

# 30 anos de utilização de redes GNSS em Portugal: aplicação em geodinâmica

Luísa Bastos<sup>1,2</sup> e Clara Lázaro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Porto, Faculdade de Ciências

<sup>2</sup> Universidade do Porto, Observatório Astronómico



# Motivação

- Revisitar o início da utilização do Sistemas de Posicionamento Global (GPS) em Portugal;
- Assinalar os 30 anos do lançamento do projecto TANGO e relembrar as instituições e colegas ligados ao projecto;
- Reflectir sobre o que mudou ao longo das últimas 3 décadas;
- Perspectivar possibilidades de evolução futura.



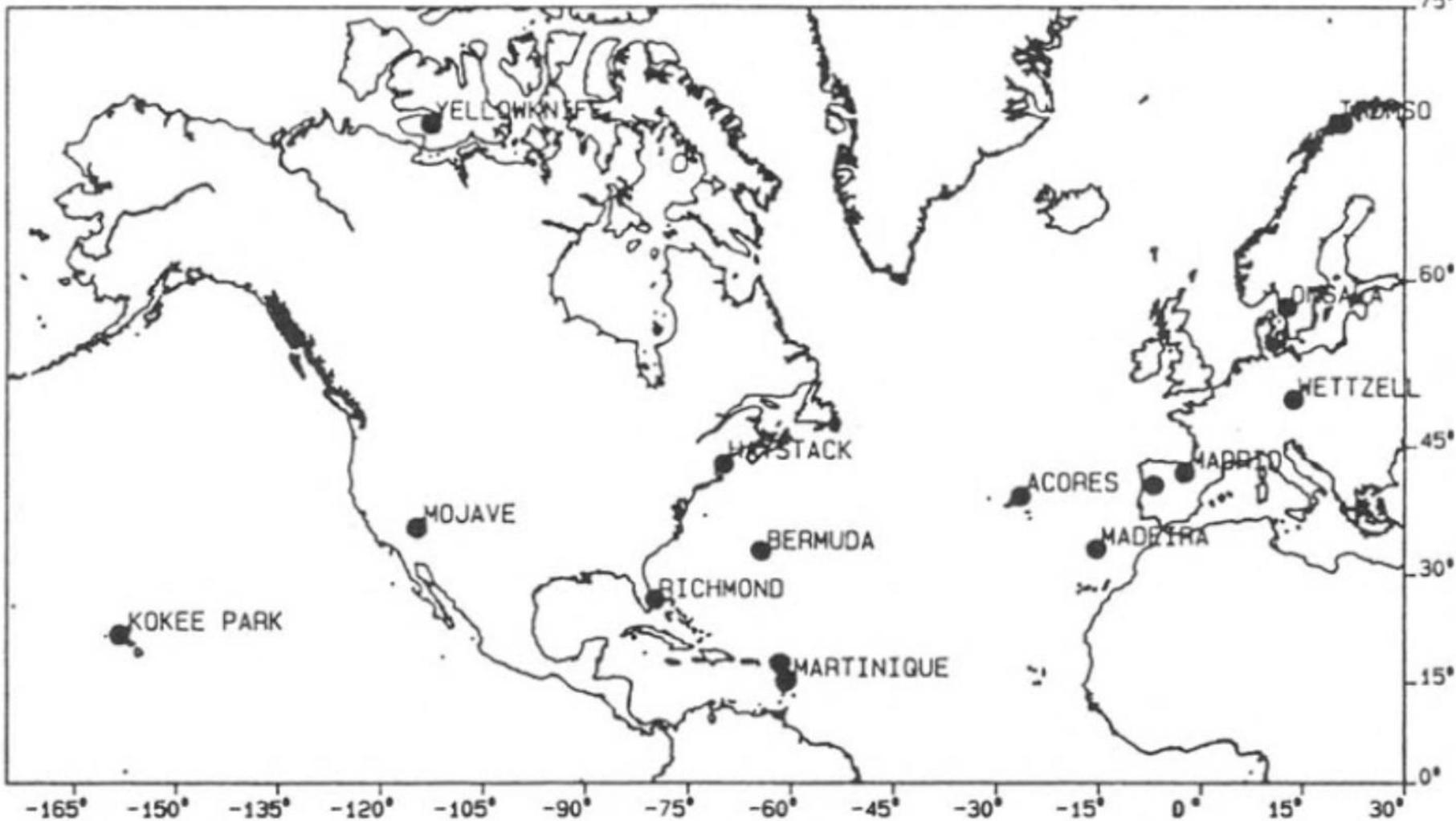
# Enquadramento

- O projecto **TANGO** (TransAtlantic Network for Geodesy and Oceanography) foi planeado e começou **no final da década de 80**, no início da aplicação do GPS à geodinâmica.
- O projecto tinha como objectivo contribuir para uma melhor caracterização da geodinâmica da chamada "Junção Tripla dos Açores", na confluência das placas norte-americana, euro-asiática e nubia.
- A par do projecto CASA (Central And South America) UNO (JPL) constituiu **uma das primeiras tentativas de estabelecimento de uma rede intercontinental**.
- A rede TANGO foi estabelecida em 1988 com estações GPS nos continentes europeu e americano: incluía estações no continente e ilhas (Açores e Madeira) e na América Central.



