

## Variações paleoclimáticas no estado do Rio de Janeiro com base no método geotérmico

Bruna N. Cerrone\* e Valiya M. Hamza, OBSERVATÓRIO NACIONAL, Brasil

Copyright 2003, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-18 September 2003.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of The 8<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and does not necessarily represents any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction, or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

Geothermal investigations carried out in 39 localities have been employed for extracting information about the paleoclimate. The procedure adopted consists of comparing observed temperature data against theoretical profiles based on downward propagation of climate perturbations in a conducting medium. The models of climate changes assume that perturbations were either abrupt or linear.

The results obtained indicate that a general warming event has occurred in all localities. The magnitude of this climate change is in the range of 0.4 a 5,4<sup>o</sup>C, which seem to have taken place over the last century. The results were also used in preparing maps of climate perturbations of the recent past. These maps indicate that warming event is relatively more intense in the eastern and western parts compared to the central region of the state of Rio de Janeiro.

The nature of regional scale climate processes responsible for such geographic pattern is unknown. However, maps of land use and vegetation cover as well as standard climate maps reveal patterns that are very similar to those observed in geothermal climate change maps.

### Introdução

Resultados de estudos realizados em diversas áreas de Geociências indicam que o clima da Terra sofreu mudanças significativas desde sua formação como um planeta. Os processos oriundos do interior da Terra também contribuíram para mudanças climáticas durante os tempos geológicos. Contudo, a grande parte das mudanças climáticas são induzidas pela atividade solar (Hansen and Lebedeff, 1987). Como exemplo vimos o surgimento de fenômenos tais como o El Niño e o processo de aquecimento global (conhecido como 'Efeito Estufa') A reconstrução da história climática anterior ao período de dados instrumentais (cerca de dois séculos) é geralmente efetuada com base em métodos indiretos. A intensidade, a duração e a velocidade com que estas mudanças se deram no passado, bem como suas causas, ainda não são bem conhecidas.

A distribuição de temperaturas em profundidades relativamente pequenas na crosta da Terra é afetada tanto pelo regime térmico como também pelo fluxo de calor proveniente do interior da Terra. A parcela do calor solar retida na superfície é cerca de duas ordens de grandeza maior do que o fluxo geotérmico. Conseqüentemente as variações de temperatura que ocorrem na superfície afetam as camadas do subsolo. Desta forma, as variações de

temperatura associada às variações climáticas também penetram as camadas subsuperficiais. A velocidade de propagação depende da difusividade térmica do solo e a amplitude da perturbação decresce com a profundidade. Como resultado, os sinais térmicos das mudanças paleoclimáticas encontram-se no campo geotérmico atual das camadas próximas à superfície (Birch, 1948). O regime térmico em subsuperfície apresenta tipicamente uma zona rasa onde predominam os efeitos de oscilações térmicas de curto período, tais como as diárias e as sazonais. Em profundidades intermediárias, são encontradas perturbações oriundas de variações climáticas. Abaixo disso predomina o efeito do fluxo de calor terrestre, conforme a figura 1.

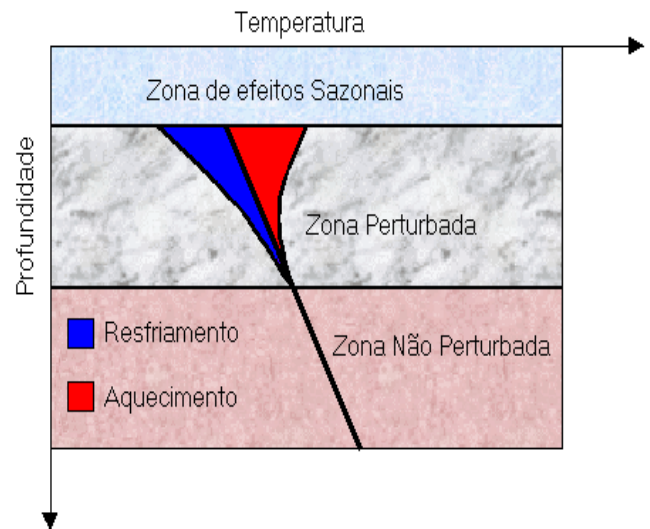


Figura 1- Figura esquemática do campo térmico em subsolo na presença de variações na temperatura da superfície. Mostra-se a zona de perturbações climáticas e efeitos de esfriamento e aquecimento.

