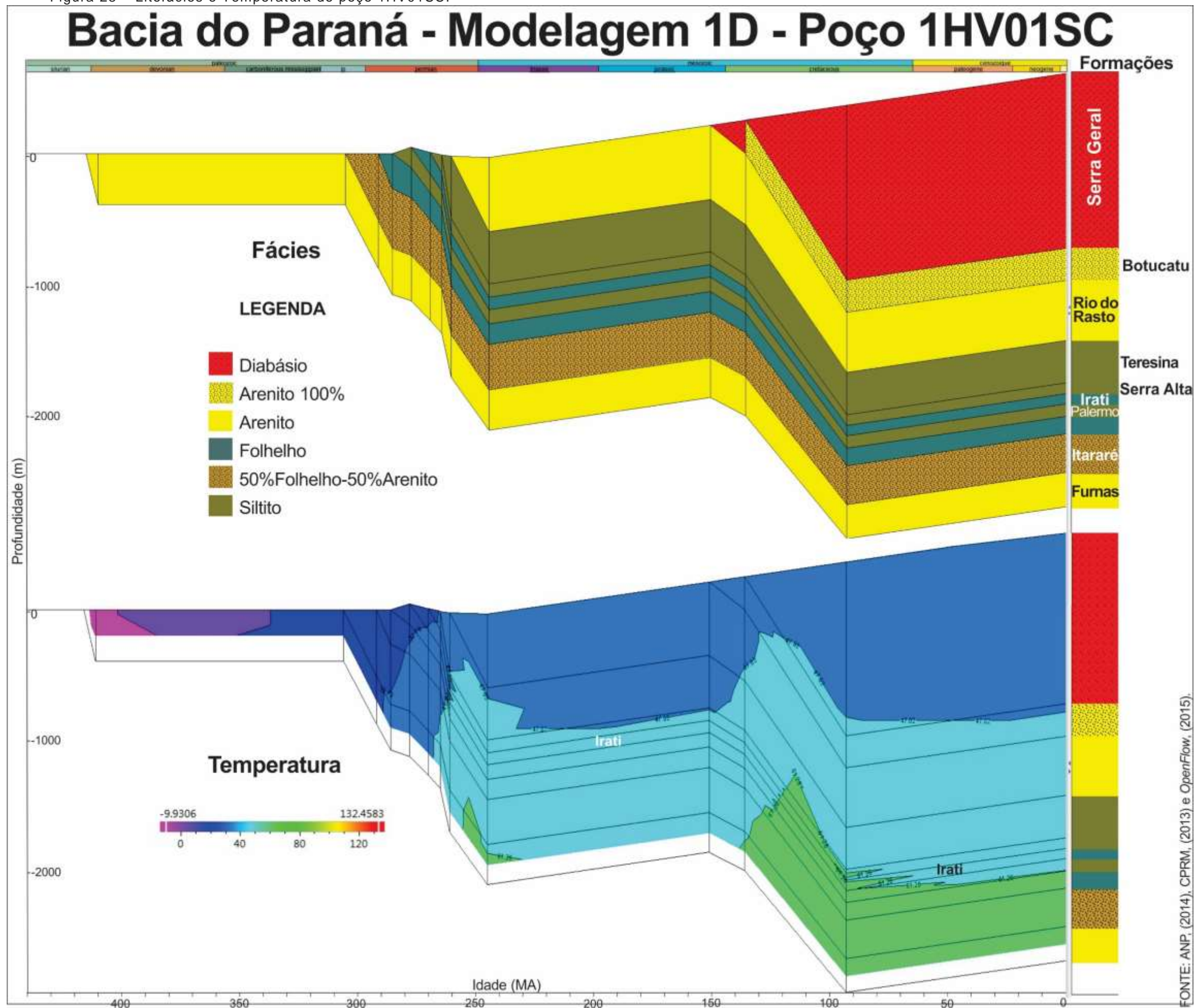




Figura 29 – Gradiente térmico do poço 1HV01SC.