# Rede TANGO

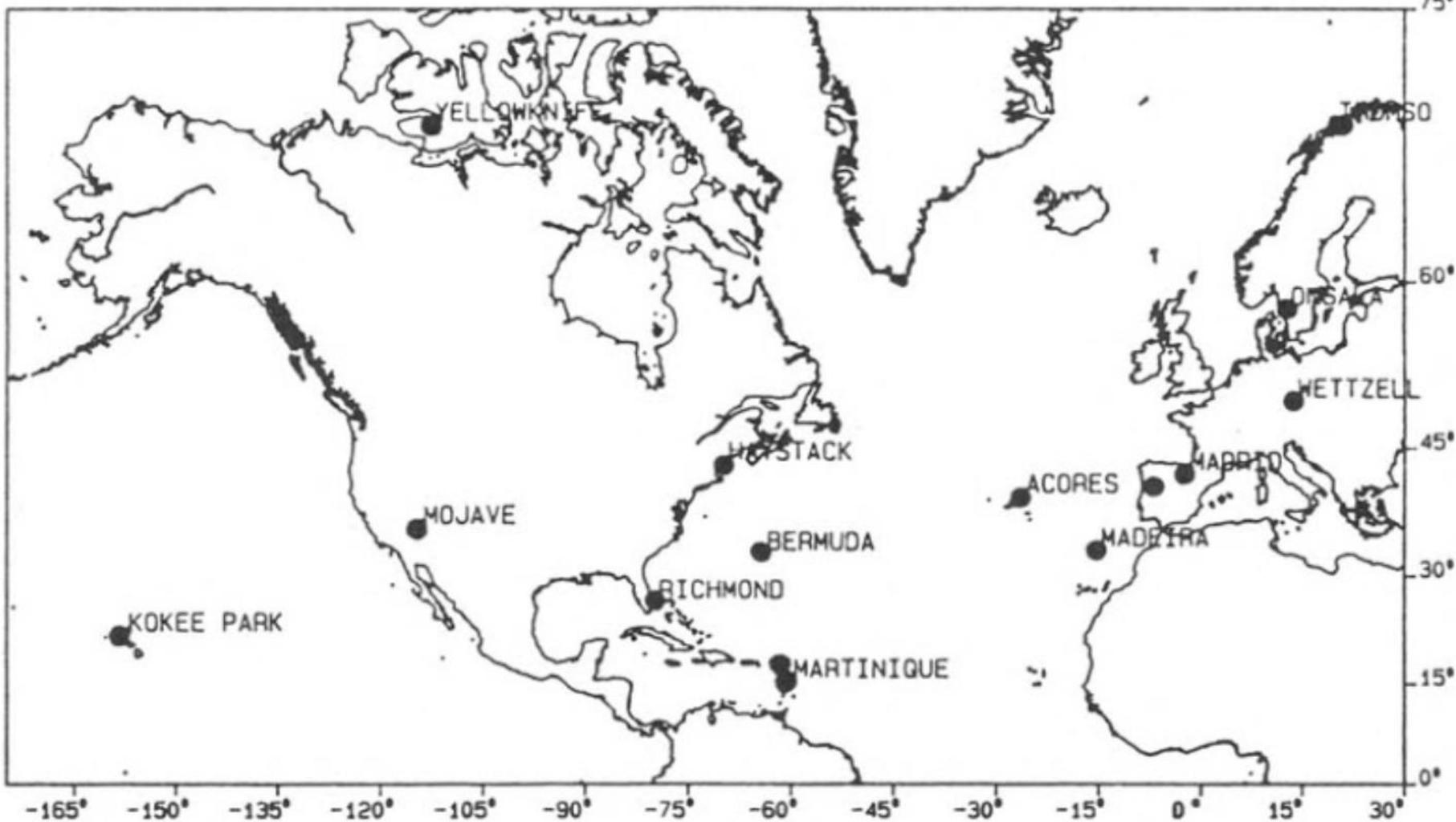
1ª campanha: 1988





# Rede TANGO

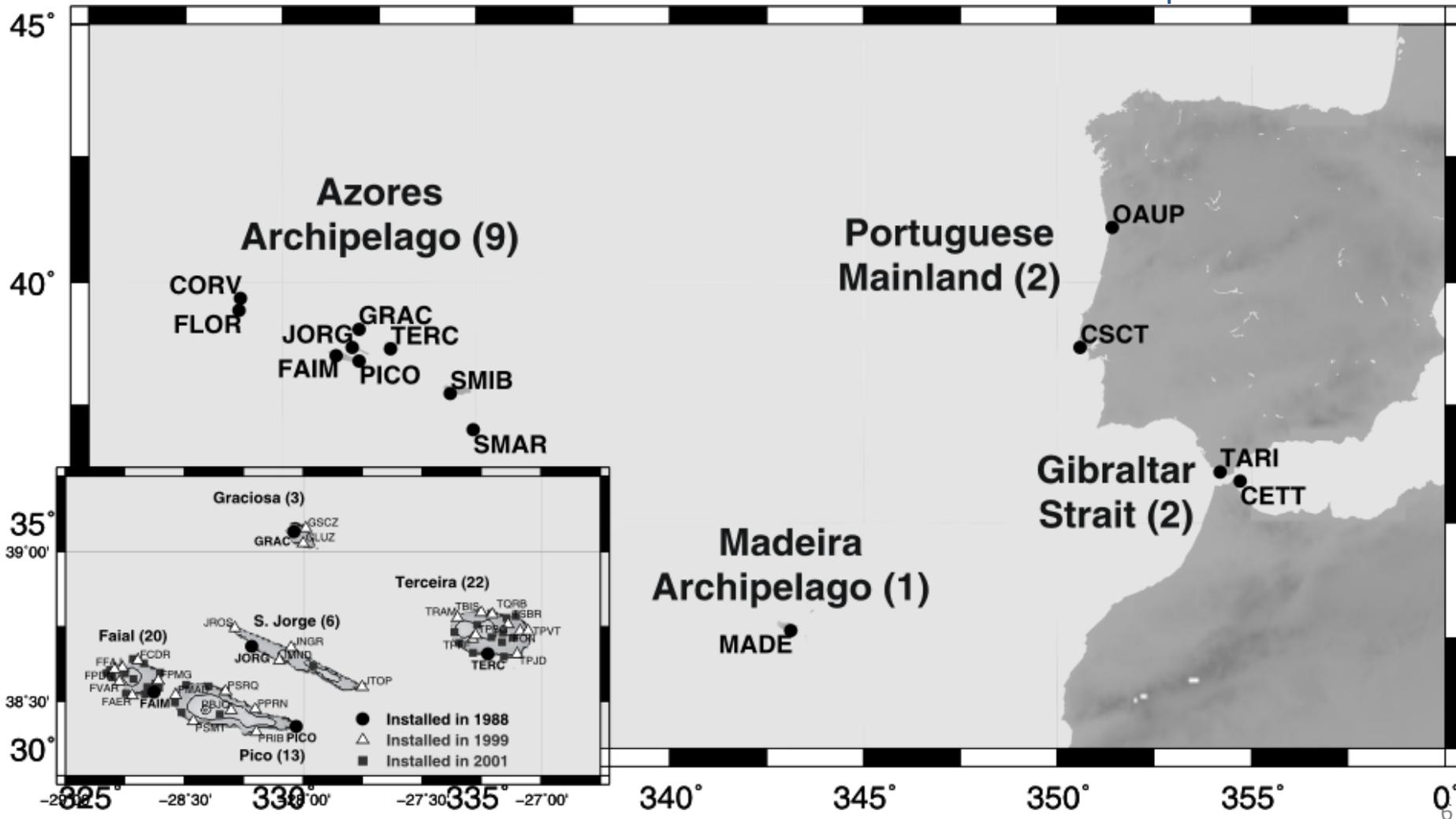
1ª campanha: 1988