No presente trabalho procura-se mostrar a natureza das mudanças climáticas ocorridas no último século com base em análise de dados de perfilagens térmicas. Utilizamos registros de 39 poços distribuídos em 2 regiões, interiores e costeiras.

### Modelo de perturbação climática

Uma maneira simples para extrair sinais de perturbações climáticas de dados de perfilagens térmicas, quando consideramos as condutividades térmicas constantes, é remover o efeito do gradiente geotérmico local.

As temperaturas residuais calculadas desta maneira são funções da profundidade dadas por:

$$T_R(z) = T(z) - [T_0 + g z] \quad (1)$$

onde  $z$  é a profundidade,  $T_0$  é a temperatura na superfície e  $g$  o gradiente térmico.

Para quantificar a recente variação climática na superfície da Terra supomos que ela possa ser

representada por uma relação de potência em tempo (Lachenbruch and Marshall, 1986):

$$v(0, t) = D \left( t / t^* \right)^{n/2} \quad (2)$$

onde  $t^*$   $t$  o tempo decorrido (ou seja, a idade da perturbação climática),  $D$  a magnitude da perturbação na superfície e  $n$  é um parâmetro que determina a forma de variação climática.

Para a condição inicial:  $v(z, t) = 0$  a solução de  $v$  no tempo  $t = t^*$  é dada por (Carslaw e Jaeger, 1959):

$$v(z) = D 2^n \Gamma(n/2 + 1) i^n \operatorname{erfc} \left( z / \sqrt{4 \alpha t^*} \right) \quad (3)$$

onde  $\Gamma$  é a função gama,  $i^n \operatorname{erfc}$  representa a  $n$ ésima integral da função erro complementar e  $\alpha$  a difusividade térmica do meio geológico. As curvas teóricas referentes à solução acima foram ajustadas à perturbação observada no perfil geotérmico pelo método dos mínimos quadrados. Incluindo a temperatura na superfície e o gradiente térmico estimados, o número total de parâmetros para cada solução é seis. A idade e a magnitude do evento climático variam sobre uma escala de valores que abrangem a solução. São calculadas as somas dos desvios quadrados entre a temperatura residual e a temperatura transiente. O melhor ajuste corresponde ao menor valor da soma dos desvios.

#### Avaliação do gradiente térmico

Na determinação do gradiente geotérmico foram adotados dois métodos: método CVL (Conventional) e o método CBT (Conventional Bottom Temperature). O método convencional de ajuste linear por mínimos quadrados foi utilizado nos casos onde era possível identificação de intervalos de casualidade com aumento linear de temperaturas. Na presença de efeitos térmicos de advecção de calor por movimentos de fluidos, seja no poço ou na formação, a aplicação do método convencional tornou-se inviável. Nestes casos, uma estimativa do gradiente foi calculada utilizando a temperatura do fundo do poço e a temperatura média anual da superfície. Este é um método variante do método BHT (Bottom Hole Temperature) utilizado geralmente nos estudos geotérmicos em poços de petróleo.

#### Análise de perfis térmicos

Adotou-se o seguinte procedimento na análise de perfis térmicos:

1ª – Escolha do intervalo de profundidade onde os efeitos das perturbações climáticas estão ausentes. Os dados deste intervalo são utilizados para a determinação do gradiente geotérmico local. Como exemplo ilustrativo apresenta-se na figura(2) o perfil térmico do poço Frigosan, em Saquarema (RJ). Neste caso o gradiente foi determinado por método de mínimos quadrados utilizando dados do intervalo de 86 a 116 metros. A interpolação deste gradiente permitiu a determinação de temperatura média anual da superfície não afetada por variações paleoclimáticas.

2ª – Eliminação do efeito do fluxo geotérmico na distribuição de temperaturas. Calcula-se para esta finalidade a temperatura residual, como a diferença entre a temperatura observada e o efeito do gradiente térmico local. O perfil residual que permanece refere-se ao efeito das variações da temperatura na superfície. Apresenta-

se na figura (3) um exemplo ilustrativo de perfil de temperatura residual.