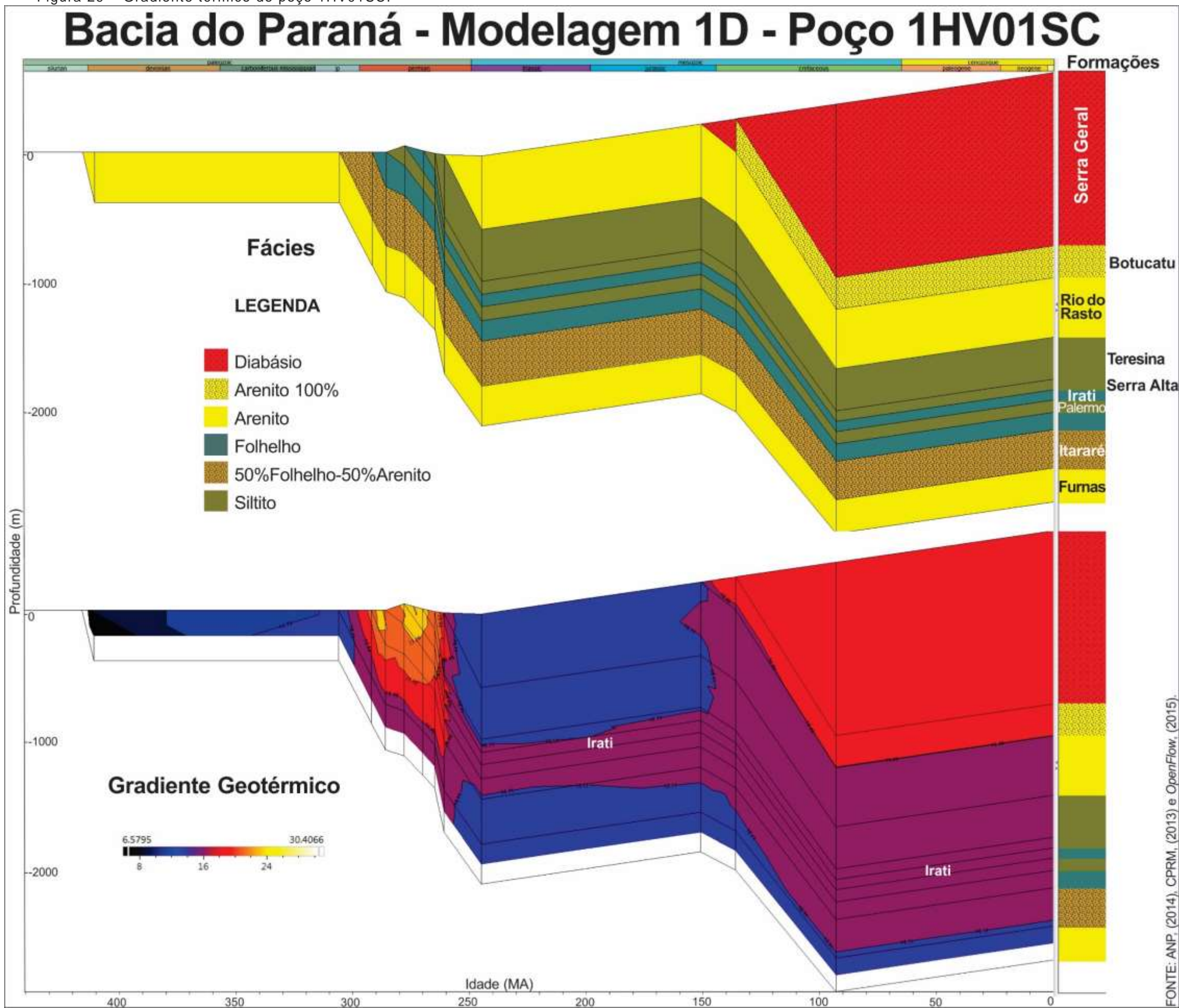




Figura 30 – Fluxo térmico do poço 1HV01SC.

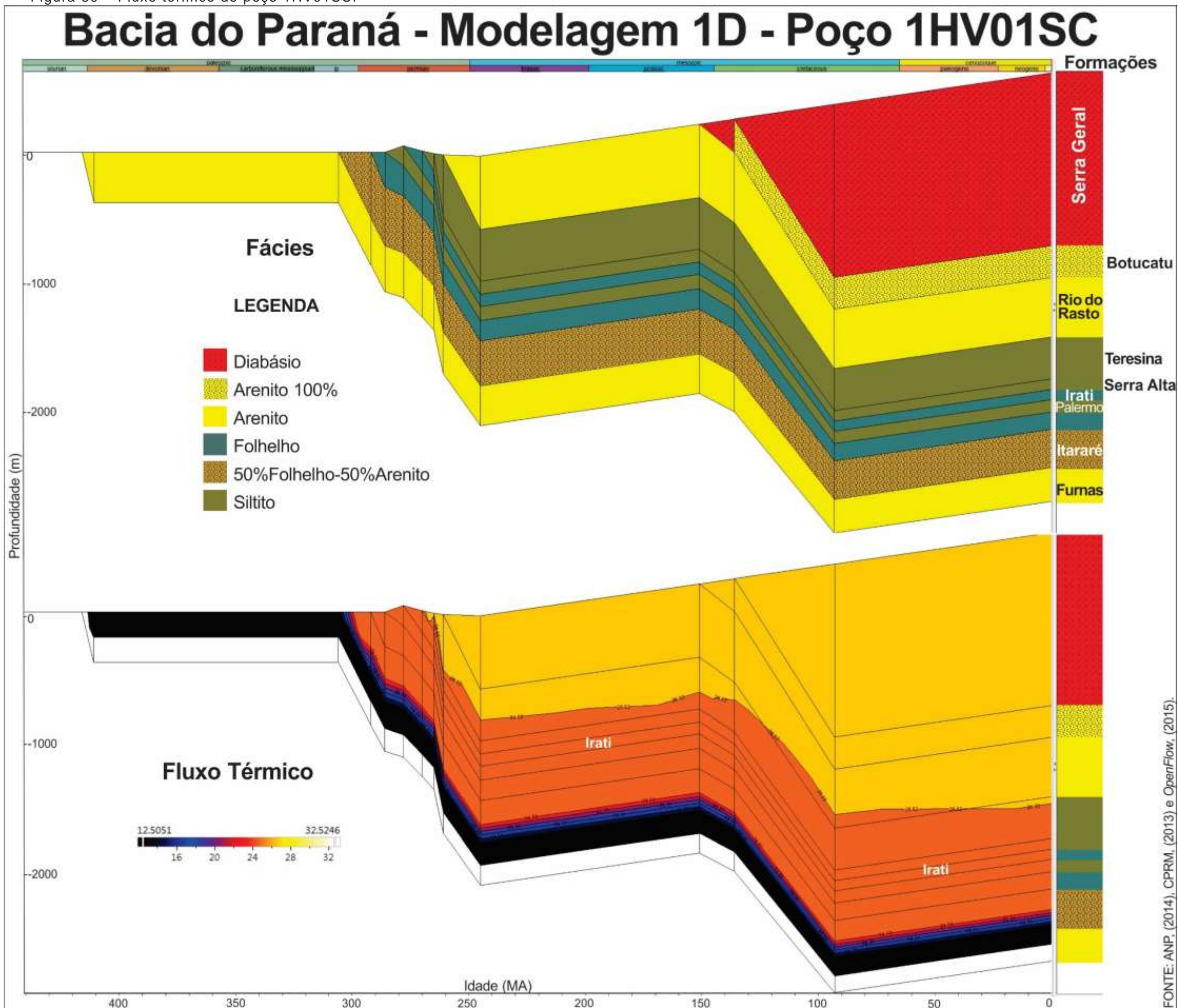




Figura 31 – Refletância da vitrinita do poço 1HV01SC.