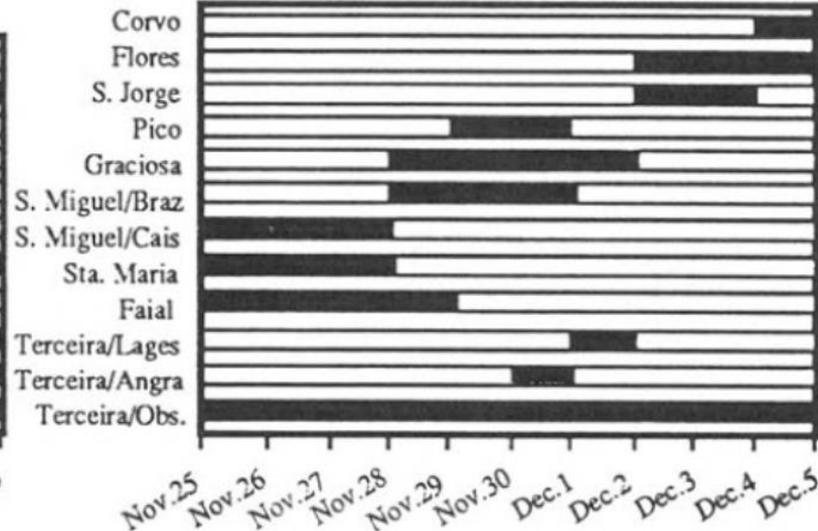
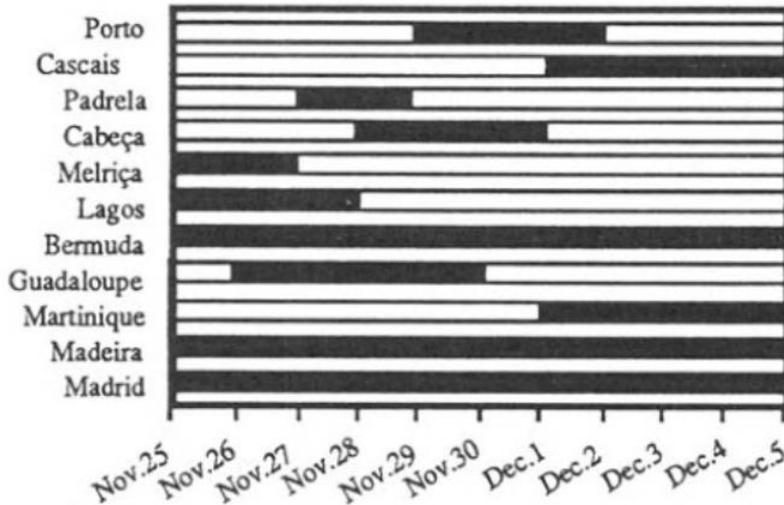
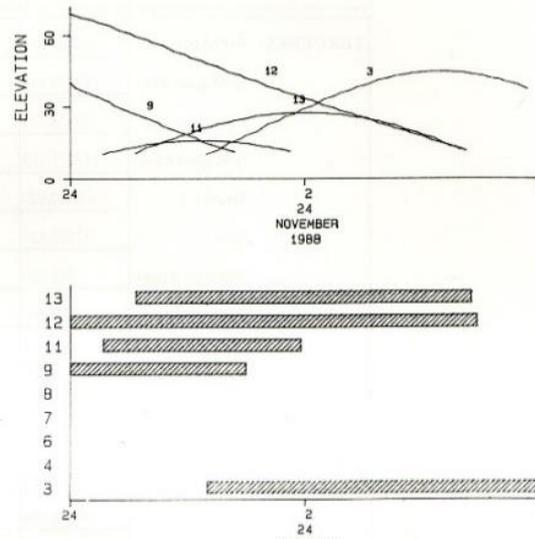
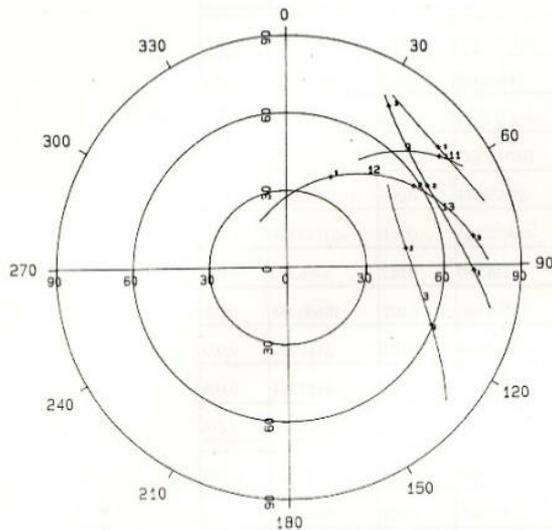