3ª – Análise comparativa do perfil residual de temperatura e as curvas teóricas do modelo de propagação de perturbações térmicas. O processo de ajuste de curvas teóricas inclui simulações numéricas, a partir de suposições a respeito da forma como ocorre a variação climática e a idade do evento climático. Um exemplo deste ajuste é ilustrado na figura (3), onde as curvas teóricas foram calculadas com base na equação (3).

Foram utilizados dois modelos de mudanças climáticas: (1) variação abrupta ( $n = 0$ ) e (2) variação linear ( $n = 2$ ).

As incertezas experimentais no registro da temperatura e a ausência de dados a respeito das propriedades térmicas das formações geológicas encontradas nas perfurações freqüentemente dificultaram a escolha entre esses dois modelos. Desta forma, tornou-se difícil a obtenção de informações sobre a forma exata com que se deu a variação climática.

#### Resultados

Os resultados dos ajustes destes modelos aos dados observados são apresentados na tabela (1). Com base nos resultados de ajustes foram elaborados mapas em escala regional das variações climáticas no estado do Rio de Janeiro. Apresenta-se na figura (4) resultados do modelo supondo que as variações climáticas ocorreram de forma abrupta. O mapa indica que ocorreram aumentos de temperatura da superfície, na faixa de 0,4 a 3,8°C nos últimos 100 anos. Nas partes leste e oeste do estado as magnitudes das variações climáticas estão na faixa de 2 a 3,8°C, enquanto na parte central do estado a perturbação é relativamente menor, na faixa de 0,4 a 1,8°C.

Resultados do modelo supondo que as variações climáticas ocorreram de forma linear são apresentados no mapa da figura (5). Comparando com o resultado do mapa anterior, nota-se que as feições gerais das perturbações são semelhantes. Contudo as magnitudes das perturbações são maiores (na faixa de 0,5 a 5,4°C). Os modelos indicam que a magnitude de perturbação climática é menor na região central do estado.

O significado destas observações pode ser compreendido comparando as perturbações climáticas com mapas que ilustram informações sobre o uso do solo e da cobertura vegetal e mapas de normais climatológicas. Como exemplo ilustrativo apresenta-se na figura (6) o mapa elaborado por análise de imagem de satélite (LandSat-TM) pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Apresenta-se, ainda, na figura (7) mapa de normais climatológicas referentes a médias anuais de 1960 a 1990, obtidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

#### Conclusão

Neste trabalho efetuou-se uma análise de dados geotérmicos no estado do Rio de Janeiro, a fim de extrair informações quantitativas sobre variações paleoclimáticas ocorridas nos últimos séculos.

Com base nos resultados obtidos, foi possível alcançar as seguintes conclusões:

- Todos os locais analisados apresentaram evidências de aquecimento climático;

- As magnitudes obtidas nas simulações de mudança abrupta estão na faixa de 0,4 a 3,8 °C e, nas simulações de mudança linear, entre 0,5 e 5,4°C;
- As idades das mudanças climáticas ficaram entre 10 e 80 anos e entre 15 e 130 anos para variações abruptas e para as lineares, respectivamente;
- Há indícios de que as perturbações climáticas observadas possuem dois componentes: variações em escala global e variações induzidas em escala local por mudanças na vegetação e uso do solo;
- As feições regionais nos mapas de mudanças climáticas, inferidas pelo método geotérmico no presente trabalho, apresentam semelhanças com aquelas observadas nas imagens de satélite e nos mapas de normais climatológicas.

#### Agradecimentos

Os recursos computacionais para conclusão desse trabalho foram obtidos através de recursos concedidos

pela Fundação Amparo a Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ (Processo nº E-26/150.954/99)

#### Bibliografia

**Birch, F.**, 1948, The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients, Am. J. Sci., Nº 246, p729–760.

**Carslaw, H. S., Jaeger, J. C.** Conduction of heat in solids. 2<sup>nd</sup> ed. Clarendon Press, Oxford. 1959.

**Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais** (www.cprm.gov.br)

**Hansen, J., and Lebedeff,**1987, Global trends of measured surface air temperatures., J. Geophys. Res., Vol 92, p13, 345-13, 372.