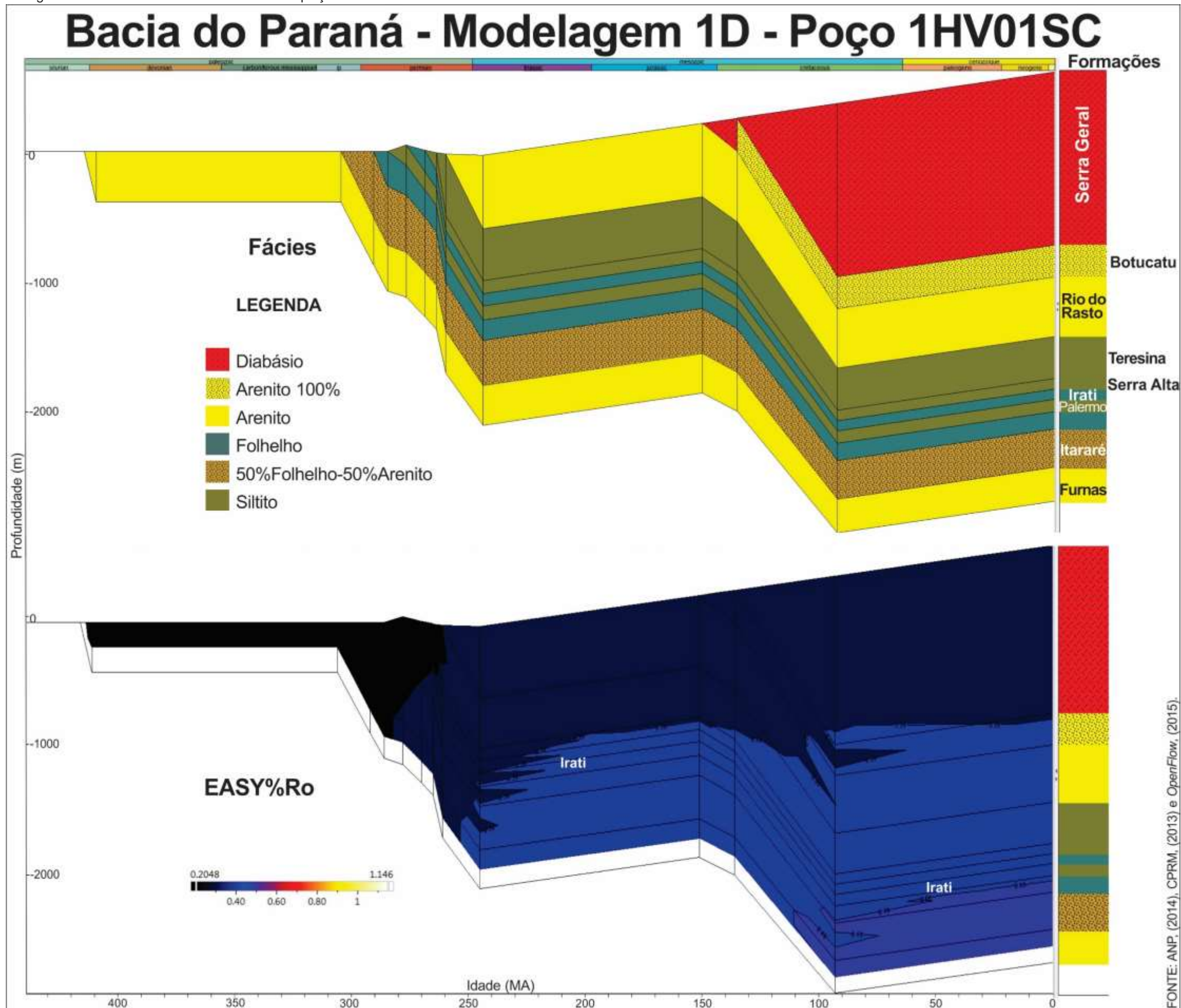
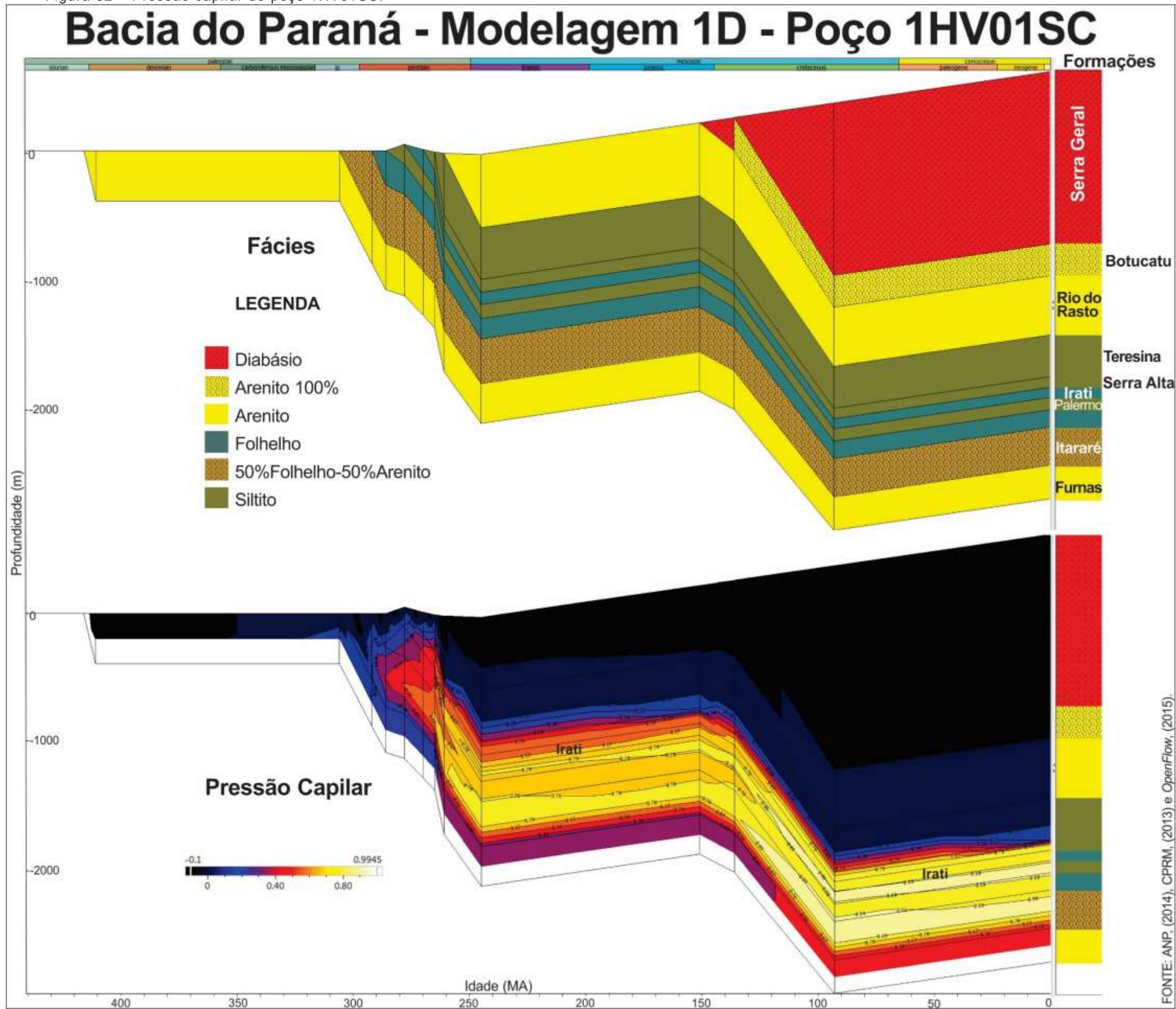




Figura 32 – Pressão capilar do poço 1HV01SC.



### 3.1.4 1SE01SC

O poço 1SE01SC teve o LOG representado no programa de modelagem como ilustrado na Figura 33. Nesse poço, destaca-se a presença da Supersequência Rio Ivaí, representada por conglomerados, segundo ANP (2014), assim como sua profundidade significativa. O embasamento foi atingido a 4000 metros de profundidade. As características extraídas das pastas de poços da ANP estão descritas na Tabela 14. A Formação Irati, nesse poço, possui uma ocorrência de intrusão ígnea de 20 metros entre os folhelhos (Tabela 15).