# Rede TANGO

1ª campanha: 1988



# Campanhas TANGO

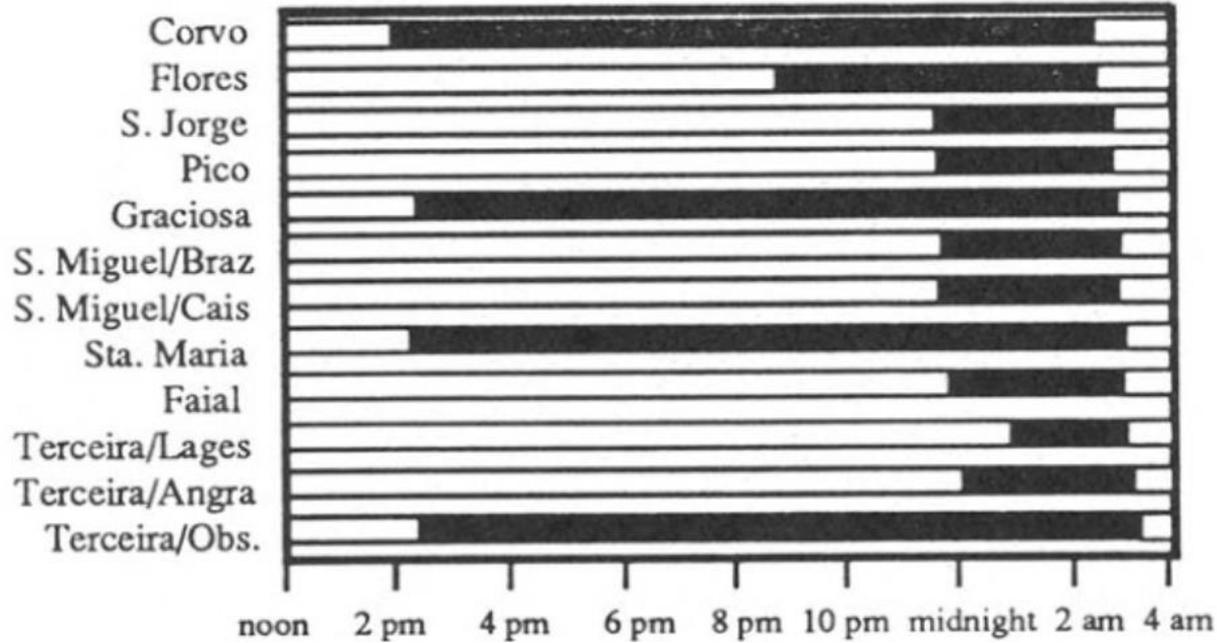
Visibilidade dos satélites NAVSTAR/GPS – um desafio!





