

Sismicidade Induzida por Reservatórios: histórico, características básicas e alguns casos monitorados pelo IPT

Fis. Luis Carlos Ribotta

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo



A cidade e o reservatório de Paraibuna-Paraitinga

outubro.2013

1. Origem dos sismos → **SIR**
2. Breve histórico de SIR
3. SIR no Brasil
4. Casos estudados pelo IPT
5. O mecanismo da geração de SIR
6. Características básicas de SIR
7. Monitoramento sismológico



Paraibuna-Paraitinga, SP
Jaguari, SP
Capivara, SP/PR
Itá, SC/RS
Machadinho, SC/RS
Barra Grande, SC/RS
Campos Novos, SC
Salto Pilão, SC

escorregamento

origem dos sismos

naturais

- tectônicos
- vulcânicos
- colapsos ou desabamentos

megaeventos !! →

produzidos pelo homem

controlados

- explosões
- ruídos cultural

induzidos

- minas subterrâneas
- injeção de fluídos
- exploração de fluído
- **reservatórios**

SIR – Sismicidade Induzida por Reservatórios

STR – Sismicidade Triguerada por Reservatórios

breve histórico da sismicidade induzida

1º → Hoover; Lago Mead 1930 5 m_b

Hsinfengkiang	China	1962	6,1
Kariba	África	1963	6,2
Kremastra	Grécia	1966	6,2
Koyna	Índia	1967	6,3
Oroville	EUA	1975	5,7
Marathon	Grécia	1938	5,7
Aswan	Egito	1981	5,6

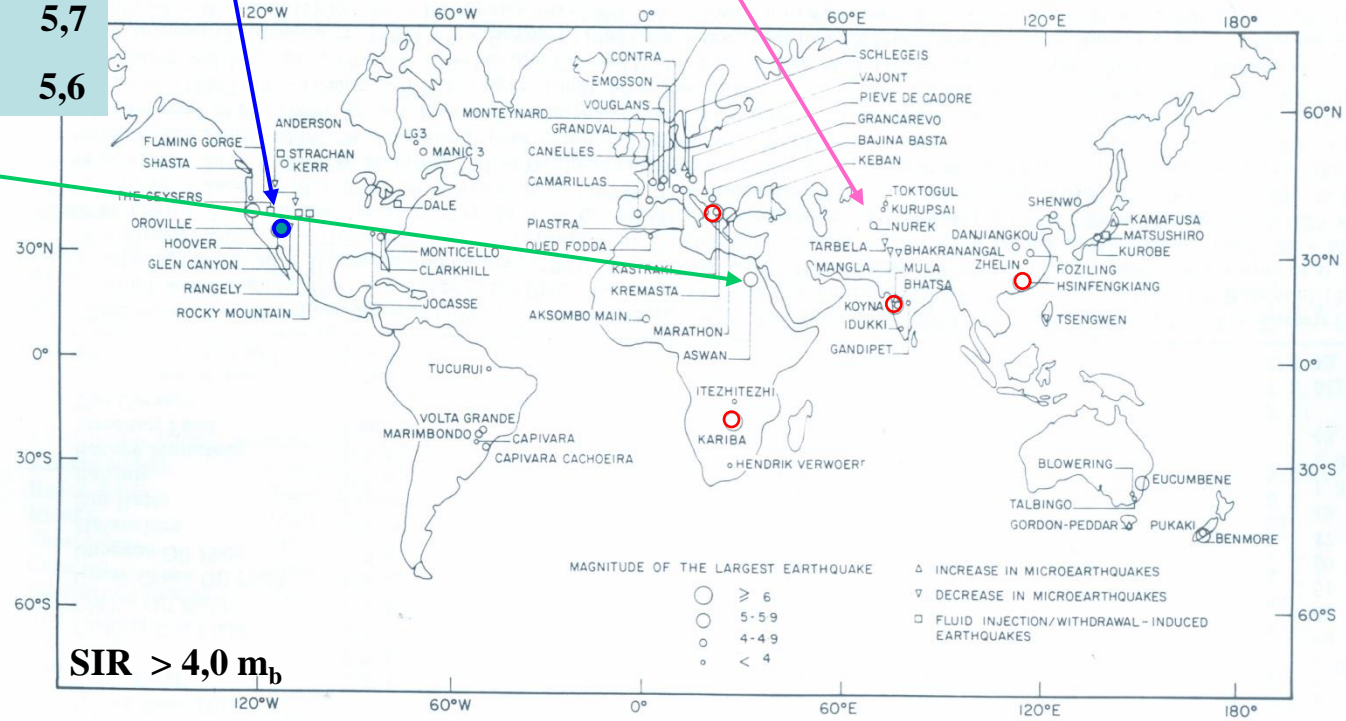


17 anos

distribuição

4	> 6
6	5 – 5,9
28	4 – 4,9
53	< 4
16	duvidosos

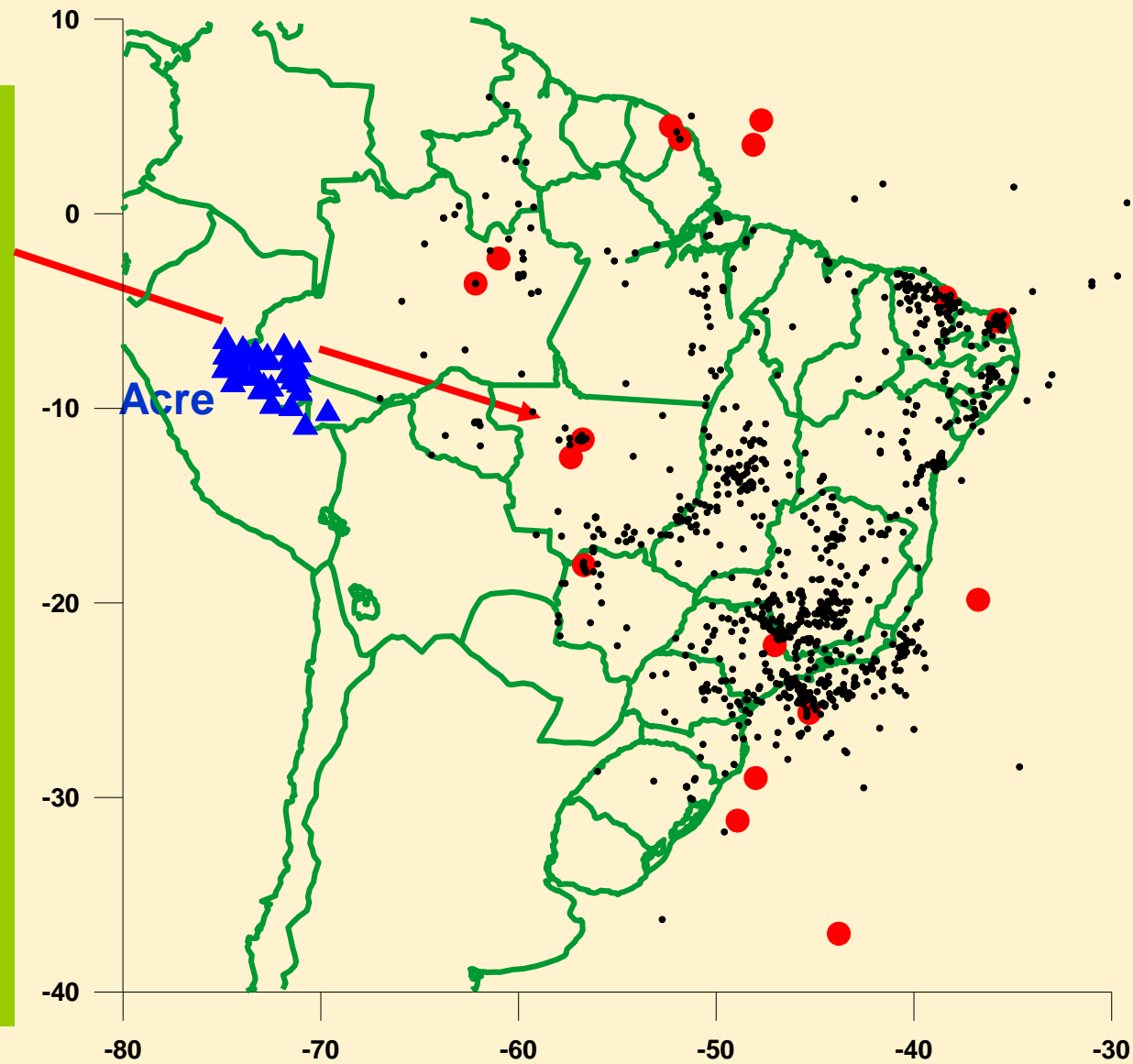
(Gupta, 2002)



sismicidade natural no Brasil

5

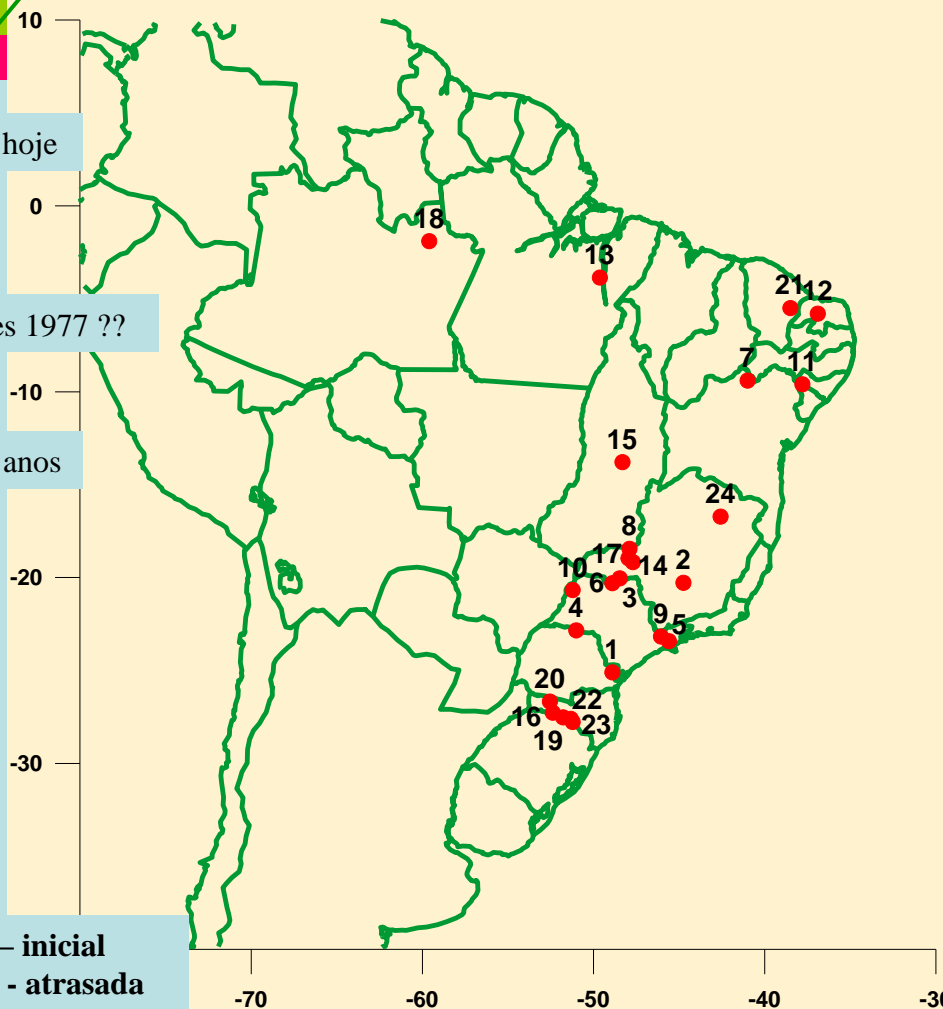
Nº	data	M	local	ES
1	27.01.1922	5,1	Mogi Guaçu	SP
2	28.06.1939	5,5	Tubarão	SC
3	31.01.1955	6,2	Sa. Tombador	MT
4	17.09.1949	5,0	Iapoque	AP
5	01.03.1955	6,1	Frente Vitória	ES
6	14.12.1963	5,1	Manaus	AM
7	13.02.1964	5,4	NW do MS	MS
8	07.11.1969	5,0	Atlântico	
9	20.11.1980	5,2	Pacajus	CE
10	05.08.1983	5,5	Codajás	AM
11	30.11.1986	5,1	João Câmara	RN
12	10.03.1989	5,0	João Câmara	RN
13	12.02.1990	5,2	Mg. Continental	RS
14	10.03.1998	5,2	Pto. Gaúchos	MT
15	12.04.1998	5,3	Mg. Continental	AP
16	23.03.2005	5,0	Pto. Gaúchos	MT
17	08.06.2006	5,2	Caiena	AP
18	20.08.2007	5,7	F. de Noronha	BR
19	31.10.2007	5,2	Plf. Continental	AP
20	23.04.2008	5,2	São Vicente	SP



sismicidade induzida no Brasil

primeiro caso
 raso; 16 anos
 o maior sismo

Nº	reservatório	data	m _R	h	tipo
1	Capivari-Cachoeira, PR	mai.1971	2,8	54	i
2	Carmo do Cajuru, MG	jan.1972	3,7	20	d
3	Porto Colômbia, MG	fev.1974	4,2	40	i
4	Capivara, PR	jun.1976	3,7	55	id
5	Paraibuna-Paraitinga, SP	jan.1977	3,4	88	i até hoje
6	Marimondo, MG/SP	jul.1978	2,0	86	i
7	Sobradinho, BA	jul.1979	2,0	41	i
8	Emborcação, MG/GO	mai.1984	2,0	154	i
9	Jaguari, SP	dez.1985	3,0	53	d antes 1977 ??
10	Três Irmãos, SP	nov.1990	< 0,5 (*)	46	i
11	Xingó, SE/AL	jul.1994	2,0	110	i
12	Açu, RN	ago.1994	3,0	33	d > 7 anos
13	Tucuruí, PA	mar.1998	3,6	90	id
14	Nova Ponte, MG	mai.1998	4,0	132	id
15	Serra da Mesa, GO	jun.1998	2,2	134	i
16	Itá, SC/RS	dez.1999	2,5	125	i
17	Miranda, MG	mai.2000	3,3	82	id
18	Balbina, AM	mai.2001	3,7	35	id
19	Machadinho, SC/RS	set.2001	1,8	128	i
20	QuebraQueixo, SC	mar.2003	< 0,1 (*)	67	i
21	Castanhão, CE	???.2004	1,4	60	id
22	Barra Grande, SC/RS	jul.2005	2,5	186	i
23	Campos Novos, SC/RS	out.2005	1,8	166	i
24	Irapé, MG	mai.2006	3	200	i