**Instituto Nacional de Meteorologia** (www.inmet.gov.br)

**Lanthenbruch, A. H., Sass, J. H., Marshall, B. V.**,1986, Changing climate: geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic: Science, Vol. 234, Nº 7, p689-696. November.

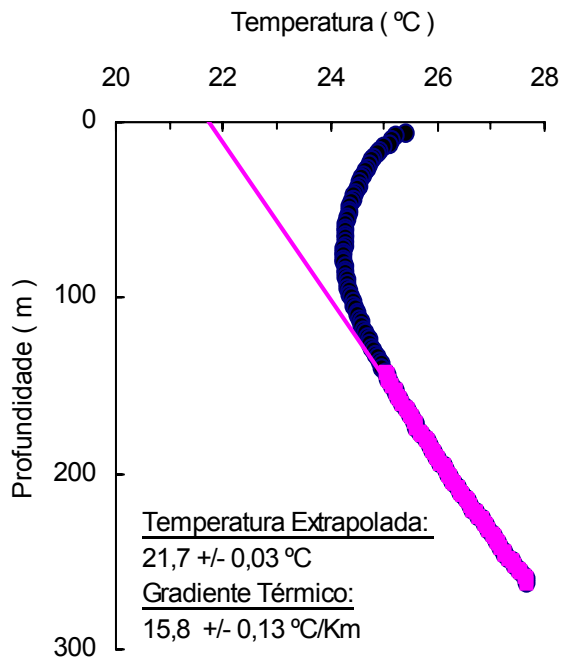


Figura 2 – Perfil térmico do poço Frigosan, localizado no município de Saquarema. Os pontos representam os dados observados. A linha contínua mostra o regime térmico na ausência de perturbação climática, obtido por ajuste linear.

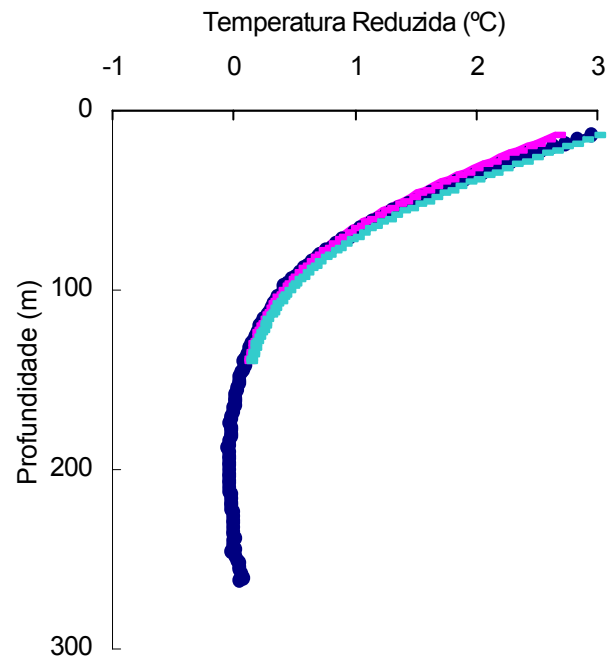


Figura 3 – Ajuste teórico aos dados do poço Frigosan, Saquarema. Os pontos representam a temperatura residual. As curvas contínuas indicam temperaturas residuais previstas pelos modelos teóricos para perturbações climáticas.

Tabela 1 – Resultados

Os parâmetros utilizados são:  $g$ , que representa o gradiente;  $T_0$  a temperatura superficial obtida por ajuste linear;  $DT$ , a magnitude da variação climática durante o tempo  $t$ .