Tabela 14 – Características do poço 1SE01SC.

<b>1SE01SC Formação</b>	<b>Prof/ (Cota) (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>	<b>Litologia</b>	<b>COT (%)</b>
Serra Geral	0 (671)	647	5 ígnea	-
Botucatu	647	85	2 arenito	-
Rio do Rasto	732	668	3 siltito	0,02
Teresina	1400	554	3 siltito	0,04
Serra Alta	1954	127	3 siltito	0,26
Irati com intrusão	2081	76	1 folhelho	1,17
Palermo	2157	123	3 siltito	0,54
Rio Bonito	2280	78	3 siltito	0,3
Itararé	2358	646	3 siltito	0,4
Ponta Grossa	3004	121	3 siltito	0,33
Furnas	3125	138	2 arenito	-
Ivaí	3263	737	6 conglom	-
Embasamento	4000	Gradiente geotérmico 3,77 (°F/100m)		

Fonte: ANP (2014).

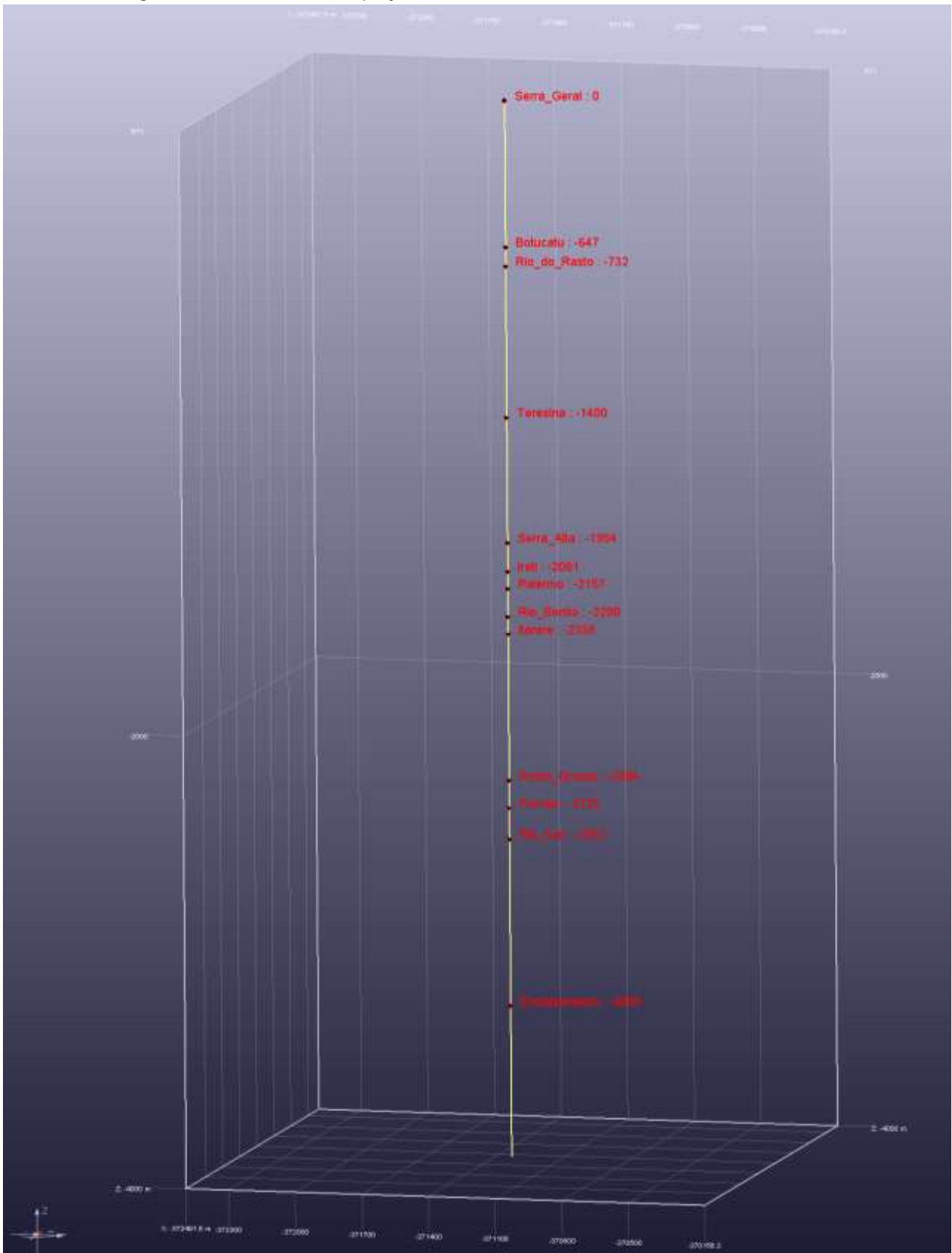
Tabela 15 – Características da Formação Irati no poço 1SE01SC.

<b>1SE01SC Formação Irati</b>	<b>Profundidade Cota do poço (m)</b>	<b>Espessura (m)</b>
Folhelho	2081 (671)	23
Diabásio	2104	20
Folhelho	2124-2157	33

Fonte: ANP (2014).



Figura 33 – Markers do poço 1SE01SC.



Fonte: ANP (2004) e *OpenFlow* (2015).

Figura 34 – Litofácies e Temperatura do poço 1SE01SC.