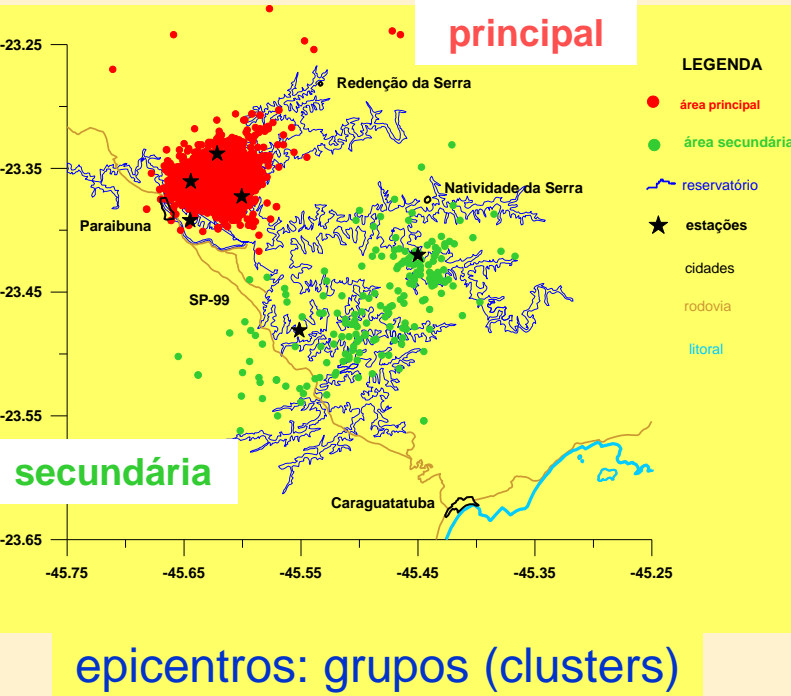


(*) ~ 20 microeventos - assísmico

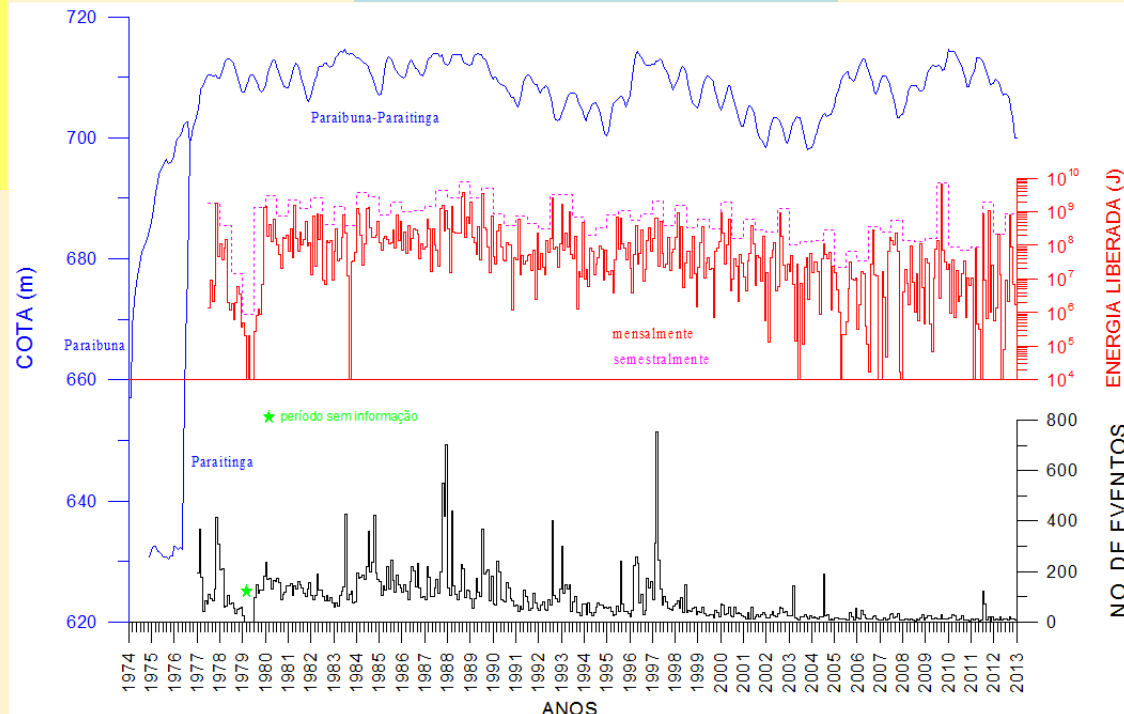
Algumas características:

- magnitude moderada a pequena
 - 3 - Porto Colômbia, MG → o maior 4,2 m_R
- nenhum caso provou danos materiais sérios em construções sólidas
- alguns: pequenos danos e trouxeram preocupações à população local
- predominam os casos tipo inicial (menos de 3 anos após o enchimento do lago)
- 2 casos foram do tipo atrasado
 - 2 - Carmo Cajuru, MG
 - 12 - Açu, RN
 - 9 - Jaguari, SP → duvidoso !!

- existem alguns casos de sismicidade cíclica
 - 4 - Capivara, SP/PR
 - 5 - Paraibuna-Paraitinga, SP
 - 22 - Barra Grande, SC/RS
 - 23 - Campos Novos, SC
- distribuídos em todo o território brasileiro
- ocorreram em barragem baixas e altas
- não houve correlação
 - entre a altura das barragens, o volume do reservatório e os valores das magnitudes dos maiores sismos
 - com a variação da sismicidade natural
 - com a geologia
- 22 casos em ~ 380 barragens → ~ 6 %



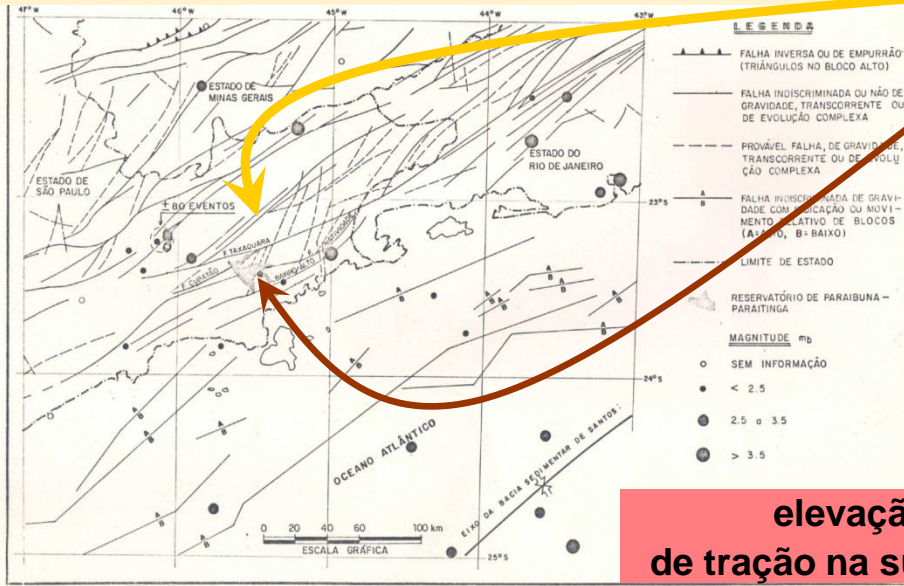
distribuição temporal



Nº	mgt	I	h
37419	3,4	IV	5
523	3,4	?	2

Distribuição temporal mensal do número de eventos, energia liberada e nível do reservatório para a área sísmica principal de Paraibuna-Paraitinga

falhas regionais, transcorrentes e NE
Cubatão, Taxaquara, Natividade



na área de Parabuna tensões residuais

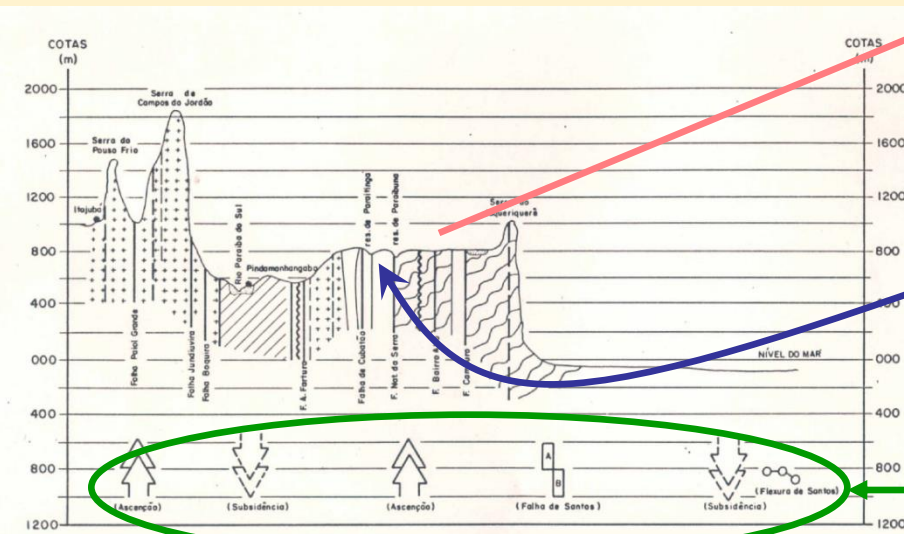
relaxamento dos maciços durante a escavação do túnel da tulipa

mecanismo focal (1979) mostra que as direções dos esforços não eram nas direções SW-NE

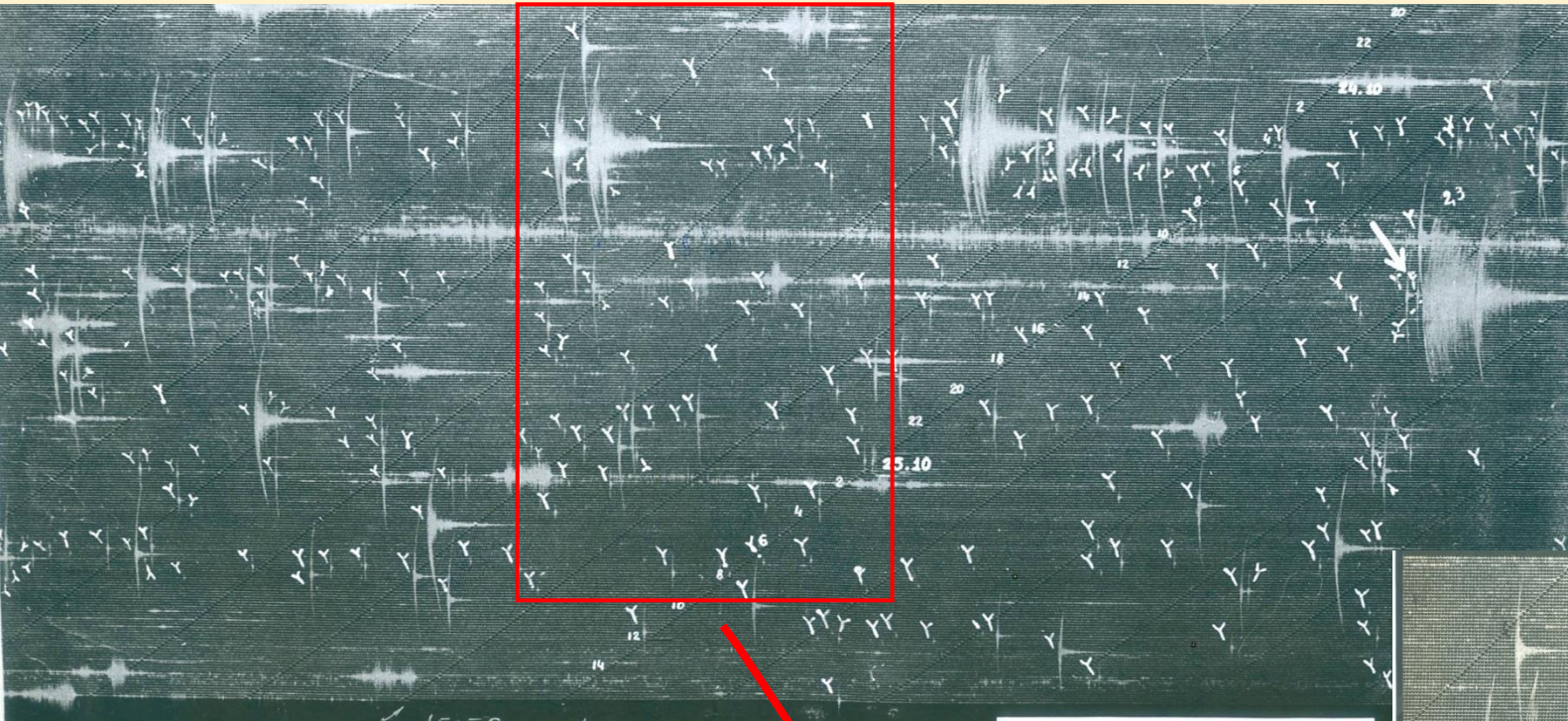
elevação da Serra do Mar cria esforços de tração na superfície e seriam nas direções NW-SE

não vinculado com as grandes estruturas

o rio Paraitinga atualmente está erodindo o seu próprio cascalho no fundo → soergimento



existem evidências de movimentos ascencionais relacionadas com a evolução das bacias sedimentares Taubaté, Santos



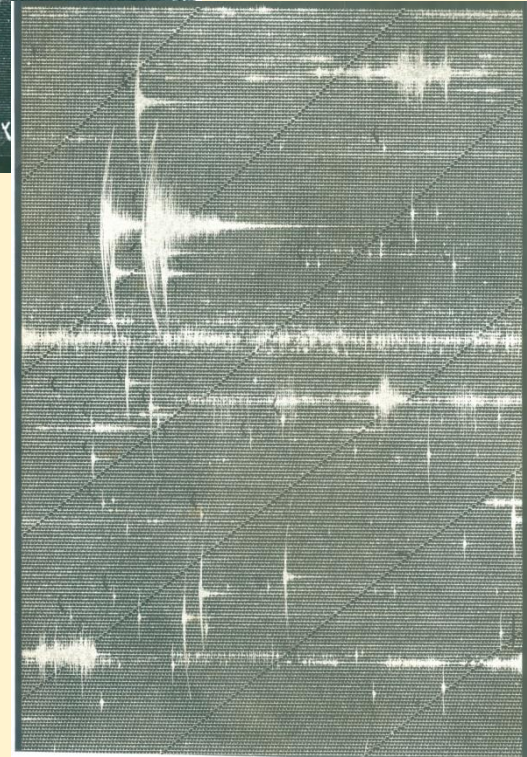
enxame

310 eventos

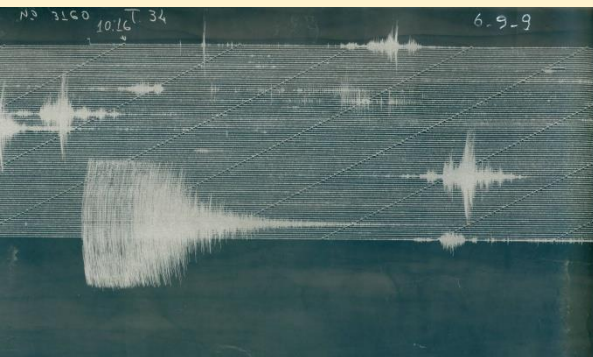
o maior $\rightarrow 2,3 m_R$

vários outros com $\sim 1,4 m_R$

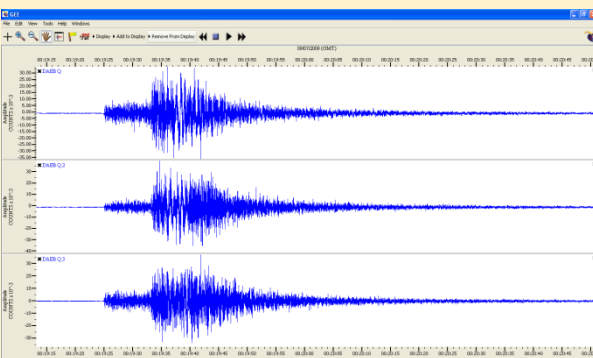
2 dias de registro



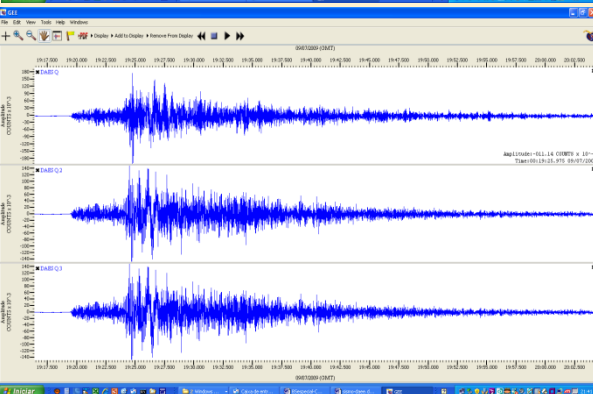
sismos ocorrendo na forma de “enxames”