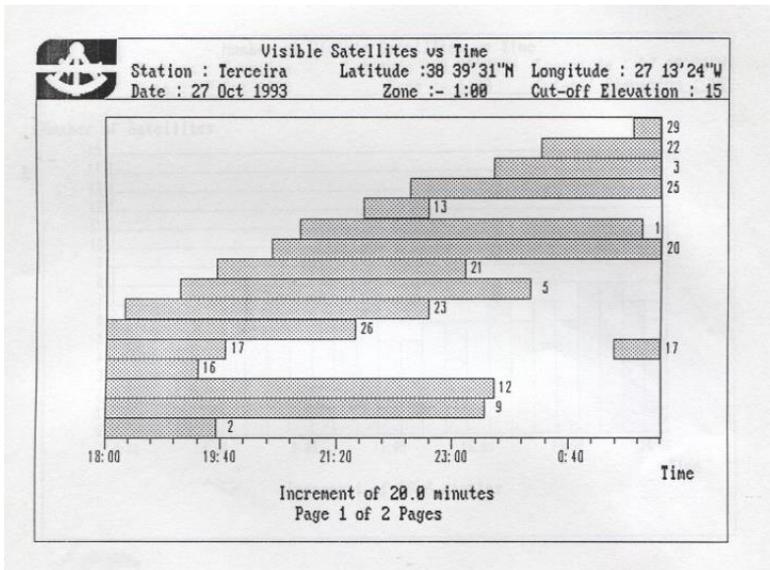
# Campanhas TANGO

Visibilidade dos satélites NAVSTAR/GPS – um desafio!



# Campanhas TANGO

## Estação de referência na Ilha Terceira



# Campanhas TANGO

Poucos satélites, janela de visibilidade limitada, locais remotos



Circle appropriate Antenna Type Include a sketch if the height was measured differently than shown.

Trimble 4000 SDT, SST, SZE      Trimble 4000 SLD      Ashtech XII



INSTITUTO GEGRÁFICO E CADASTRAL  
DIRECÇÃO DOS SERVIÇOS DE GEODÉSIA

LOCAL: Ilha de Faial - Observatório Meteorológico Sr. Alberto do Monte das Moças

NOME DA ESTAÇÃO: MONTE DAS MOÇAS

OPERADOR: A. Bauch / M. Hecel Lisboa DATA: 25, 26, 27 e 28 de Novembro de 1988

ESBOÇO DA LOCALIZAÇÃO

ESBOÇO DO PILAR

ESBOÇO DA ORIENTAÇÃO DA BASE

Pilar Base  
1 - C  
2 - A  
3 - B (pandinho)

## FIELD RECORD FOR THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM

Station: Faial / Mte. Moças FAM Date: 26-NOV-88

Station-Coordinates Approximately  $\phi = 38^{\circ}22'$   
 $\lambda = 22^{\circ}22'$  W 22 22  
Height = M.O.M.  
Antenna-Height:  $i = 0,028m$

Observation Time Interval = 3 sec

Observer BAUCH  
TI 4100 Serial number 840501070004  
Time of Switch-on in the afternoon

GPS-Week 463  
Day of year 334

Observation scheduled	Time span actual UTC	Configuration	Cassette Label	Cassette VAX
00:16	00:20	9 M 12 B3	FAM.MO	here station
1:06	01:09	3 M 12 B3	FAM.MO	FAM 330.T11
3:16		END		

Time UTC	Humidity	Temperature	Pressure	Time UTC	Humidity	Temperature	Pressure
00:42	10.8	17.3	756				
12:58	16.8	17.4	756				

Remarks: Antennennulllinie nach Norden ausgerichtet ✓

IN 840 501 070 004  
550 Number 216 120 ; System 98, Phase 2

Nach offenbarem falschen Funktionieren mit 12:13  
Neustart um 2:02 (UT) mit neuer Diskette in B,  
geht wieder normale Registrierung!