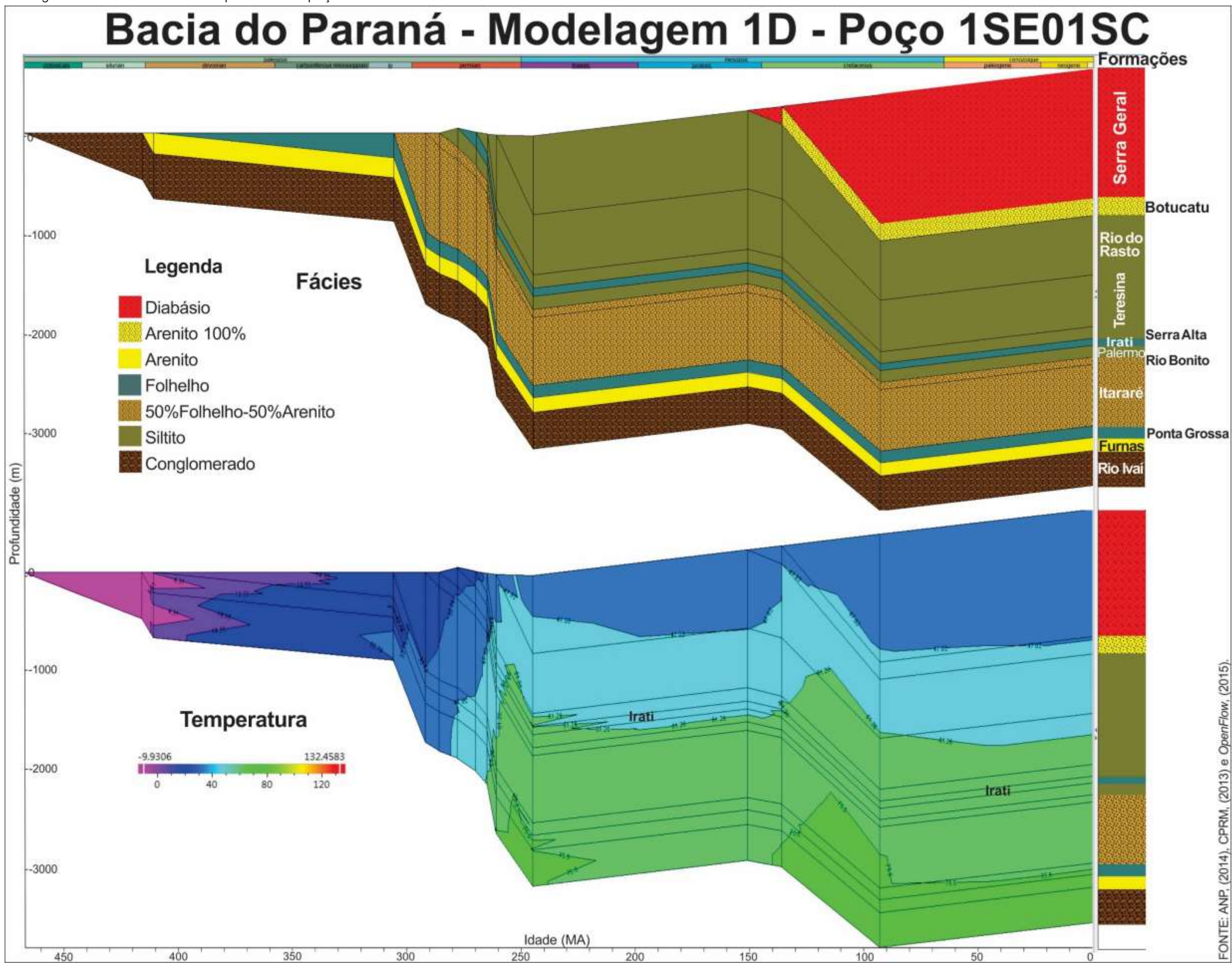




Figura 35 – Gradiente térmico do poço 1SE01SC.

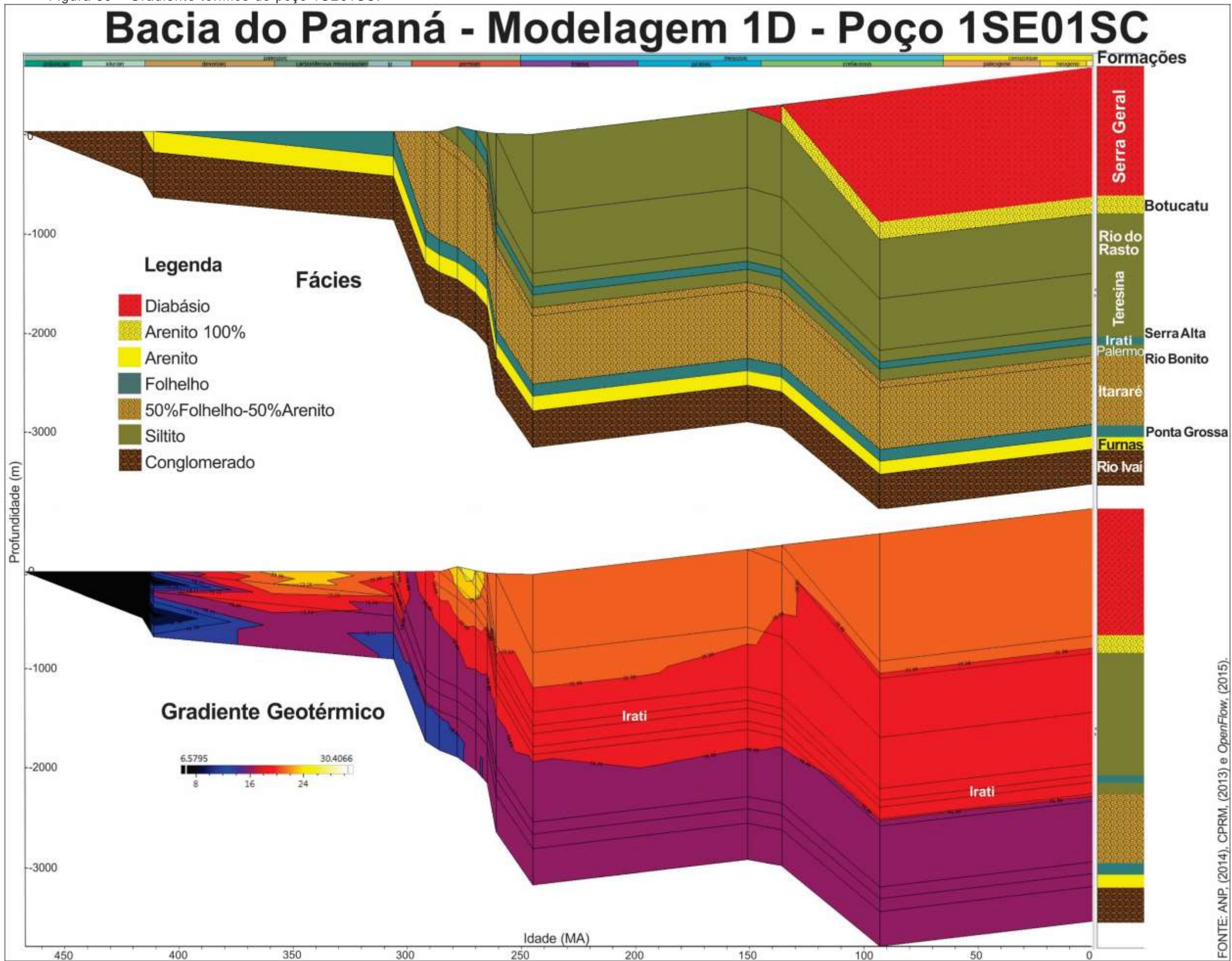




Figura 36 – Fluxo térmico do poço 1SE01SC.