Região	Id. Poço	$g$ (°C/Km)	$T_0$ (°C)	Variação Abrupta			Variação Linear		
				$DT$ (°C)	Variância (K)	$t$ (anos)	$DT$ (°C)	Variância (K)	$t$ (anos)
Costeira	MP1	9,1	23,3	0,6	0,00	10	0,8	0,00	15
	MP2	10,3	23,5	0,4	0,00	10	0,6	0,00	15
	MP3	8,2	23,5	1,2	0,07	20	1,4	0,07	35
	NP2	14,2	22,8	2,4	0,02	20	3,8	0,01	20
	FRIGOSAN	15,8	22,5	1,8	0,01	15	2,4	0,01	25
	BV1	27,4	24,7	3,8	0,04	10	5,4	0,05	15
	CJ1	21,3	23,0	3,4	0,28	25	4,0	0,41	45
	UENF	18,3	23,9	1,8	0,05	15	2,0	0,05	25
	CP3	31,6	22,0	3,4	0,21	30	3,8	0,36	55
Interior	MV	24,7	21,1	3,0	0,22	35	3,6	0,35	65
	CT	19,0	23,5	2,6	0,14	25	3,0	0,21	50
	JG	17,2	22,5	3,4	0,18	40	4,2	0,28	70
	LM	5,0	23,8	2,4	0,13	25	2,8	0,06	40
	OF	20,4	23,0	2,6	0,03	20	3,8	0,03	30
	PT	20,5	21,5	3,6	0,06	35	5,0	0,07	55
	LP	22,5	21,7	3,4	0,06	65	4,0	0,12	120
	HMS	23,5	21,8	3,6	0,02	80	4,2	0,02	145
	DBP1	14,9	20,8	1,6	0,02	20	1,8	0,02	40
	DBP2	14,9	21,0	1,4	0,01	15	1,6	0,01	30
	DBP3	17,0	20,6	1,0	0,02	20	1,2	0,02	40
	DBP4	16,3	20,8	2,0	0,03	15	2,2	0,01	30
	VBP1	7,3	23,5	1,4	0,02	25	1,6	0,01	45
	VBP2	8,5	23,5	1,8	0,11	40	2,0	0,17	85
	VBP3	9,4	23,5	1,0	0,01	10	1,4	0,01	15
	BC2	15,5	17,4	2,2	0,08	30	2,6	0,10	50
	FVM	20,9	16,8	2,6	0,04	60	3,0	0,13	110
	PMBI	15,3	18,5	0,8	0,02	10	1,0	0,01	15
	BOA5	9,4	23,5	1,8	0,01	20	2,4	0,02	40
	XEROXP2	16,5	22,0	1,6	0,11	40	1,8	0,08	75
	COOP1	32,7	23,0	2,8	0,07	10	3,0	0,08	20
	DM	25,7	22,7	2,4	0,06	10	3,4	0,08	15
	PT	39,0	20,0	3,4	0,17	20	4,6	0,19	30
PJ	14,3	21,4	2,6	0,07	15	4,2	0,04	20	
MP	16,1	21,0	2,0	0,03	20	2,8	0,04	30	
CA	10,6	23,1	0,4	0,02	35	0,6	0,02	45	
SP1	8,6	21,4	0,8	0,00	5	0,6	0,00	15	
SP3	34,5	21,0	3,8	0,19	25	5,0	0,23	40	
SP4	0,7	24,6	1,6	0,02	15	2,2	0,03	25	
MB	12,1	21,7	1,4	0,02	20	1,8	0,03	30	