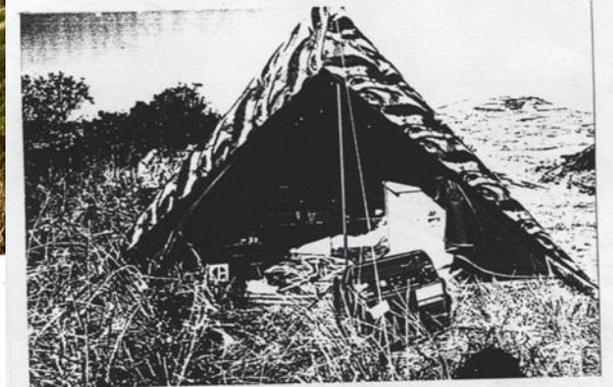
Wird dem nächsten Wechsel der  
Diskette + in B um 01:02  
ausgetauscht die PC auf A um, der  
die 2-stündige Aufnahme  
beendet. Record "load"

# Campanhas TANGO

Acessos difíceis, más condições de observação e paisagens fantásticas



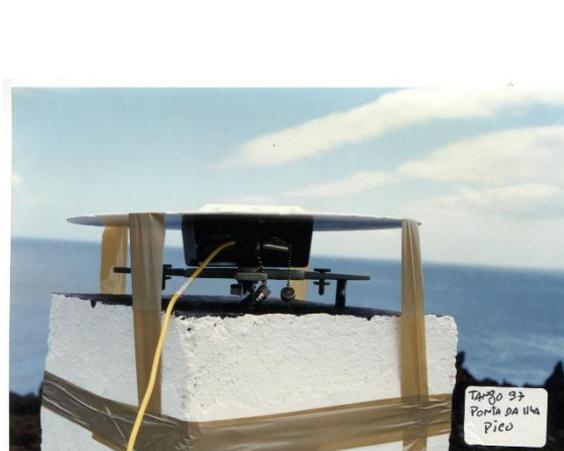
Δ Morro Grande  
Ilha de S. Jorge



Tenda, emprestada pelo Regimento de Infantaria da Horta, utilizada na Ilha do Pico e na Ilha de S. Jorge.  
Em 1º plano vê-se o Gerador e ao fundo da tenda o Receptor TI 4000.

# Campanhas TANGO

Acessos difíceis, más condições de observação e paisagens fantásticas



TANGO ST  
PONTA DA ILHA  
PICO



TANGO ST  
PONTA DA ILHA  
PICO

Site Description TANGO 2

Station Name	Ponta da Ilha 3	Char ID	PIC
Location	Ponta Leste da Ilha do Pico		
Operator	José Alberto G. / Nuno Pereira		
Station ID #			
Institution	Univ. Trás-os-Montes		

Chart with location of station. Shortly describe the site and the way to reach it. Comment the station visibility above horizon.

Marco geodésico sobre uma rocha destacada no terreno, formada por rocha vulcânica. O acesso, a partir do farol, faz-se por um caminho de fe' posto, bastante pedregoso, com cerca de 400 m. O marco não se vê do farol ao nível do chão.



TANGO ST  
LAGOA DO CAPÃO  
PICO

100 YEARS. COMMITMENT TO THE FUTURE

# Campanhas TANGO

## Graciosa, Flores e Corvo



Attach a photo or a sketch of the observing monument.  
Indicate the exact point where the instrument was centered  
and include a North arrow.

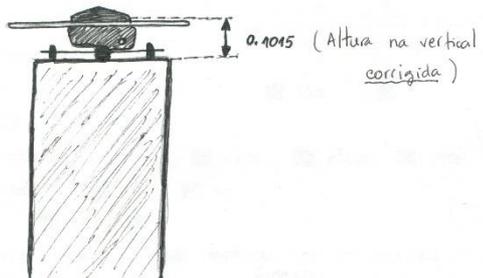
BASE SW - GRACIOSA

CASA PARTICULAR ONDE SE  
FOI BUSCAR ELETRICIDADE.



Antenna Type:

Include a sketch showing how the height was measured.



# Campanhas TANGO

Oportunidade para desenvolver capacidades artísticas...

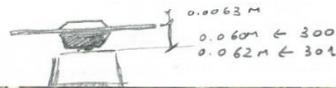


Circle appropriate Antenna Type Include a sketch if the height was measured differently than shown.

Trimble 4000  
SDT, SST, SSE

Trimble 4000  
SLD

Ashtech XII



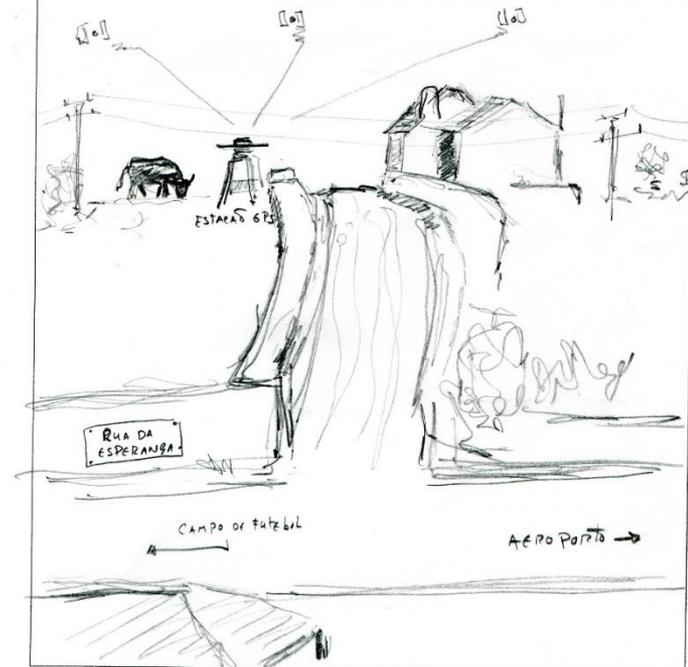
## Site Description

AÇORES 3

Station Name AEROPORTO/FLORES 4 Char ID FLO3  
 Location AEROPORTO Sª CRUZ / ILHA DAS FLORES  
 Operator CLARA LAZARD Station ID #  
 Institution NUOVO LIMA  
 UNIVERSIDADE DO PORTO E IICT