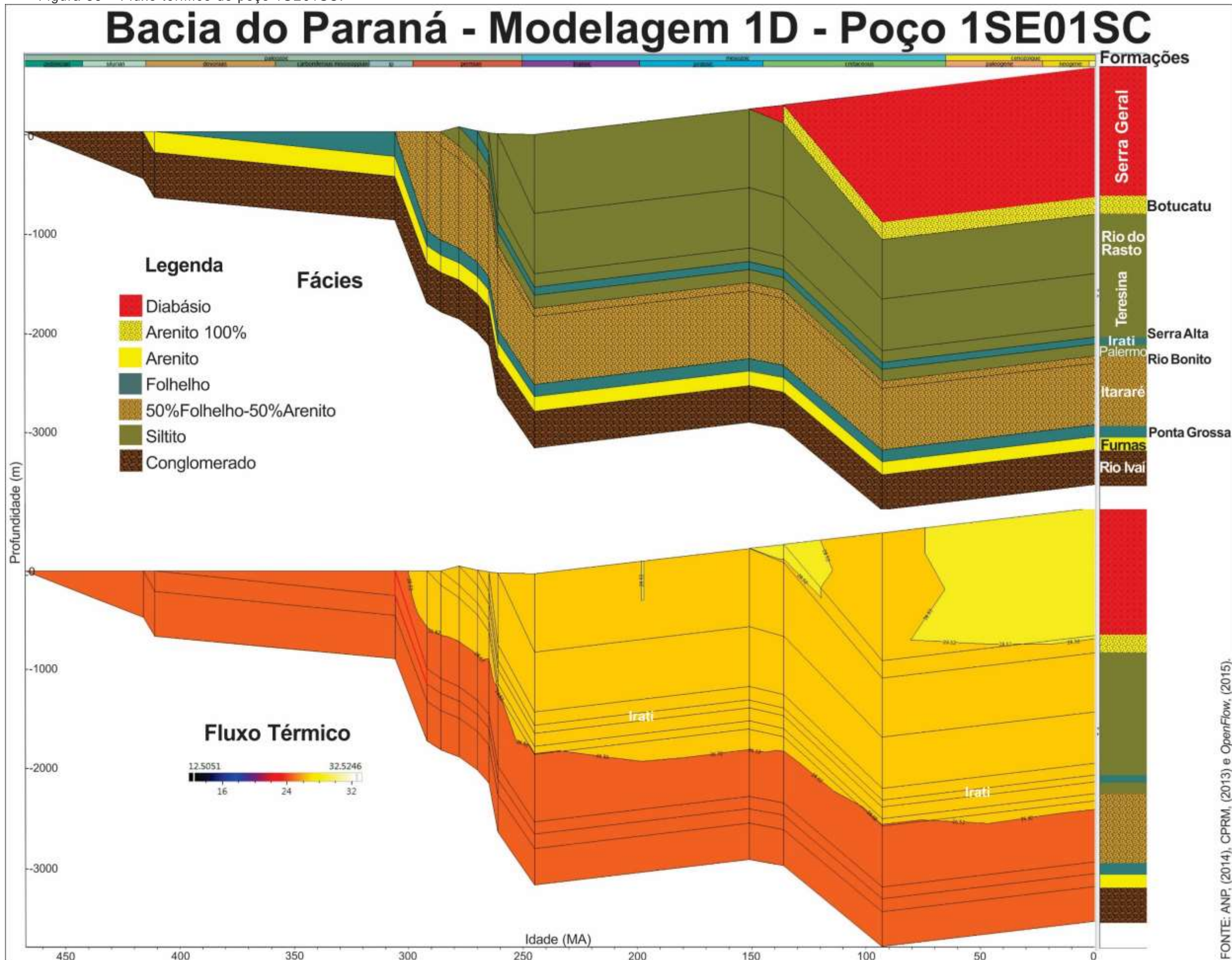




Figura 37 – Refletância de vitrinita do poço 1SE01SC.