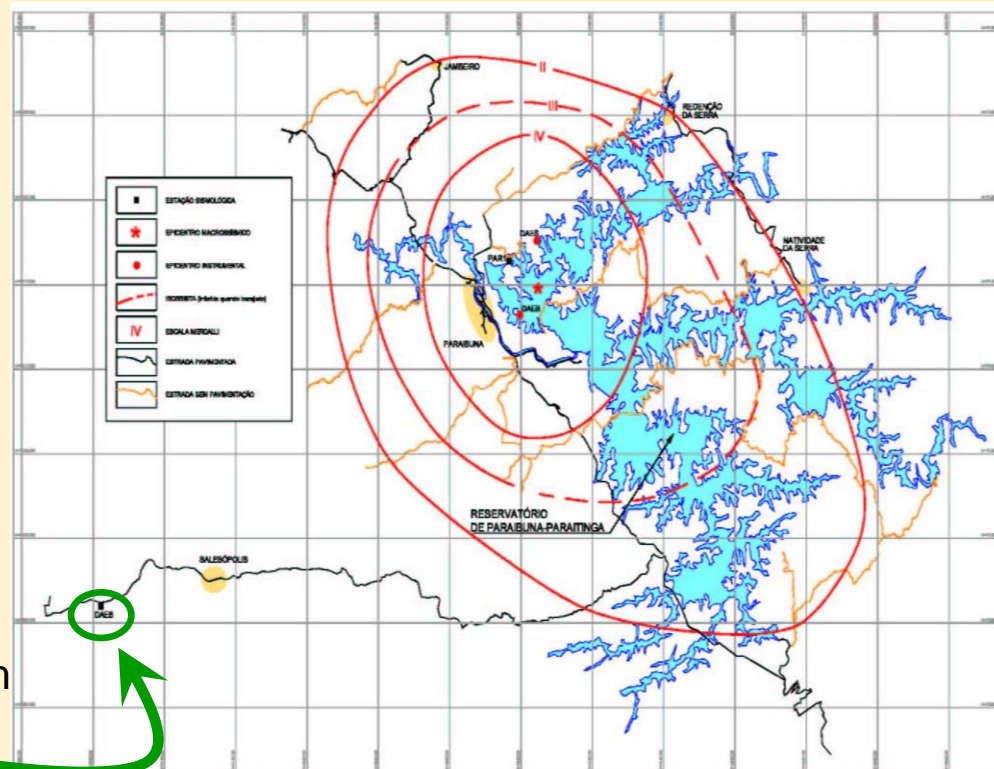
△
PAR1 – 5 km



DAES – 45 km



DAEB – 65 km

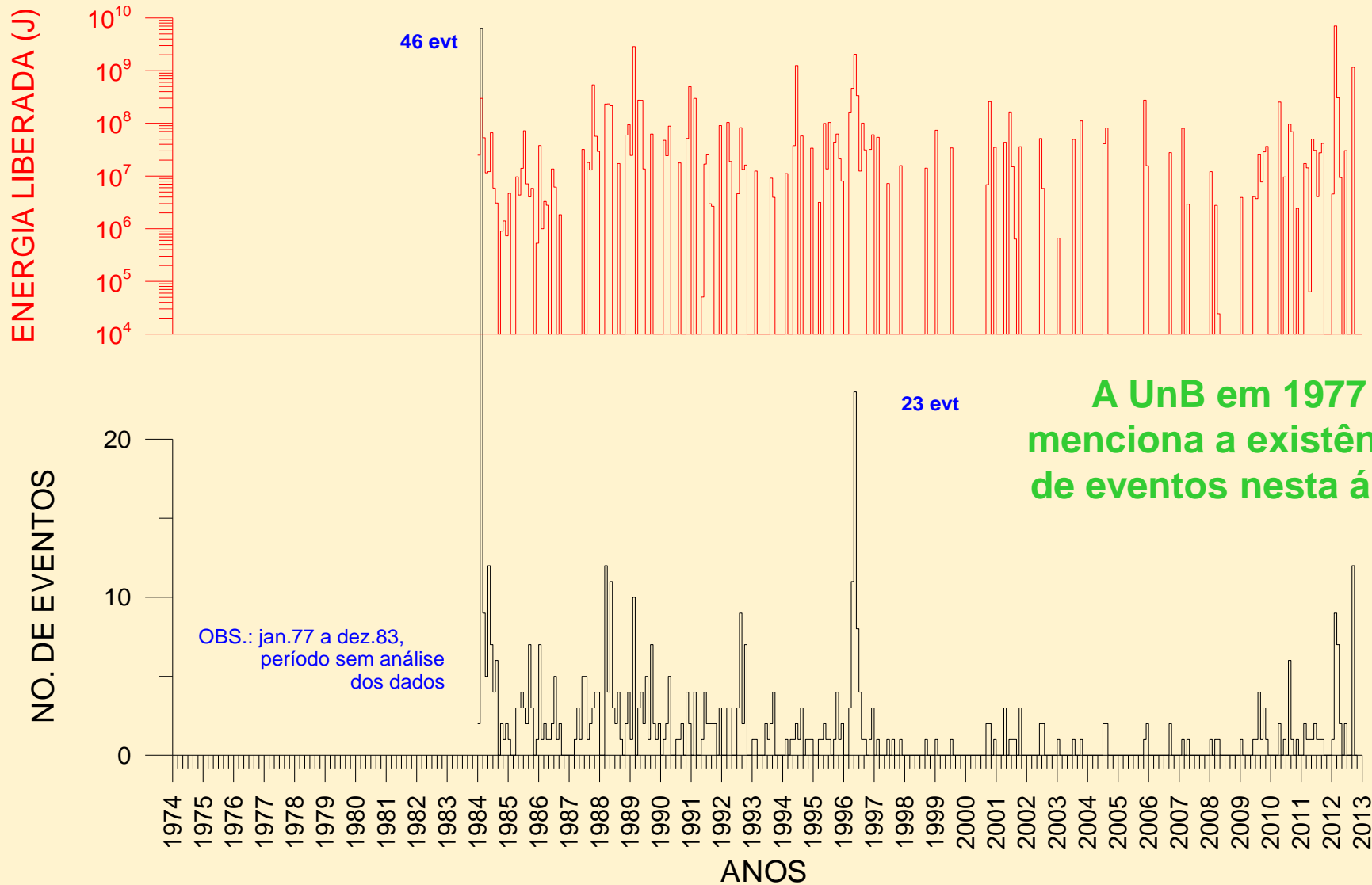


área { II (afetada)
IV } → magnitude

epicentro

instrumental e macrossísmico

Parâmetros
 06.09.2009
 20:19 – HL
 h < 5 km
 3,4 m_R
 IV MM
 0,01 g
 930 km²

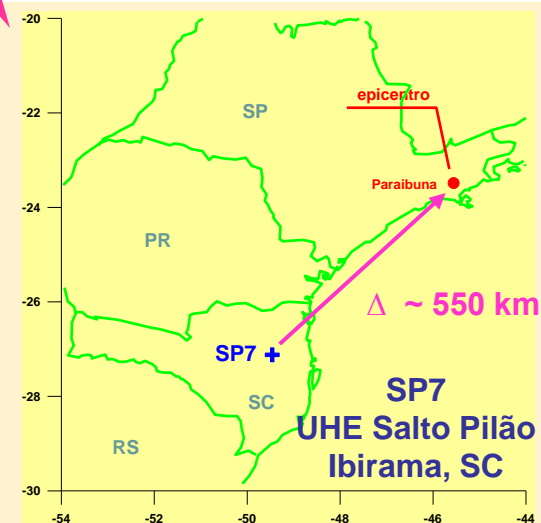
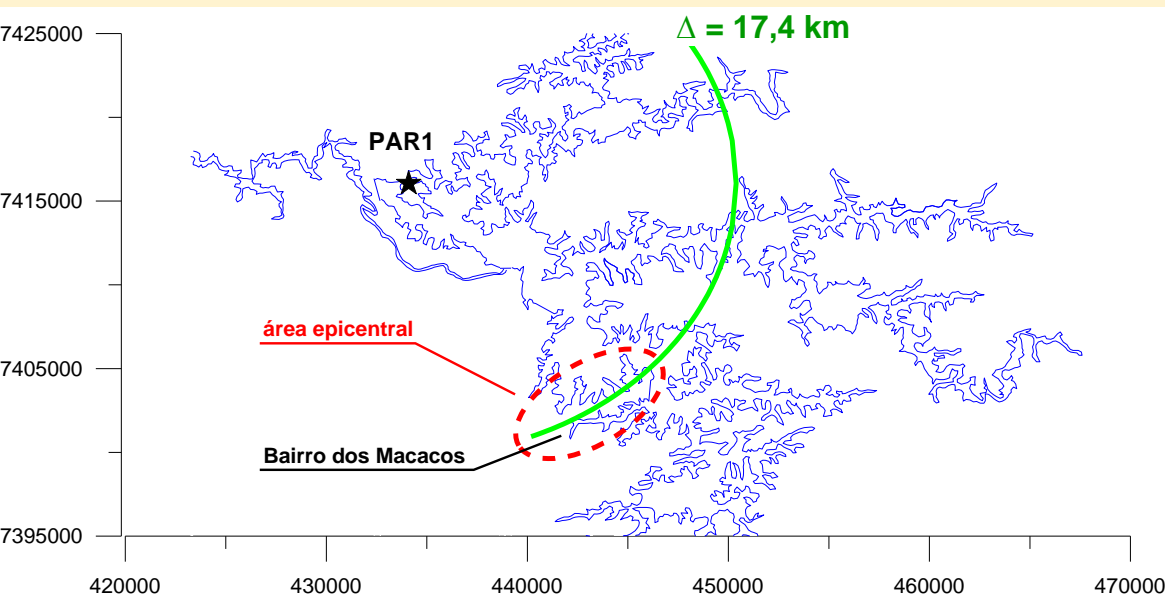
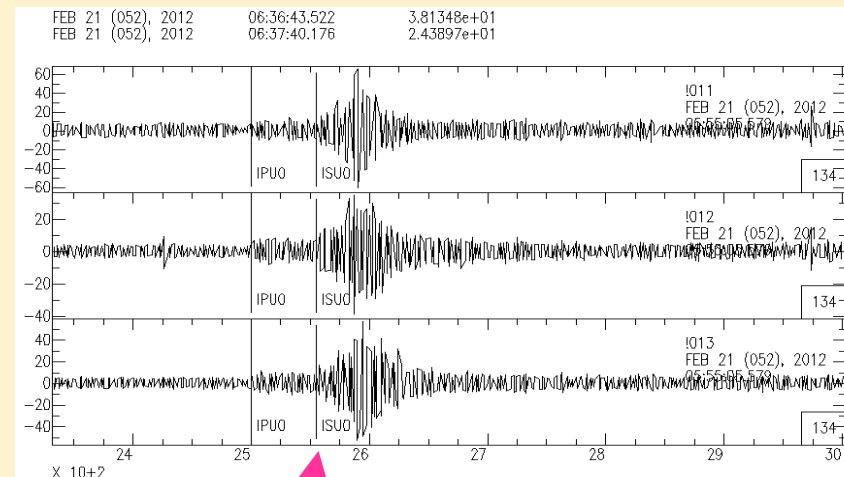
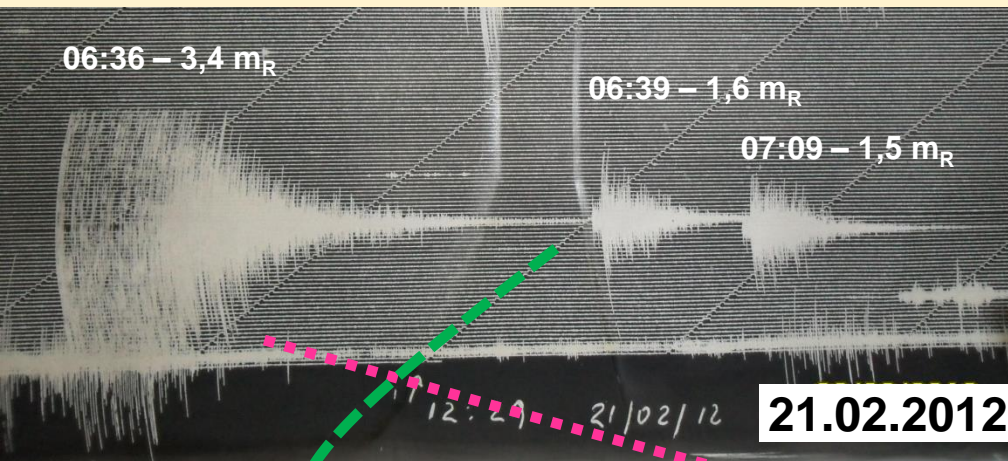


Distribuição temporal mensal do número de eventos e energia liberada para a área sísmica secundária de Paraibuna-Paraitinga