Chart with location of station. Shortly describe the site and the way to reach it. Comment the station visibility above horizon.

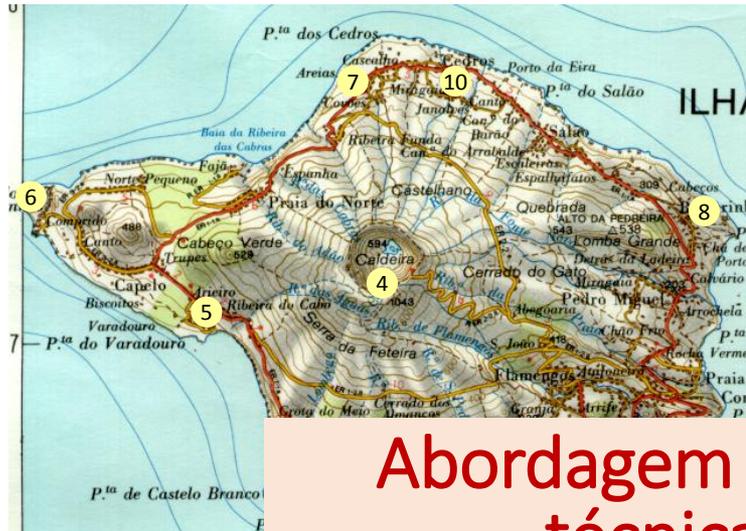
A SUDESTE DA ESTACÃO ENCONTRAM-SE DUAS CASAS QUE PODERÃO OBSTRUIR A VISIBILIDADE ATÉ 20° ACIMA DA ESTACÃO.



# Campanhas TANGO

Gravimetria: Primeiras medidas absolutas nos Açores

- Estabelecimento da estação absoluta no Faial



**Abordagem multi-técnica**

<p>Operador:</p> <p>Nome da Estação: Monte das Necessidades - Estação absoluta</p> <p>Lat.                      Long.                      Alt.                      2</p>
<p>Esquema com a localização do ponto estacionado ou fotografia</p>
<p>Explicar acesso ao ponto</p> <p><u>NOTA:</u> Tentativa de construção de uma estação absoluta no Observatório (Monte das Necessidades). A ideia foi, logo de seguida, abandonada e tudo o que foi feito foi destruído. A estação absoluta actual está na fidal já existente.</p>



# Campanhas TANGO

1988 - 1994

264

*L. Bastos et al. / Tectonophysics 294 (1998) 261–269*

Table 1  
Summary of the main GPS campaigns

Stations		1988		1991		1993		1994	
Area	point/island	days	hours	days	hours	days	hours	days	hours
Continent	Porto	3	3	6	8	4	6	6	14
	Cascais	4	3	6	4	4	6	6	14
	Lagos	3	3	6	8			6	14
Azores	St. Miguel	3	3	6	8	4	6	6	14
	Sta. Maria	3	3	5	8			6	14
	Terceira	10	12	5	8	3	6	6	14
	Graciosa	4	3	4	8			6	14
	S. Jorge	2	3	4	8			6	14
	Pico	2	3	3	8			6	14
	Faial	4	3	3	8	4	6	6	14
	Flores	3	3	4	8	3	6	6	14
	Corvo	2	3	3	8			6	14
Madeira	Funchal	10	12	6	8			6	14
Strait of Gibraltar	Cadiz			5	8			6	14
	Ceuta			5	8			6	14
Canary	Maspalomas			5	8			6	14
	Lanzarote			5	8			6	14
	Hierro			5	8			6	14
	La Palma			5	8			6	14
Caribbean	Martinique	4	12					6	14
	Guadaloupe	4	12					6	14