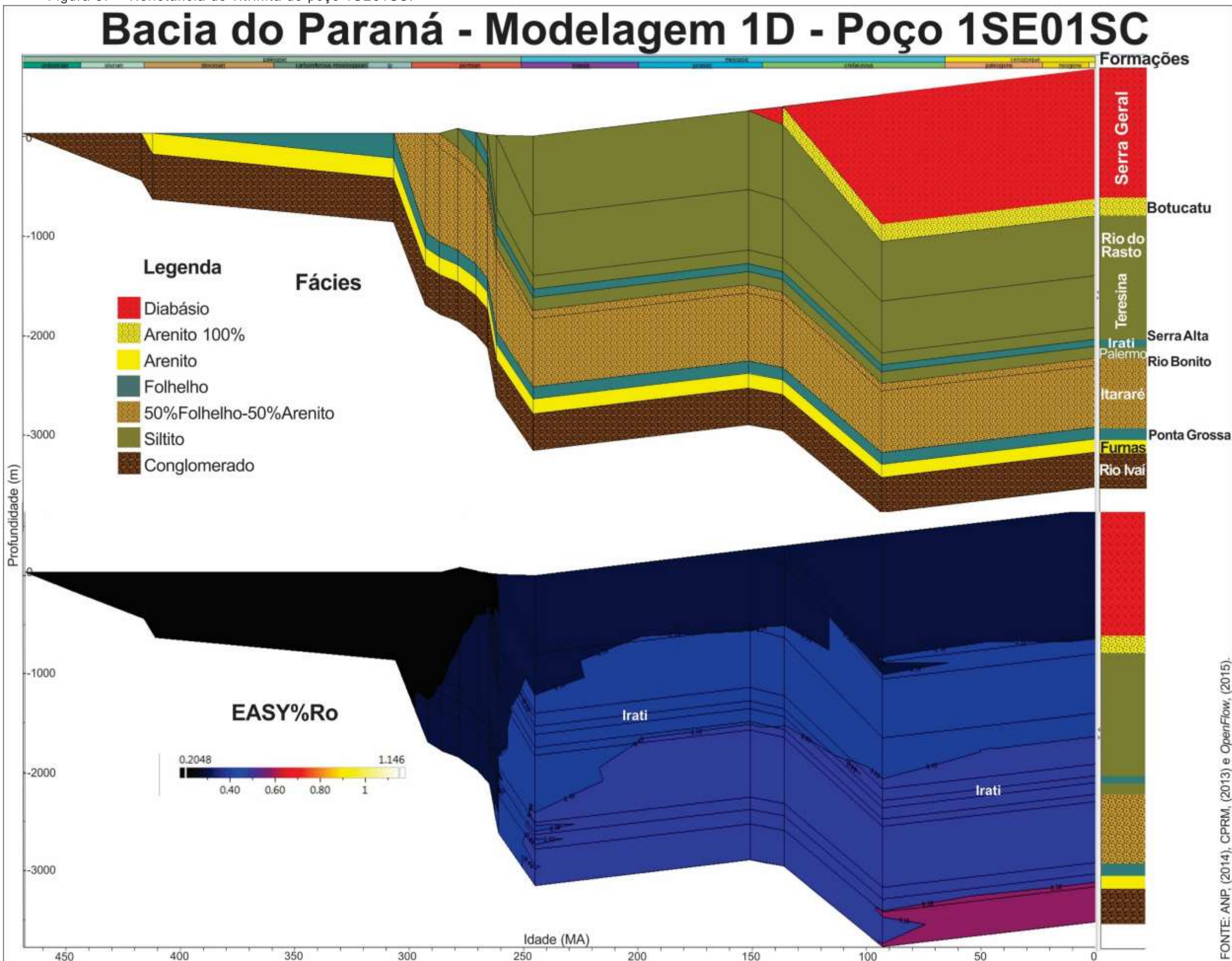
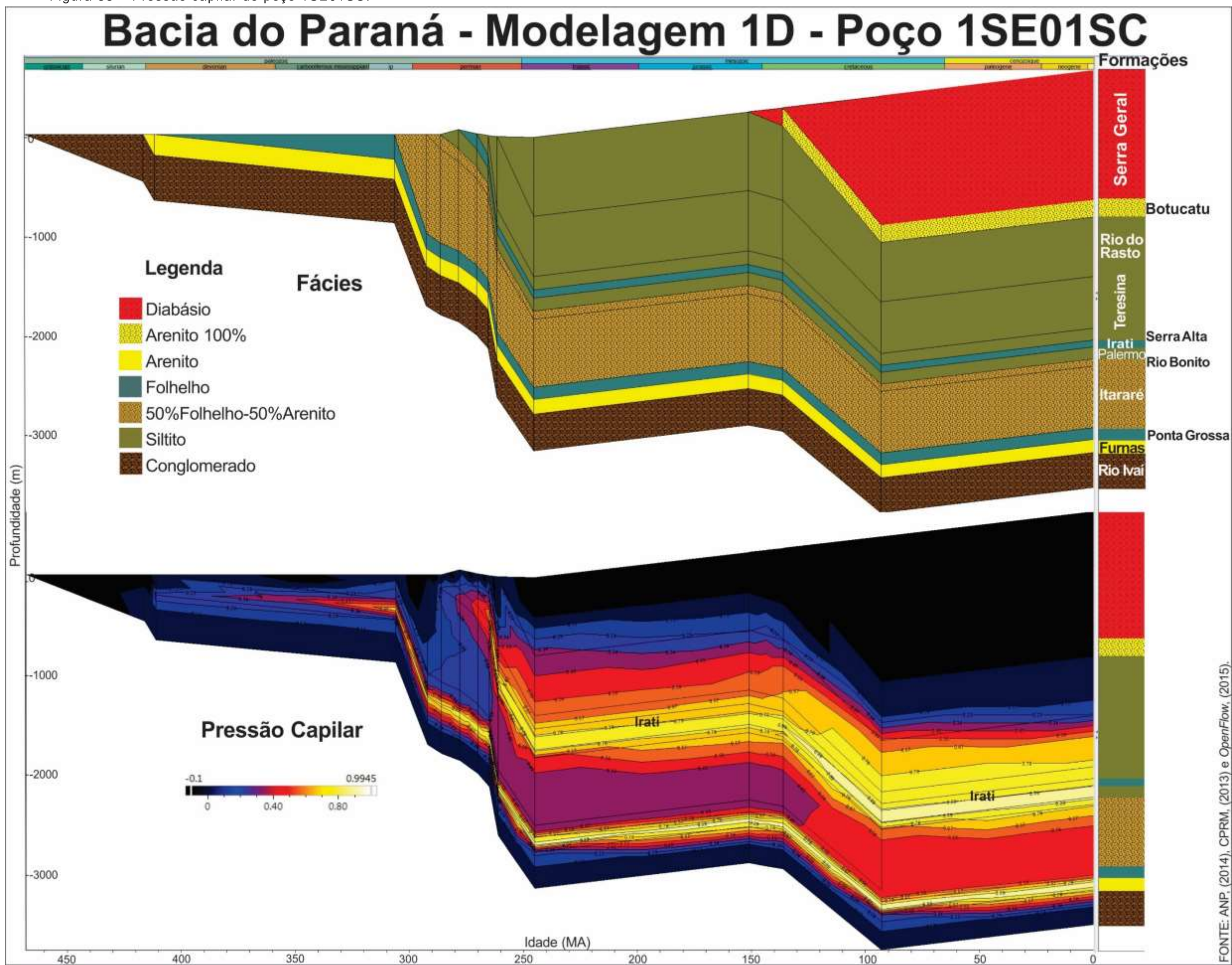




Figura 38 – Pressão capilar do poço 1SE01SC.





### 3.1.5 Conclusões sobre a Modelagem 1D

Em um contexto geral, os resultados da Modelagem 1D estão expressos na Tabela 16, a seguir. Quanto aos parâmetros térmicos da Bacia do Paraná, ou seja, o Gradiente Geotérmico (Figuras 17, 23, 29 e 35) e o Fluxo Térmico (Figuras 18, 24, 30 e 36), esses são condizentes com uma bacia intracratônica, relativamente fria, como é a Bacia do Paraná. Durante quase todo o Permiano e no Devoniano ocorreram anomalias térmicas de superfície, possivelmente em resposta às importantes alterações tectônicas ocorridas no período descritas em Milani *et al.*, (2007). Em Quintas *et al.*, (1999), foram descritos três eventos distensivos, isócronos às anomalias do Gradiente Geotérmico ocorridos na Bacia do Paraná e inferidos pelo programa. O período de maior alteração termal na bacia foi o evento que culminou com o derrame de basalto da Formação Serra Geral, identificado nos parâmetros litológicos/litofácies do programa de modelagem, como uma rocha Ígnea extrusiva. Estes três eventos distensivos principais têm ligação às anomalias inferidas pelo programa, porém como esse não é o escopo deste Estudo, futuros projetos com análises adicionais podem investigar essas questões especificamente.

Tabela 16 – Resultados obtidos pela Modelagem 1D.