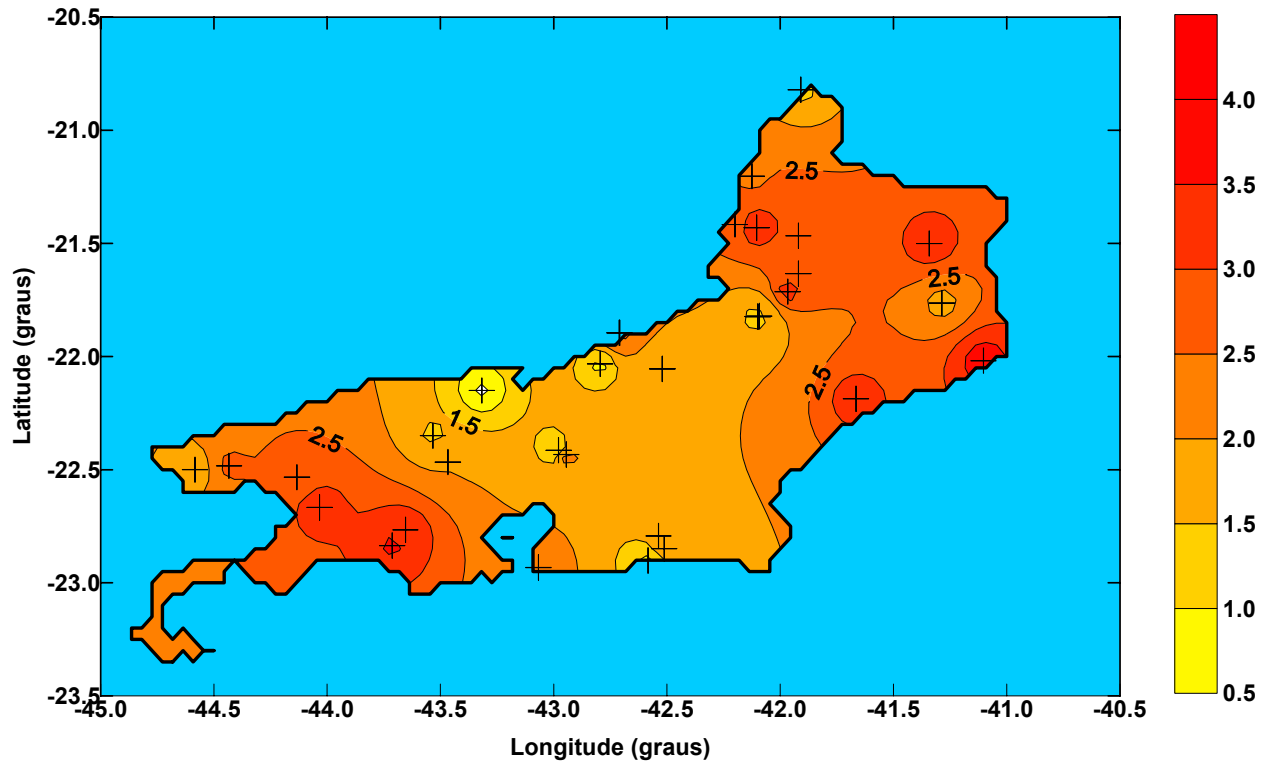


Figura 4 – Mapa da magnitude da perturbação climática inferida a partir do modelo de mudança abrupta. As curvas de isovalores estão em unidades de graus centígrados.