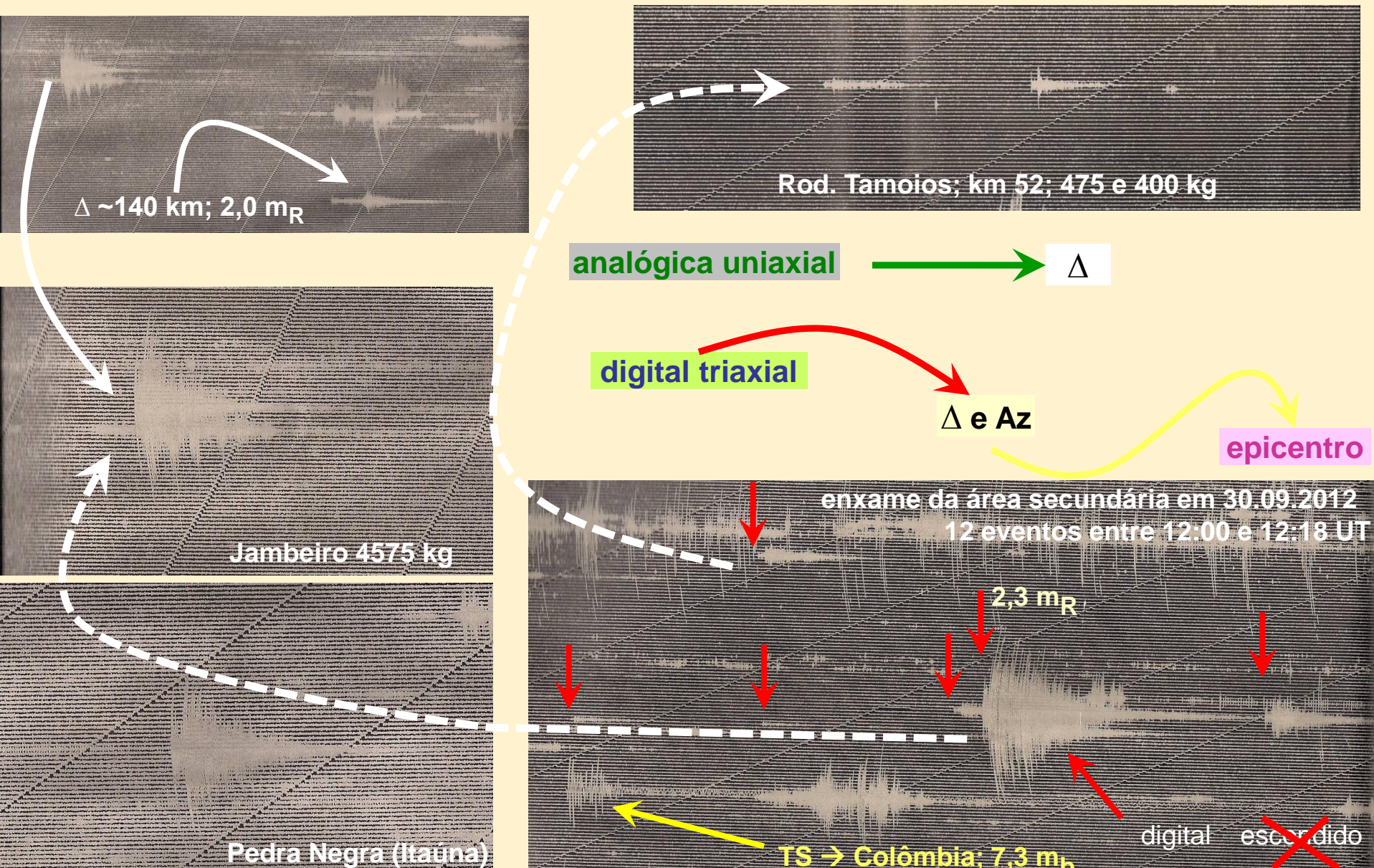
evento sentido - secundária

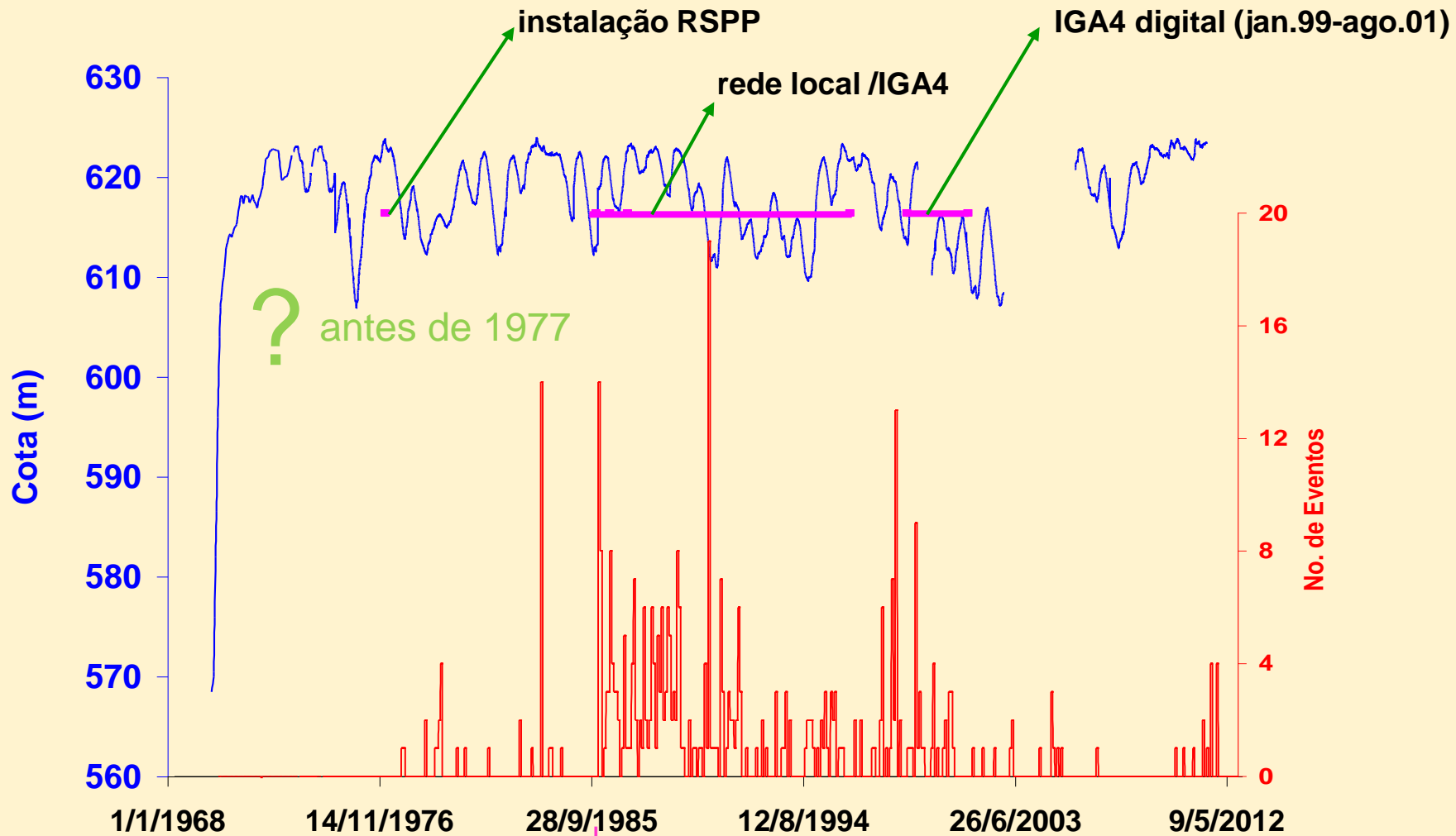
5 - Paraibuna-Paraitinga

14



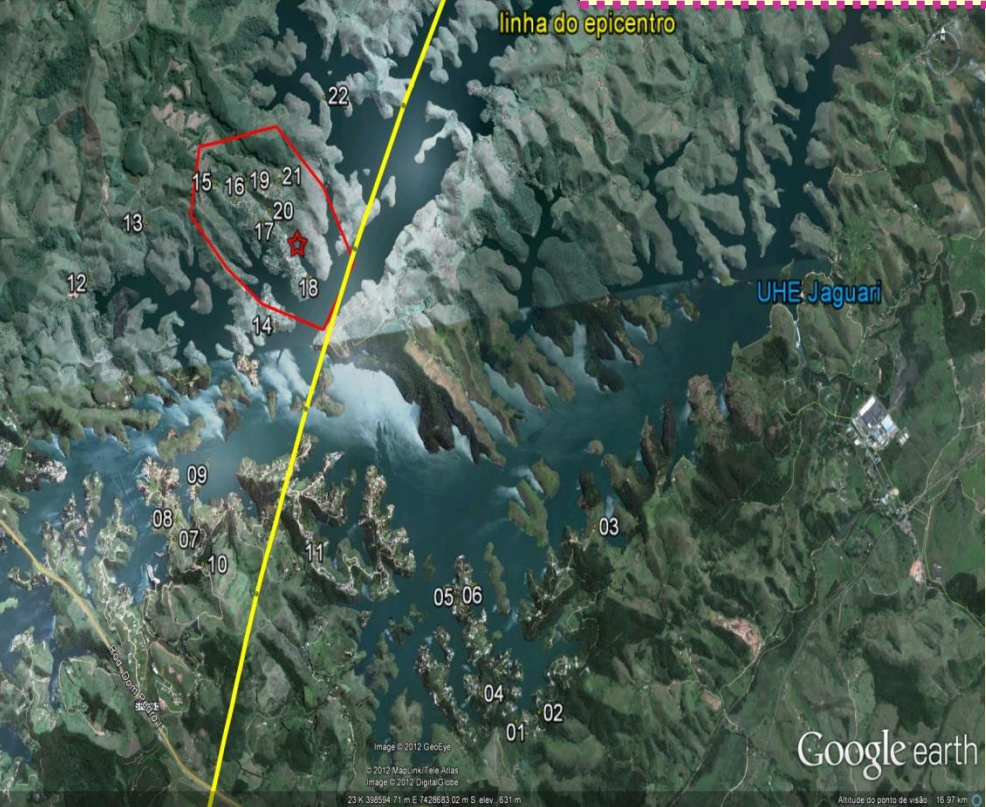
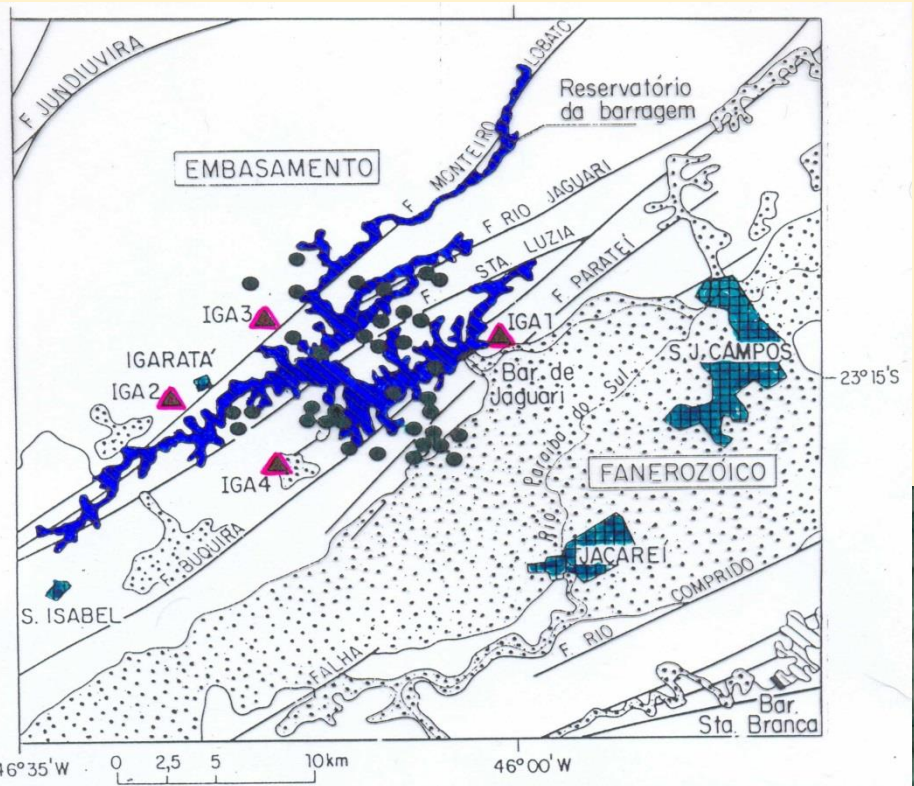
a importância das informações de detonações nas proximidades





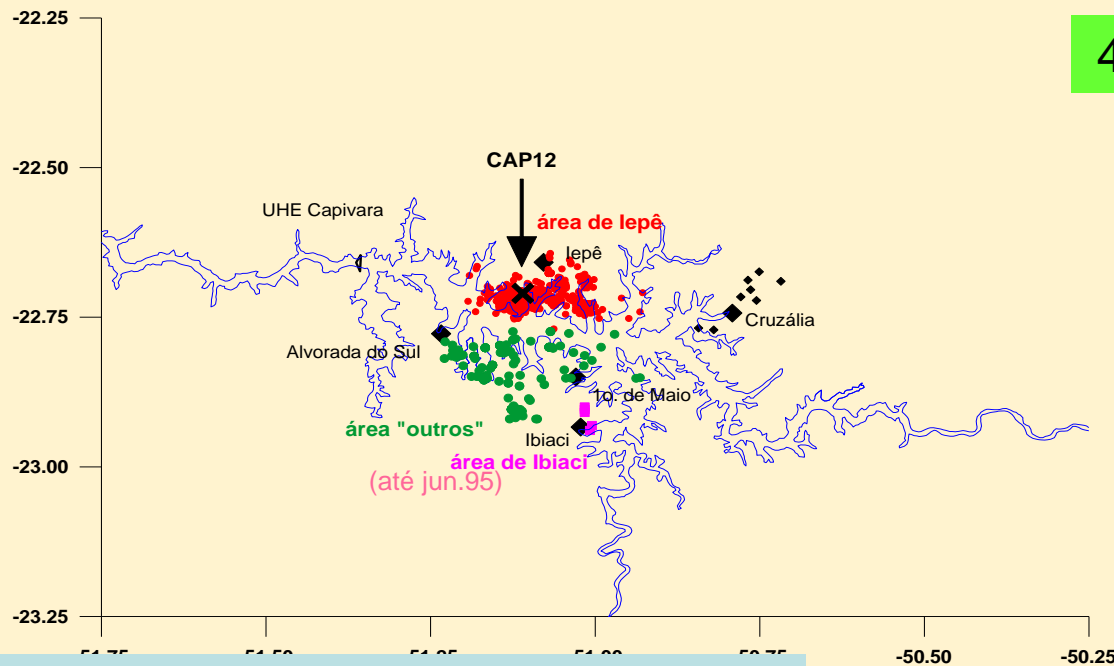
20.12.85 – 3,0 - V-VI
31.08.90 – 3,0 - ?!
31.05.10 – 2,3
24.07.11 – 2,1- III

Parâmetros
 21.07.2011
 21:57 – UT
 $\Delta \sim 48$ km da PAR1
 $h < 5$ km
 2,1 m_R
 III MM
 0,01 g
 4,2 km²



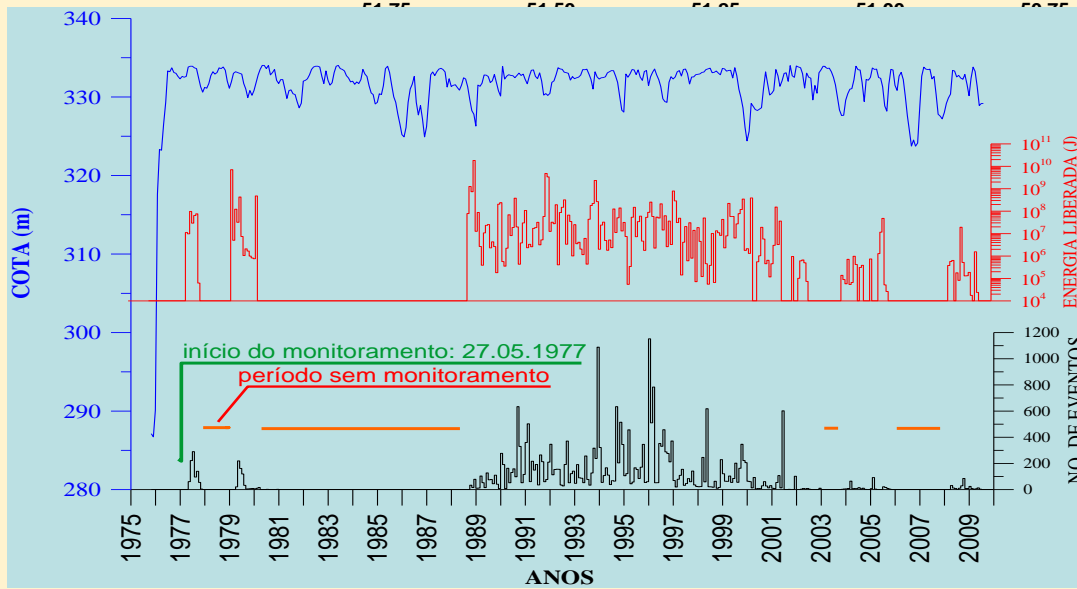
epicentros





No. total de eventos

Iepê	21521
Outros	1969
Ibiaci	1261



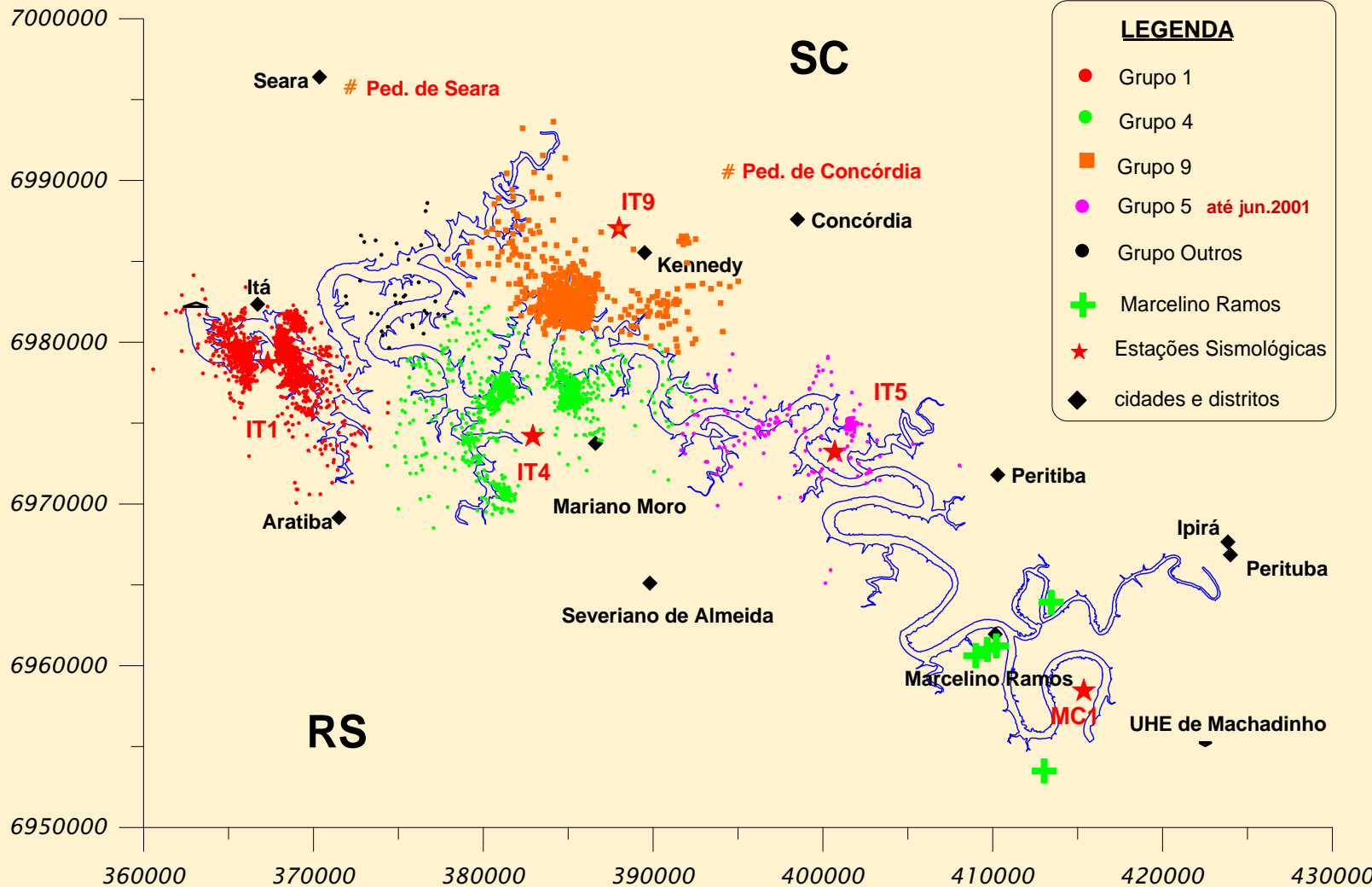
Principais eventos

16.06.76	-	VI	1o. de Maio
27.03.79	3,7	V-VI	1o. de Maio
07.01.89	3,7	VI	Ibiaci
17.01.92	3,7	V	Iepê
18.02.97	2,2	IV	Alv. do Sul