Poço	Temperatura (°C)	EASY%Ro	Fluxo Térmico (m/Wm <sup>2</sup> )	Gradiente Geotérmico (°C/Km)	Pressão Capilar
1FR01SC	65	0,5	20	25	Positivo
1GO01SC	80	0,58	19	26	Positivo
1HV01SC	60	0,45	18	25	Positivo
1SE01SC	65	0,5	19	26	Positivo

Fonte: ANP (2014) e OpenFlow (2015).

A reconstrução do histórico de Temperatura e a Temperatura atual são valores cruciais para a avaliação do potencial petrolífero de uma bacia sedimentar, tendo em vista que esse valor é o mais sensível parâmetro relacionado à geração de hidrocarbonetos (GAUTHIER, 2010). Os resultados de Temperatura sugerem um estágio imaturo de geração de óleo até a zona de catagênese, onde é possível a geração de óleo para o folhelho gerador da Formação Irati. Nos poços 1FR01SC (Figura 16), 1HV01SC (Figura 28) e 1SE01SC (Figura 34) a temperatura não ultrapassou os 68°C, situados na zona imatura/catagênese de geração de óleo. No poço 1GO01SC (Figura 22), a Formação Irati entrou na janela de geração de óleo, segundo os resultados da Modelagem 1D. Devido a esse resultado é plausível ter ocorrido geração de óleo na área por via convencional. No entanto, apesar de poços

próximos conterem indícios de óleo, o poço 1GO01SC não possui quaisquer indícios de hidrocarbonetos (ANP, 2014). Na Figura 22, ficou evidente o aumento de temperatura pontual, no limite do Jurássico e Cretáceo, causado pelo evento intrusivo que resultou no derrame de basalto da Formação Serra Geral. Esse Resultado também foi verificado nos resultados de Temperatura dos demais poços. Após o evento do derrame basáltico, a temperatura volta aos padrões verificados anteriormente na Bacia do Paraná. O poço 1GO01SC foi o mais afetado pelo derrame da Formação Serra Geral, devido à espessura do derrame ser a maior entre os poços selecionados, com 1244 metros de espessura de basalto na calha do poço e o Gradiente Geotérmico, o Fluxo Térmico e a Temperatura apresentaram alterações dentro do período de tempo do evento magmático.

De acordo com PAULIPETRO (1982), nos poços nas áreas mais profundas na Bacia do Paraná foi possível ter ocorrido geração de óleo na Formação Irati, pois ela atingiu a janela de geração por soterramento. Entretanto, pode ter ocorrido geração de óleo e gás na Formação Irati por via não convencional, por meio da intrusão de diabásio, tendo em vista o poço 1HV01SC, além de outros poços da Bacia do Paraná, que contém indícios de gás, segundo ANP (2014).

A Refletância da Vitritina é o indicador mais utilizado para determinar a maturação térmica (HAUNTSCHHEL & KAUERAUF, 2009). As Figuras 18, 25, 31 e 37 representam os resultados de EASY%Ro, que inserem os poços analisados na zona imatura de geração de óleo e gás à zona madura de geração de óleo, com valores entre 0,45 e 0,58 de acordo com o Diagrama de Maturidade Termal (Anexo D – Figura 56). O poço 1GO01SC apresentou o maior valor de Refletância de Vitritina de 0,58 condizente com os valores mais elevados de Temperatura em comparação com os demais poços que, devido aos baixos valores de Ro, se enquadram na zona imatura e no limite da zona madura marginal.

As forças envolvidas na Pressão Capilar dependem intimamente da porosidade e permeabilidade da rocha, onde as diferentes formas e tamanhos dos poros da rocha reservatório são invadidos pelos fluidos com diferentes valores de Pressão Capilar. Em um sistema petrolífero convencional, os poros maiores são preenchidos primeiro, enquanto uma pressão maior é necessária para preencher os poros menores da rocha reservatório (HAUNTSCHHEL & KAUERAUF, 2009). Na rocha geradora, os fluidos e gases adsorvidos são efetivamente contidos dentro dos poros e fraturas pelas forças exercidas pela Pressão Capilar, que pode chegar a



exercer milhares de Pa (*Pascal* - Pa). Durante a vida útil e mesmo após a depleção do poço, essas forças podem perdurar por tempo indeterminado (BYRNES, 2011). No caso do *Shale Gas*, os dados de Pressão Capilar podem denotar a presença de compartimentos dentro do pacote sedimentar que criam condições de selo para que o hidrocarboneto seja retido parcialmente na geradora (GARCIA, 2014). Essas forças colaboram para que o hidrocarboneto gerado, que permaneceu na rocha geradora, na ausência de processos migratórios, seja contido e permaneça no local de geração. Os resultados de Pressão Capilar (Figuras 17, 23, 29 e 35) sugerem um contexto positivo para acumulação de *Shale Gas* nos poços estudados. Nesses casos, as fácies arenosas fornecem uma espécie de compartimentação no pacote sedimentar do poço em que o hidrocarboneto gerado pode ficar adsorvido ou livre nos poros de menor dimensão das fácies argilosas, devido à diferença de tensão entre as fácies. Foi possível identificar nos resultados dos poços estudados a compartimentação em torno da Formação Irati e a presença de formações com capacidade selante para esse tipo de acumulação, favorecendo a adsorção parcial do óleo e gás nas fraturas e na microporosidade da geradora. Os dados de Pressão Capilar do poço 1HV01SC sugerem uma zona de maior pressão, que a partir do Permiano, pode ter retido o hidrocarboneto no folhelho da Formação Irati, considerando que a outra importante geradora da Bacia do Paraná, a Formação Ponta Grossa está ausente no poço em questão. Diferentemente do poço 1SE01SC, em que o resultado sugere duas zonas/compartimentos distintas, uma para cada geradora principal da bacia, as Formações Irati e Ponta Grossa.

Concluiu-se então, a partir dos resultados da Modelagem 1D, que no geral há pouca probabilidade de geração de hidrocarbonetos de forma convencional e economicamente viável na área avaliada, tendo em vista os dados de maturação térmica. Todavia os valores de COT e profundidade são propícios para acumulações de *Shale Gas*. No caso da geração de hidrocarbonetos por via não convencional, a partir do calor cedido pelas intrusões de diabásio, ocorridas praticamente em todo o pacote sedimentar da Bacia do Paraná durante o Cretáceo (PAULIPETRO, 1982), tal geração é plausível, tendo em vista a extensa ocorrência dessas intrusões nos poços analisados. A vasta bibliografia que aborda o assunto concluiu o mesmo, e dentre estas, se destacam Araújo *et al.*, 2000; Corrêa 2004 e 2007; Goulart & Jardim 1982; Milani *et al.*, 1990a, 1990b e 1992; PAULIPETRO 1982; Souza *et al.*, 2008, dentre outros importantes estudos sobre o caso.