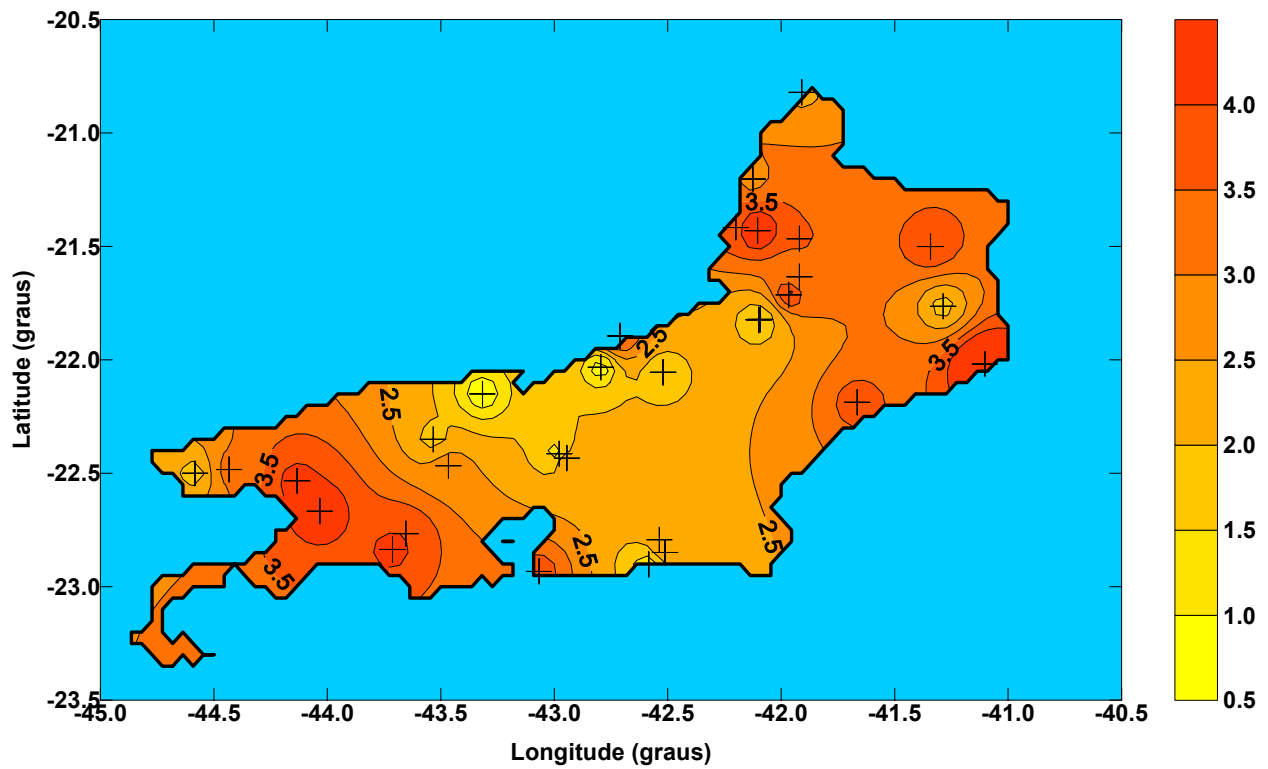


Figura 5 – Mapa da magnitude da perturbação climática inferida a partir do modelo de mudança linear. As curvas de isovalores estão em unidades de graus centígrados.

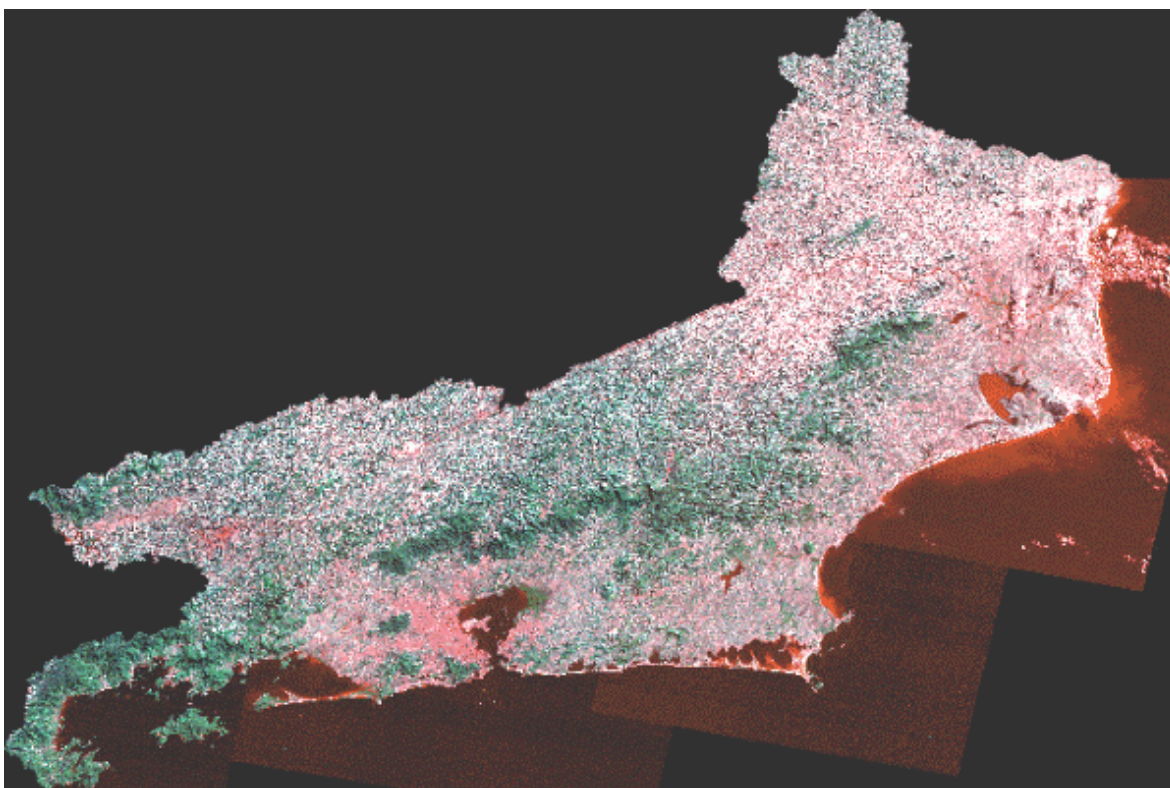


Figura 6 - Mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal do estado, obtido através de análise de imagem do satélite LandSat-TM (Fonte: CPRM).