distribuição espaço-temporal

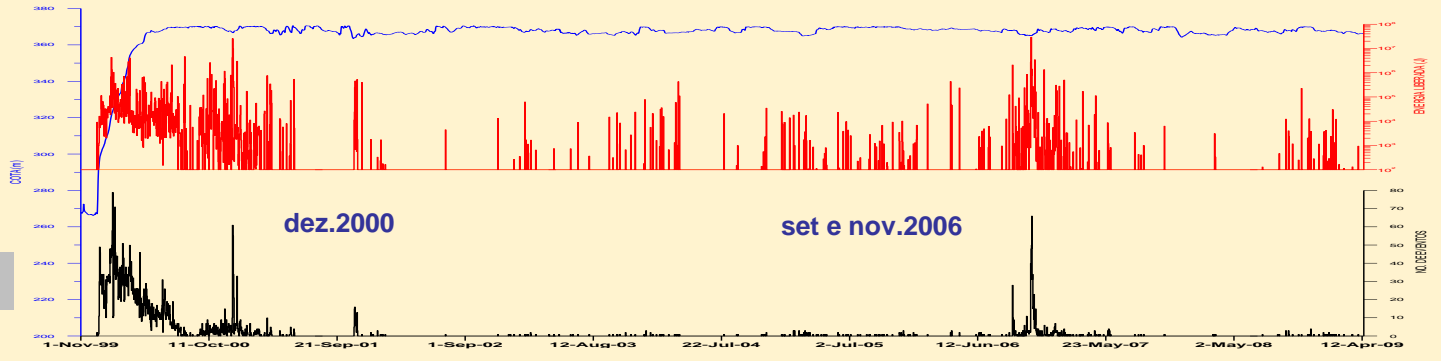
distribuição espacial

14843 eventos
 2,5 M_L
 ~ 90% < 0,5 M_L
 I < III-IV MM



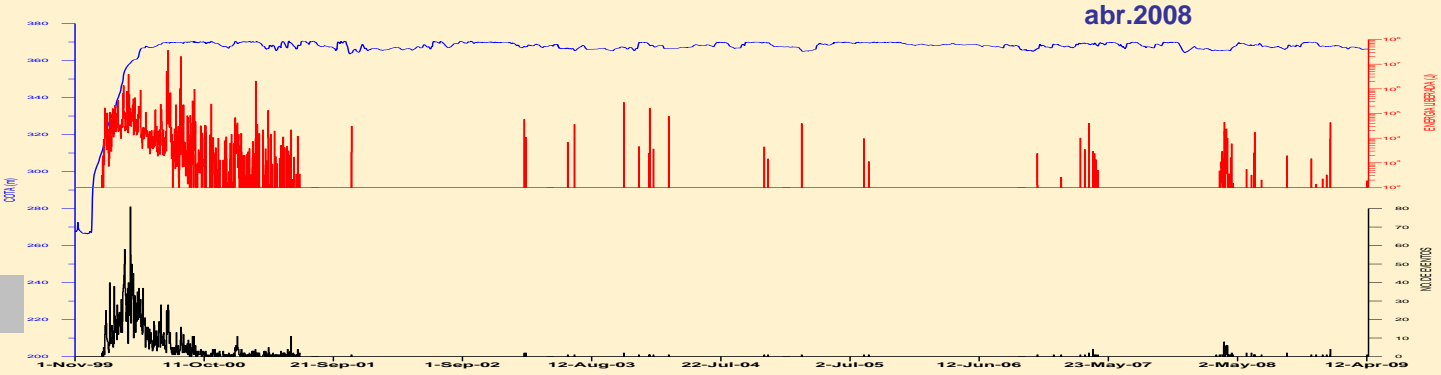
Monitoramento: 90 a nov.99 - IT1 e 13.11.99 - rede