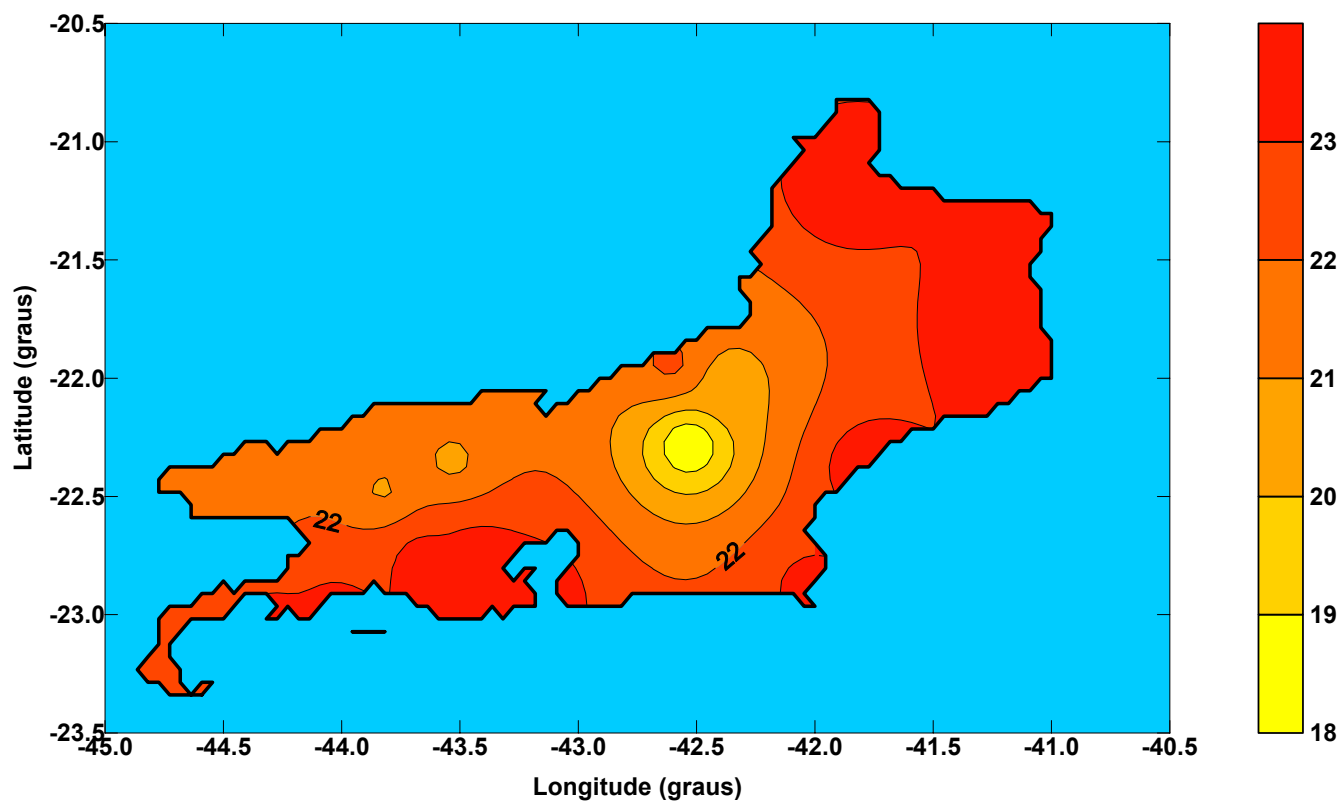


Figura 7 – Mapa dos Normais climatológicos referentes a médias anuais do período de 1960 a 1990 (Fonte: INMET). As curvas de isovalores estão em unidades de graus centígrados.