Primeiro: 18.12.99



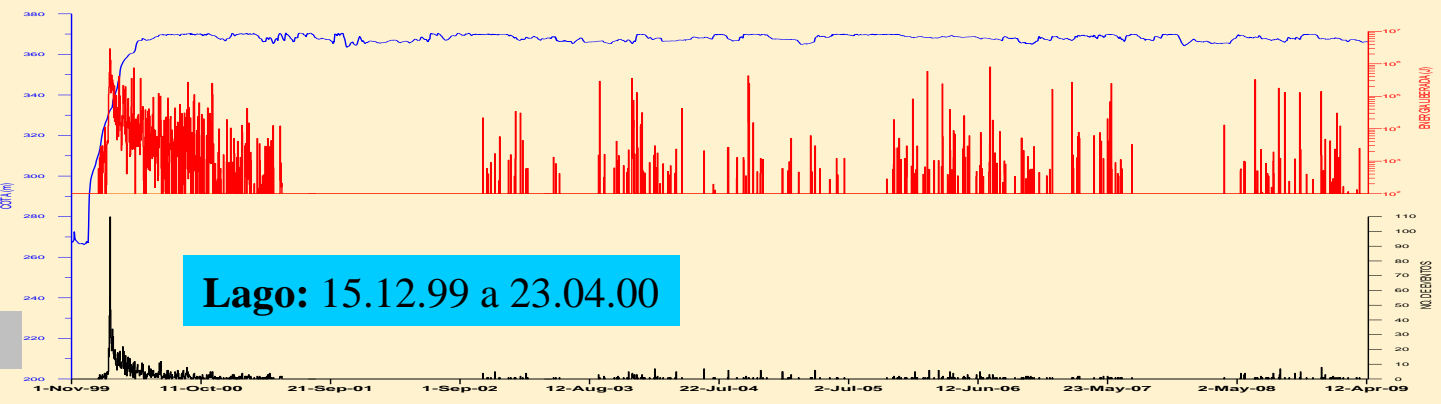
G-1

Primeiro: 12.01.00



G-4

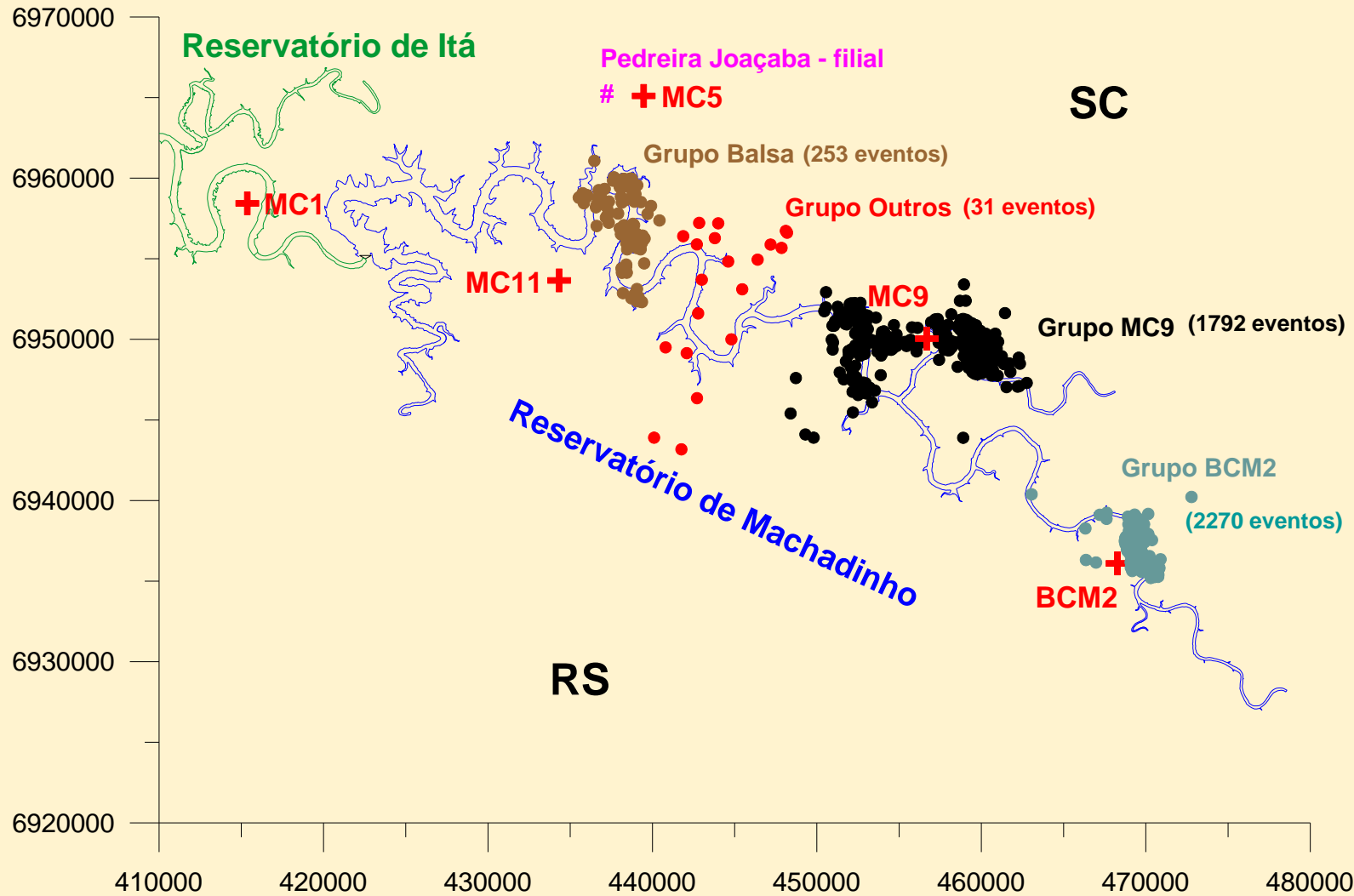
Primeiro: 12.01.00



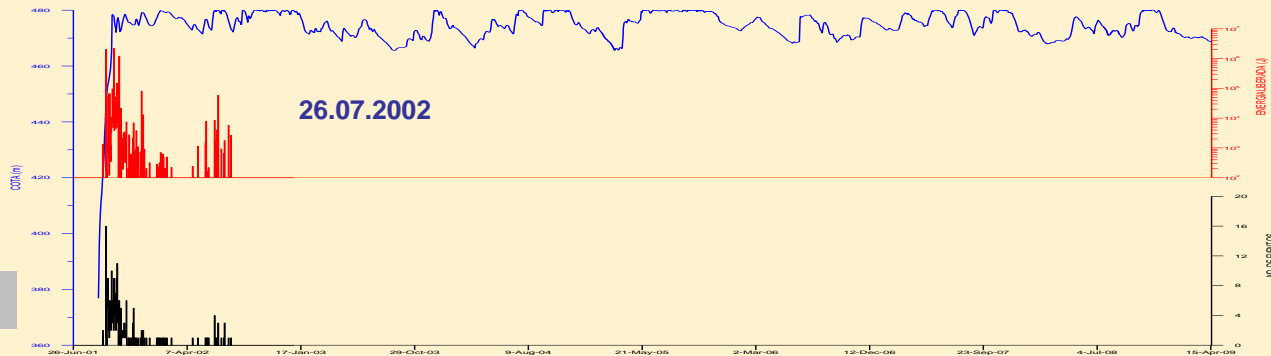
G-9

grupos de epicentros

4346 eventos
 1,8 M_L
 ~ 90% < 0,5 M_L
 não sentido

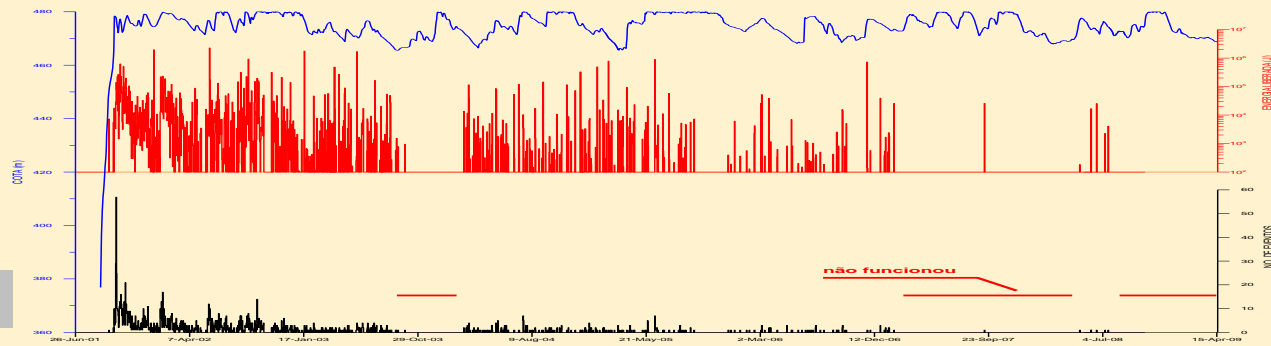


distribuição temporal



Primeiro: 08.09.01

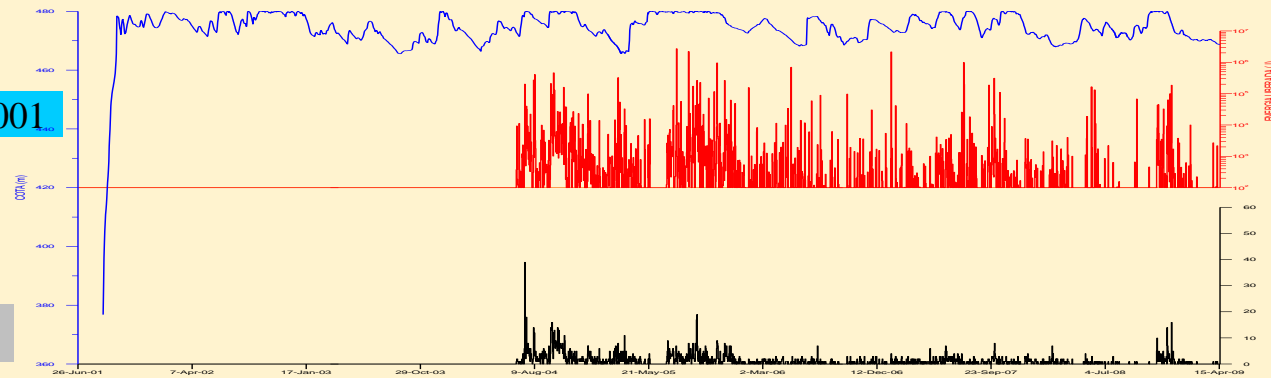
balsa



Primeiro: 29.09.01

mc9

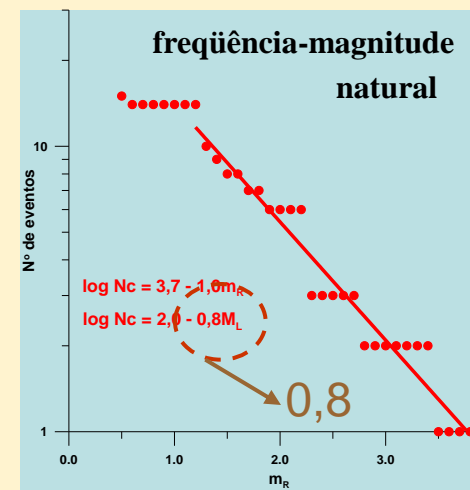
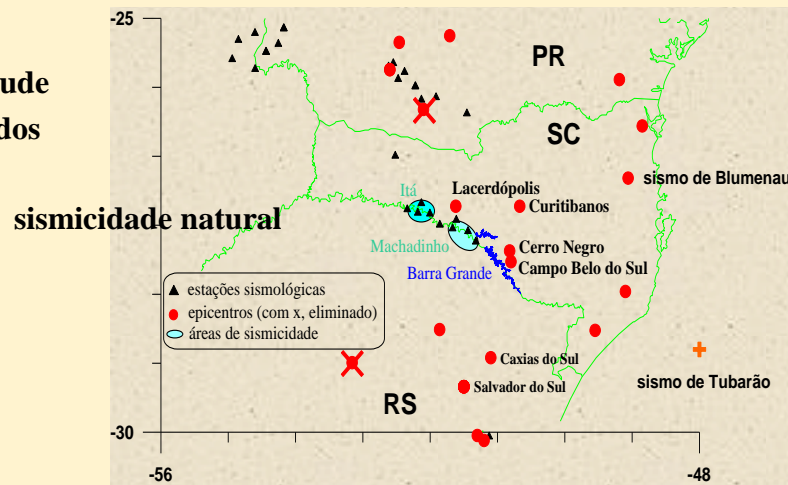
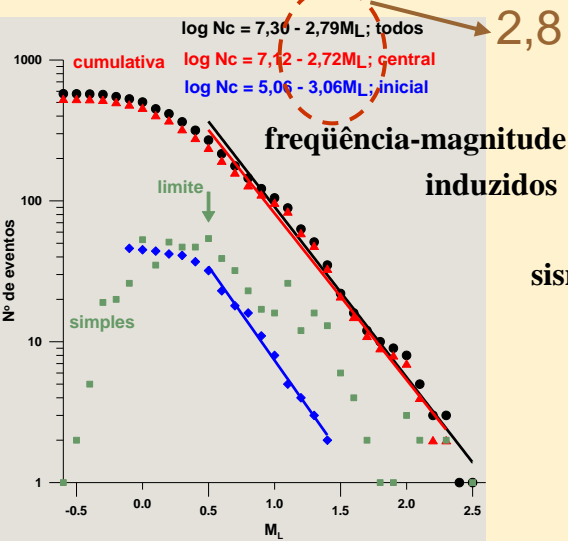
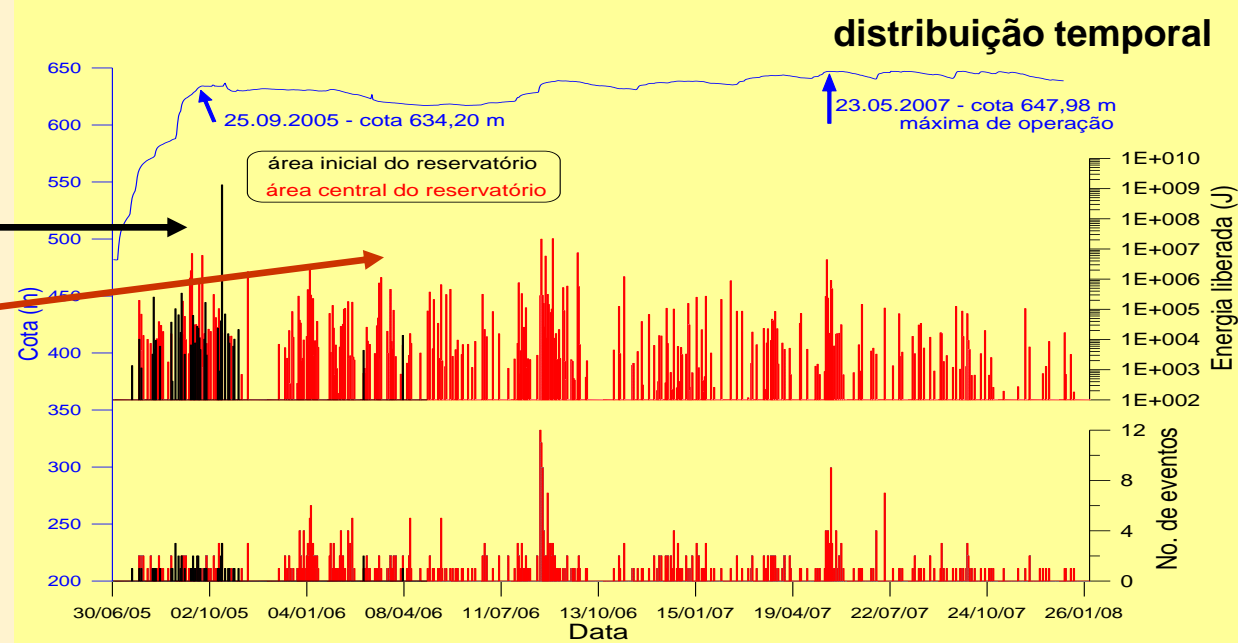
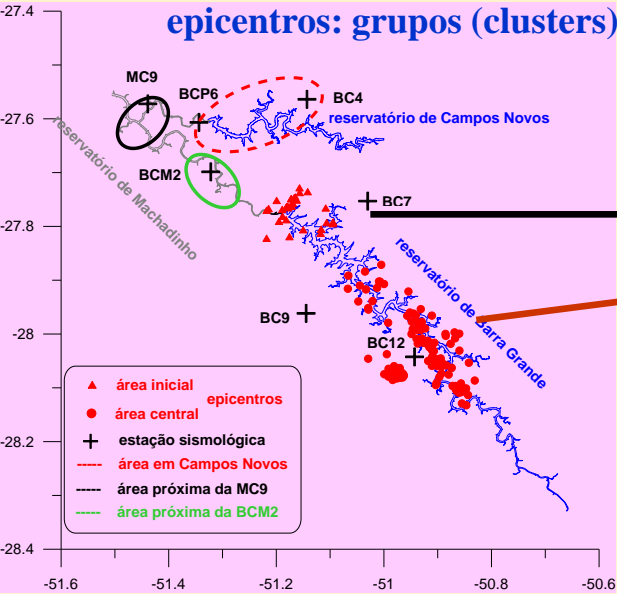
Lago: 28.08 a 03.10.2001



Primeiro: 25.06.04

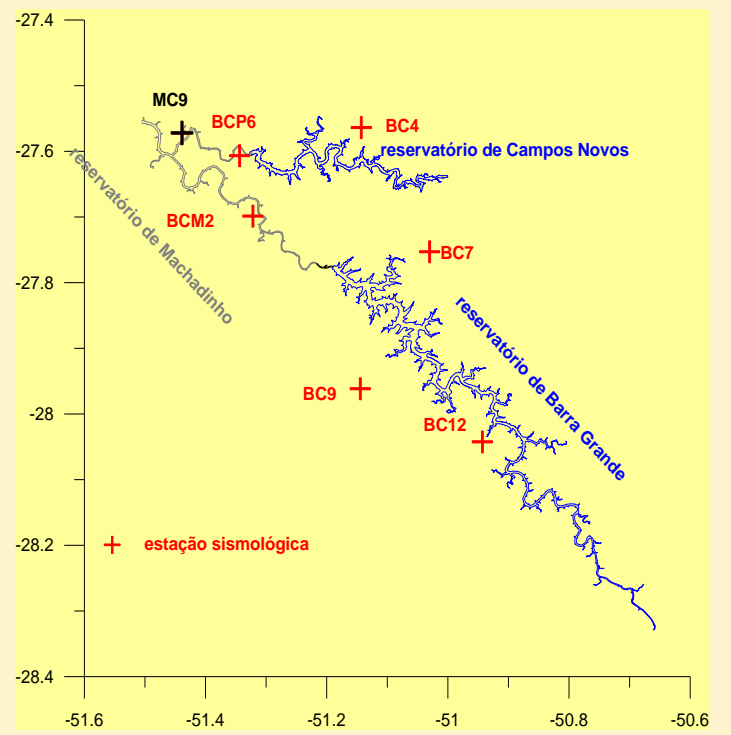
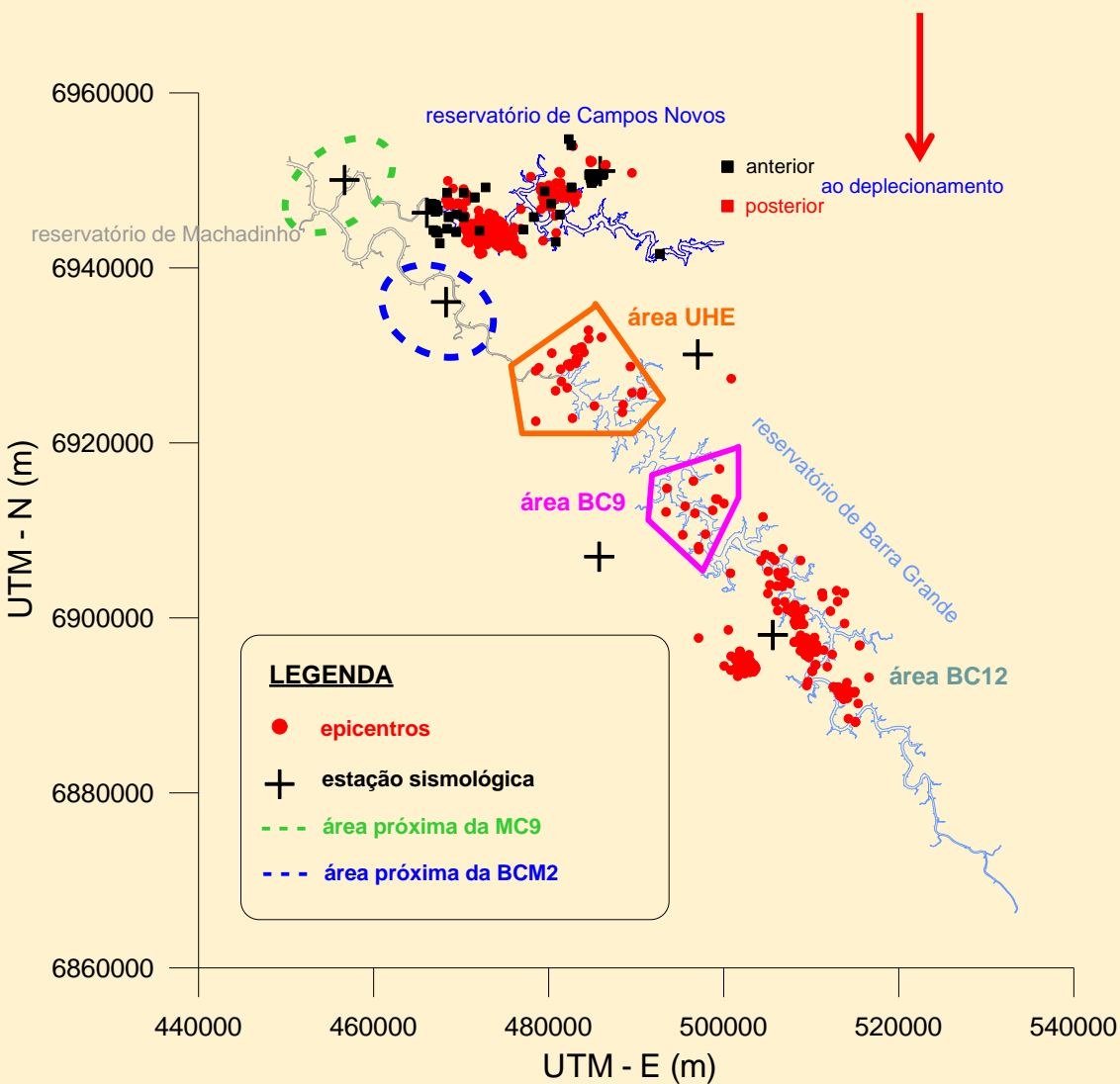
bcm2

distribuição espaço-temporal e parâmetro “b”



grupos de epicentros

22 – Barra Grande
23 – Campos Novos



Campos Novos

787 eventos

1,8 M_L

~ 90% < 0,5 M_L

I < III-IV MM

Barra Grande

674 eventos

2,5 M_L

~ 90% < 0,5 M_L

não sentido

distribuição temporal

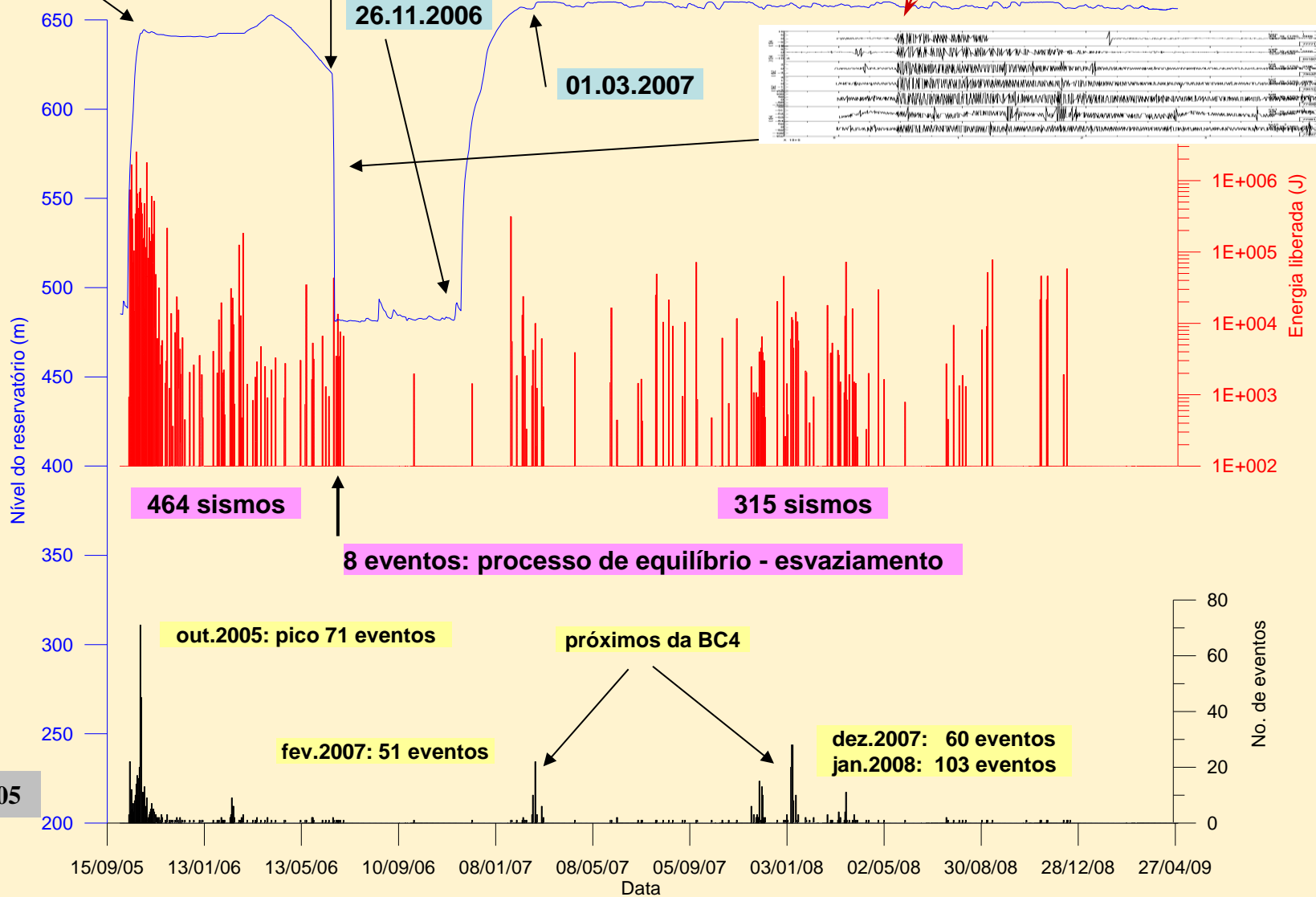
10.10.2005

19.06.2006
a
22.06.2006

23:15 colapso
22:58 nível de ruído sísmico, significativo aumento

26.11.2006

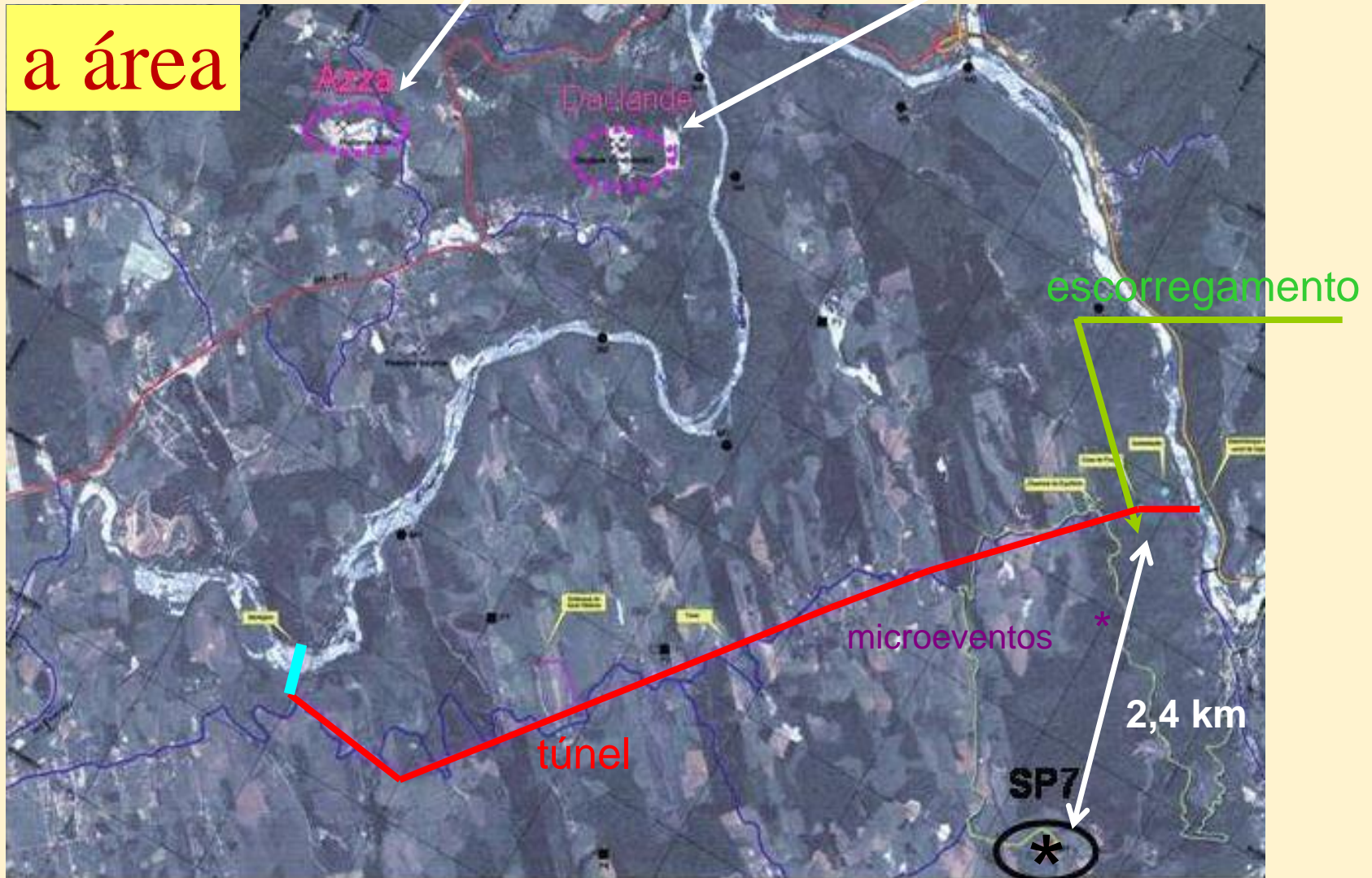
01.03.2007



Ped. Azza

Ped. Daclande

a área



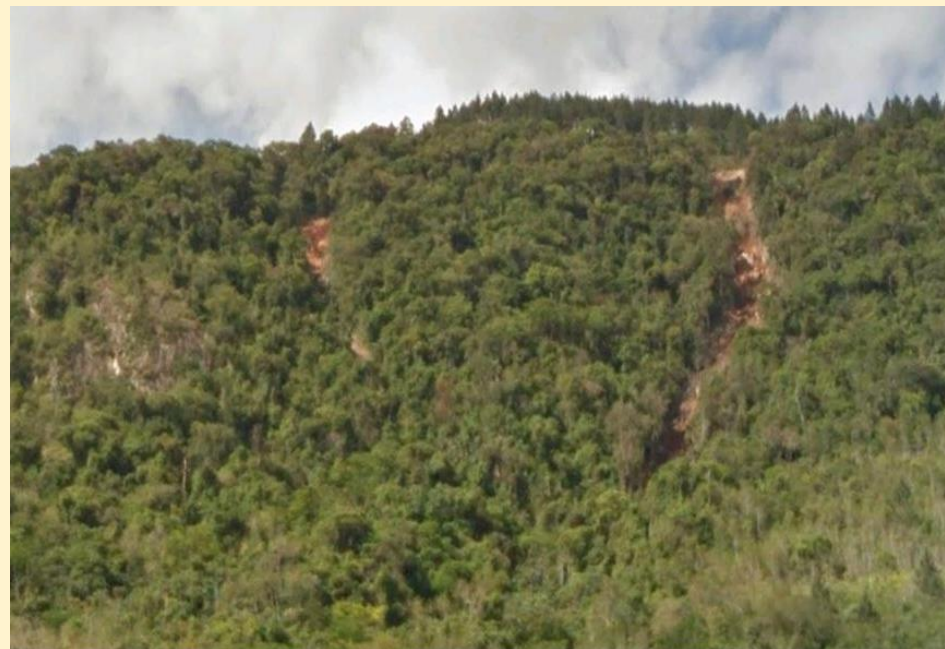
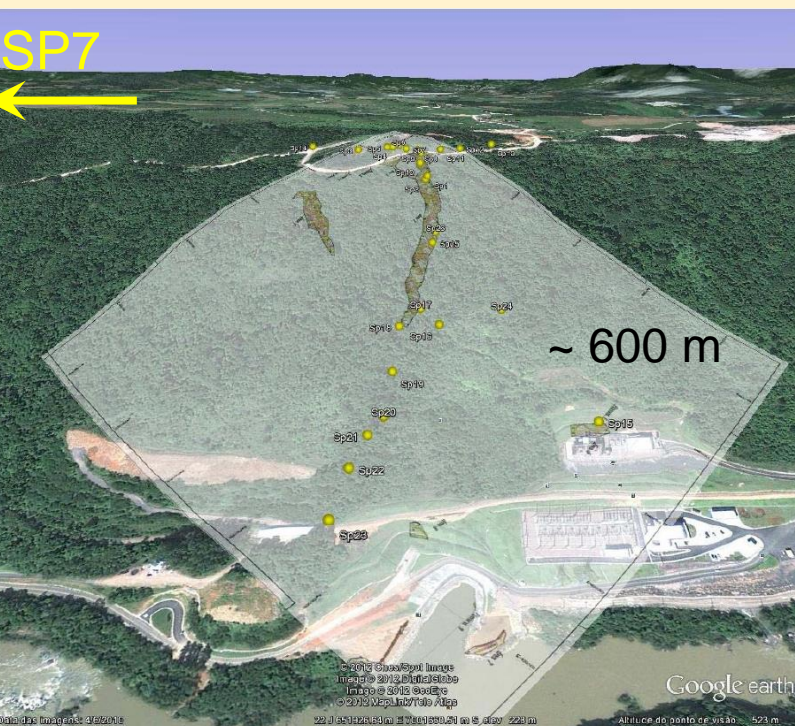
Geoambiente/IPT, 2008

curiosidade: registro de um escorregamento

a cicatriz

cicatriz muito íngreme com parede vertical de rocha aflorante

vista aérea



parede rochosa e grandes blocos



detalhe



tubulação rasgada

tubulação reconstruída provisoriamente



escorregamento

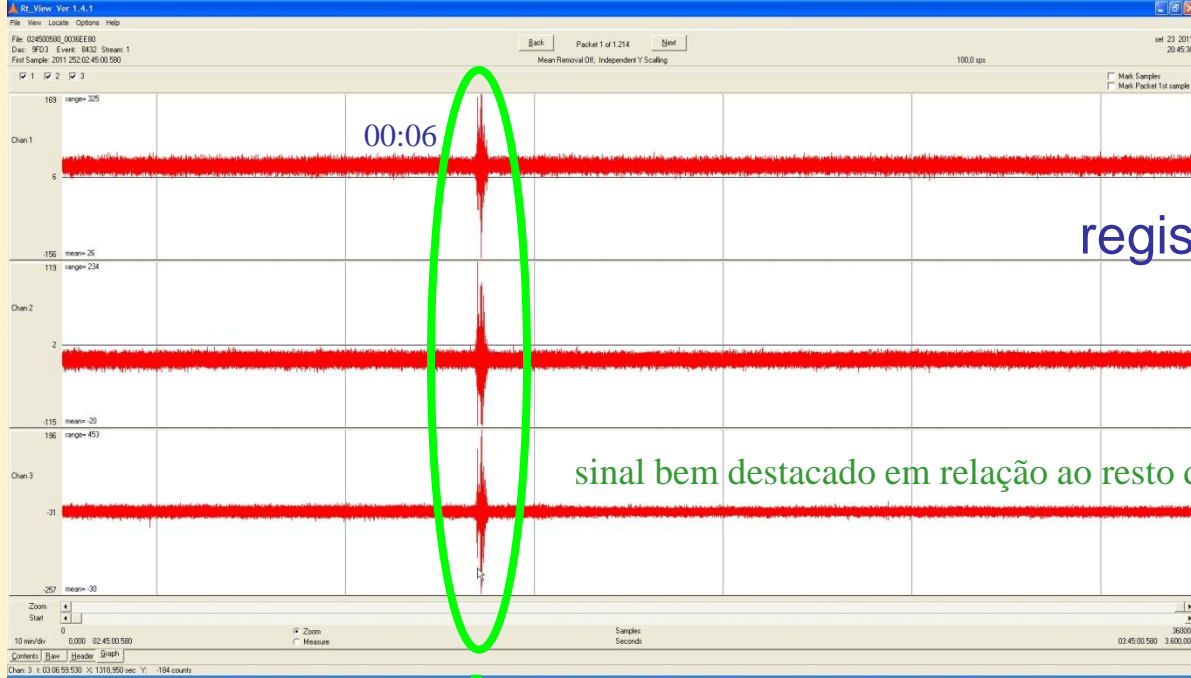
rompe

09/09/2011 – 0 h e 6 min

cabo da fibra ótica

23:45

SP7 → 2,4 km



00:45

registro contínuo
(1 hora)

sinal bem destacado em relação ao resto do período

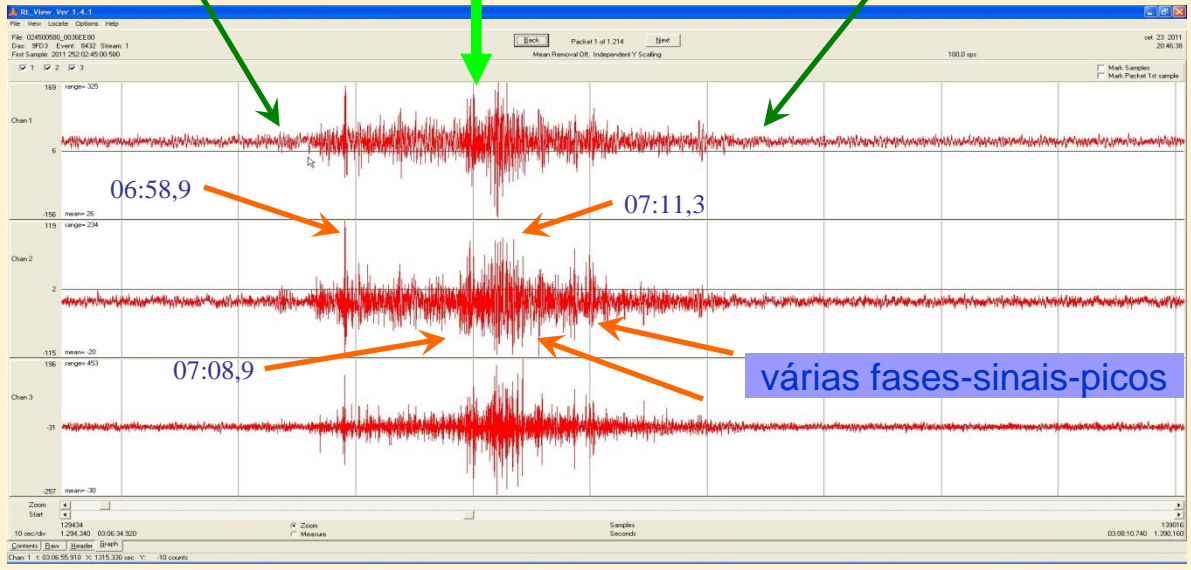
00:06:56,0

00:07:33,8

duração: 37,8 s

detalhe

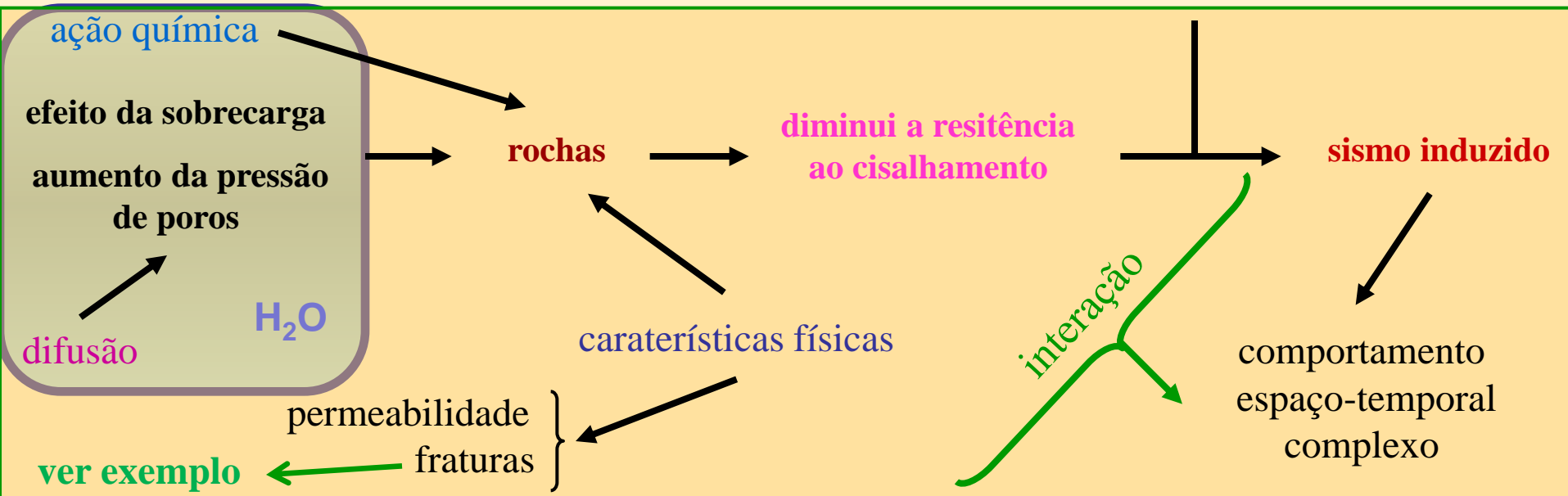
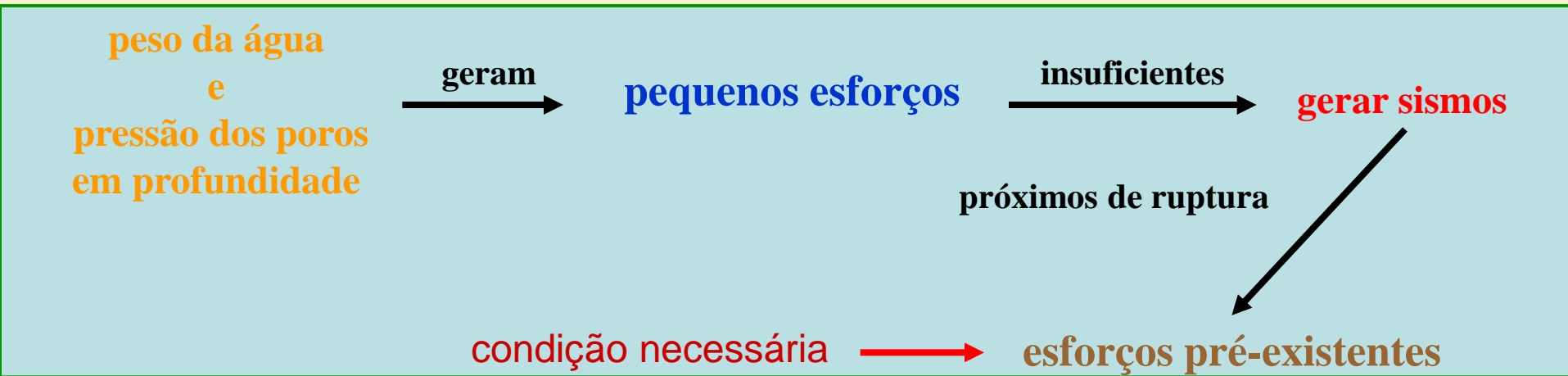
sinal # sismo



o registro

processo do escorregamento

mecanismo da geração de SIR





características básicas

- pequena porcentagem dos reservatórios \rightarrow induz sismo
- sismo induzido \rightarrow na área \rightarrow esforço tectônico \rightarrow próximo do ponto crítico
- baixo nível de sismicidade natural $\xrightarrow{\text{não}}$ menor risco de sismos induzido
- sismo induzido máximo $\xrightarrow{\text{não excede}}$ sismo natural máximo da região
- epicentros \rightarrow na área ou margem do reservatório ($\Delta < 5$ km)
 parte + profunda \exists casos ($m_b > 5$ e reservatórios grandes) $\Delta < 15$ km
 centro
- a maioria $\rightarrow b_{\text{induzido}} > 1$ ou $> b_{\text{natural regional}}$

continua

características básicas

- a maioria
pequenos tremores → 1º ano do enchimento
- quase totalidade → os 1ºs eventos → antes dos 3 anos do enchimento
- maior
magnitude da série → pode demorar mais para ocorrer
- maioria dos casos → menos de 5 anos do enchimento
- ∃ casos excepcionalmente demorados

características básicas

Propostas para classificar:

(SIMPSON, 1988; TALWANI, 1995 e 1997; e GUPTA, 2002)

rápida (*rapid*) ou inicial (*initial*) → inicia imediatamente → 1º enchimento/mudanças grandes NA
termina após poucos anos e sismicidade difundida na periferia do lago

atrasada (*delayed*) → sismicidade (incluindo o > evento) → vários anos após o enchimento
após um número de ciclos anuais de variação NA

prolongada (*protracted*) → inicial diminuiu → persistindo muitos anos sem decréscimo
epicentros em baixo do lago ou em áreas vizinhas

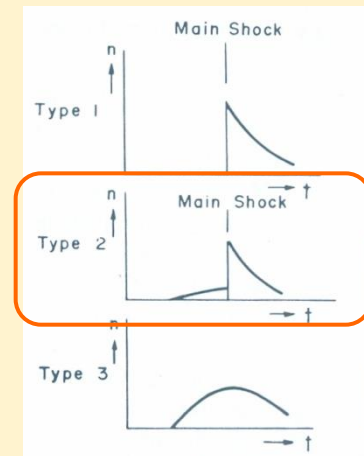
↓
(substituindo)

continuada (*continued*) → continua num determinado local do reservatório
ano após ano ou após um intervalo de poucos anos
dependendo dos estado de tensão e do nível de estímulo

alguns reservatórios mostram somente a resposta inicial (ou rápida)
muitos têm um comportamento misto, com uma fase posterior seguindo a resposta inicial

continua

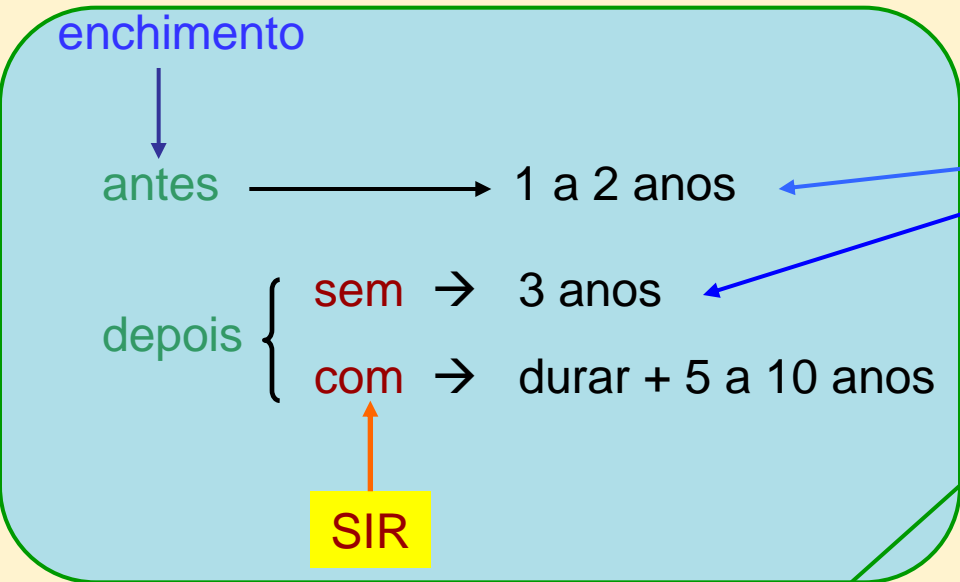
- relação $M1/M0 \sim 0,9$ (alto) e $M0 - M1 = 0,6$ (entre 0,1 e 1)
 $M0$ e $M1$: magnitude do evento principal e do maior sucessor (*aftershocks*)
- decaimento dos sucessores [$n(t) = C \cdot t^{-h}$] $h_{\text{induzidos}} < h_{\text{naturais}}$
- seqüências de precursoros/sucessores (*foreshocks/aftershocks*)
 \rightarrow padrão de Mogi Tipo II
- $b_{\text{precursoros}} > b_{\text{sucessores}}$ e ambos $>$ naturais
- difusividade hidráulica “sísmica” $\alpha_s = L^2/t \rightarrow 0,1 < \alpha_s < 10 \text{ m}^2/\text{s}$
 L é a distância entre fonte de pressão (o reservatório) e o local da sismicidade
 t é o tempo entre o enchimento do reservatório e a ocorrência da sismicidade
 \rightarrow concordância - razão de crescimento da área epicentral
- associado com falhamento normal e transcorrente (*strike-slip*)



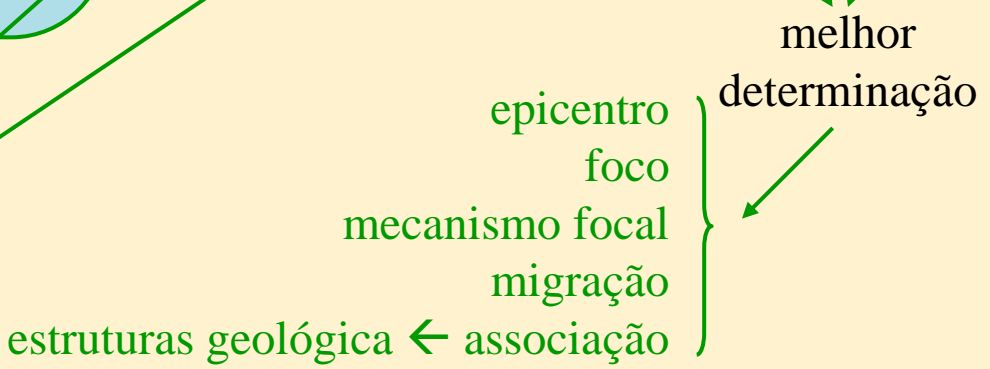
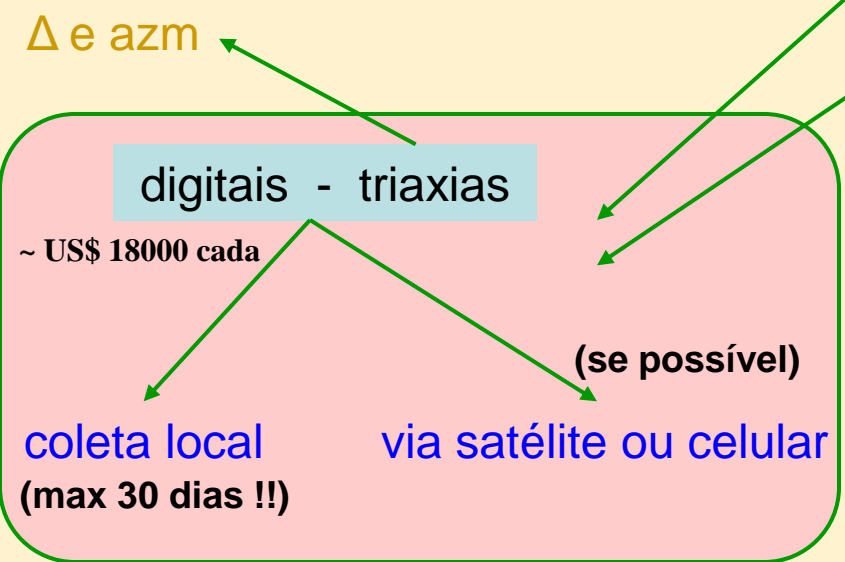
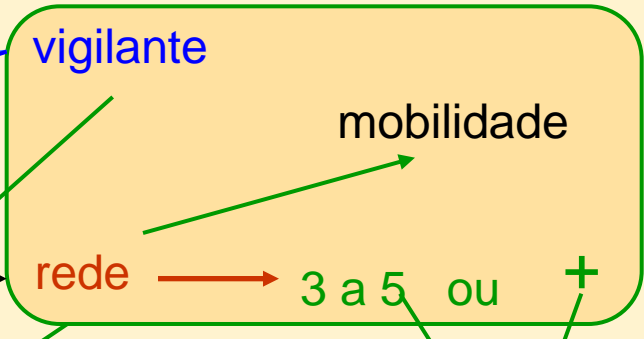
falhamento de empurrão (*thrust*) \rightarrow estabilização

monitoramento sismológico

período de monitoramento



estações e equipamentos



NA (montante)

tempo real

detonações → # sismos

- ASSUMPÇÃO, M. 1983. **A regional magnitude scale for Brazil**. Bull. Seism. Soc. Am, 73:237-246
- ASSUMPÇÃO, M. *et. al.* 2020. **Reservoir-induced seismicity in Brazil**. Pure. Appl. Geophys., 159:597-617.
- BERROCAL, J. *et. al.* 1984. **Sismicidade do Brasil**. IAG/USP-CNEN, São Paulo, SP
- BOLT, B. A. 1999. **Earthquakes**. W. H. Freeman & Co.
- CBGB 1999. **Cadastro Nacional de Barragens**. CD-ROM
- FRANÇA, G. S. *et. al.* 2010. **Update of the reservoir induced seismicity of Brazil – 2008**. 77th Annual Meeting of the ICOLD – Symposium on dams and reservoir for multiple purposes. Brasília, DF
- GOMIDE, L. C. 1999. **Nature and history of reservoir induced seismicity in Brazil**. Dissertação de Mestrado, Univ. South Carolina, USA
- GUPTA, H. K. e RASTOGI, B. K. 1976. **Dams and Earthquakes**. Elsevier.
- GUPTA, H. K. 1992. **Reservoir-Induced earthquakes**. Developments in Geotechnical Engineering nº 64, Elsevier.
- GUPTA, H. K. 2002. **A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India**. *Earth-Science Reviews* 58:279–310.
- ICOLD 2002. **Reservoir triggered seismicity - State of knowledge**
- MARZA, V. I. *et. al.* 1999. **Aspectos da sismicidade induzida por reservatórios no Brasil**. Anais XXIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Belo Horizonte, MG, 1:199-211.
- RIBOTTA, L.C., 1989. **Aspectos da sismicidade na área do reservatório de Paraibuna/Paraitinga**. Dissertação de Mestrado, IAG-USP
- RIBOTTA, L. C. *et. al.* 2006. **Sismicidade na área do reservatório de Itá, SC/RS**. Anais II Simp. Bras. de Geofísica, Natal, RN.
- RIBOTTA, L. C. *et. al.* 2006. **Sismicidade na área do reservatório de Machadinho, SC/RS**. Anais XLIII Congresso Bras. de Geologia, Aracaju, SE.
- RIBOTTA, L. C. *et. al.* 2008. **Sismicidade na área do reservatório de Barra Grande, SC/RS**. Anais III Simpósio Bras. de Geofísica, Belém, PA.
- RIBOTTA, L. C. *et. al.* 2010. **Seismicity induced in 4 deep reservoirs, Southern Brazil, SC**. Anais do Congresso da AGU-2010, Foz do Iguaçu, PR.
- RIBOTTA, L. C. *et. al.* 2013. **Estação sismológica registra escorregamento de terra ocorrido em Apiúna, SC**. Anais 46 Congresso Brasileiro de Geologia, Santos, SP.

Agradeço,

Ao IAG/USP – Centro de Sismologia, pelo convite e oportunidade para realizar esta apresentação sobre Sismicidade Induzida por Reservatórios; e

às Instituições e Empresas citadas a seguir, pela liberação de informações técnicas utilizadas nesta apresentação:

BAESA - Energética Barra Grande S.A.

CESAP - Consórcio Empresarial Salto Pilão

CESP – Companhia Energética de São Paulo

DUKE ENERGY – Geração Paranapanema

ENERCAN - Campos Novos Energia S.A.

GEOAMBIENTE/CESAP – Consórcio Empresarial Salto Pilão

IAG/USP - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

MAESA - Machadinho Energética S.A.

OBSIS/UnB - Observatório Sismológico da Universidade de Brasília

TRACTEBEL Energia S.A.