# Campanhas TANGO

## Resultados iniciais

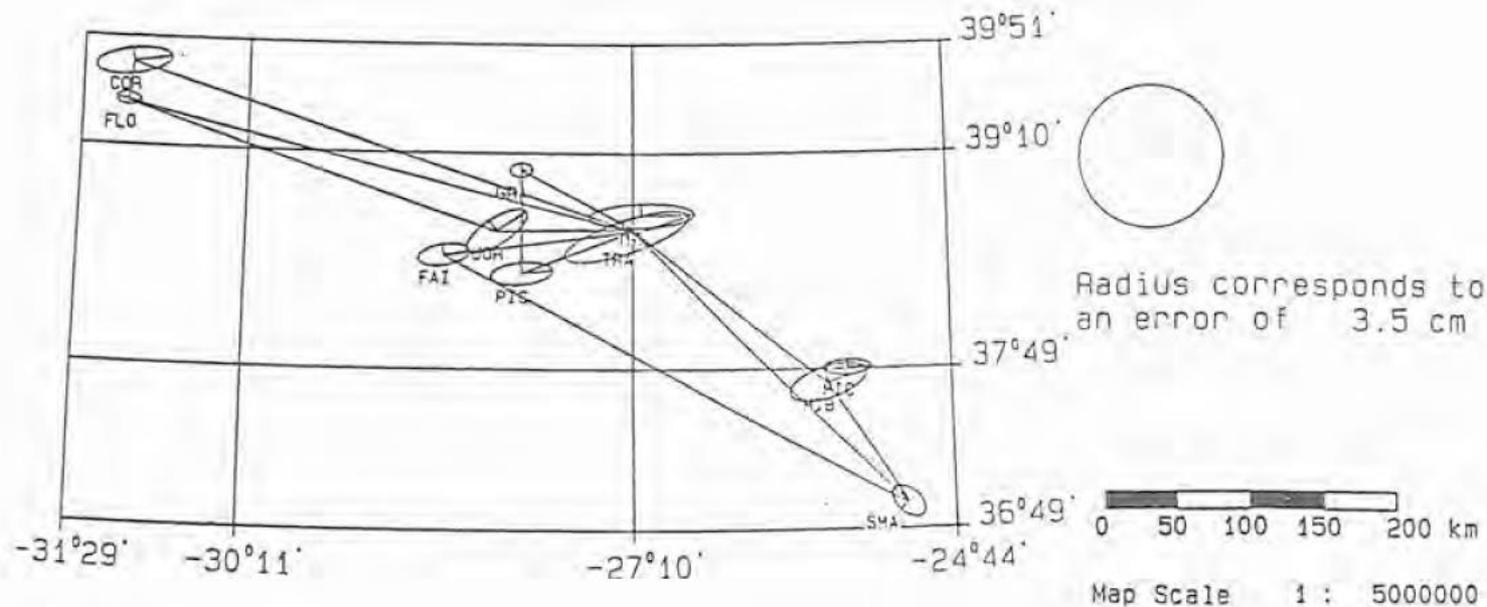


Table 2. Preliminary results with broadcast ephemeris.

Baseline from Westford to	Day	Distance [m]	Scale Difference to day 338 [ppm]
Bermuda	332	No data in Westford	
"	333	1282210.764	-0.3432
"	334	Sat 6 unhealthy	
"	335	1282211.089	-0.0897
"	336	11.023	-0.1410
"	337	10.764	-0.3432
"	338	11.204	-
Martinique	336	3213913.809	-0.0772
"	337	12.900	-0.3581
"	338	14.051	-
After applying scale factor derived from Westford - Bermuda			
Martinique	336	3213914.256	-0.0640
"	337	14.002	-0.0152
"	338	14.051	-

Table 1. Standard deviations for adjusted positions in centimeters (Terceira was fixed).

Station	$\sigma_{\text{North}}$	$\sigma_{\text{East}}$	$\sigma_{\text{Height}}$
Terceira / Observatory	-	-	-
Terceirs / Angra	0.4	0.9	0.9
Terceira / Lages	0.7	2.6	1.8
S. Miguel / S. Braz	2.0	5.1	5.4
Pico / Porta da Ilha	1.8	5.0	5.0
Corvo	7.3	14.8	13.1
Flores	7.2	14.4	13.1
S. Miguel / Cais	1.6	4.5	4.8
S. Jorge	7.2	15.0	14.3
Sta. Maria	1.5	4.2	4.6
Graciosa	1.1	3.4	3.3
Faial	1.4	3.9	3.7



# Campanhas TANGO

- 1988 – GPS
- 1991 – GPS
- 1992 – GPS e gravimetria (absoluta e relativa)
  - Estação VLBI móvel estabelecida em S. Miguel
- 1993 – GPS
- 1994 – GPS e gravimetria (absoluta e relativa)
- 1997 – GPS e gravimetria (absoluta e relativa)
- 1999 – Início da mudança de estações ocasionais para estações permanentes.



# Colaborações Institucionais

- Portugal

- Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
- **Instituto Português de Cartografia e Cadastro**
- Força Aérea Portuguesa
- Secretaria Regional de Habitação e Equipamentos
- Observatório Meteorológico José Agostinho, Terceira
- Observatório Meteorológico Príncipe Alberto do Mónaco, Faial
- Observatório Meteorológico Afonso Chaves, S. Miguel
- Universidade dos Açores
- Câmara Municipal de Vila do Porto
- Câmara Municipal de Sta. Cruz das Flores

- Portugal (cont.)

- Instituto de Ciências da Terra e do Espaço
- Instituto de Investigação Científica Tropical
- Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- Instituto Superior Técnico

- Germany

- University of the Federal Armed Forces
- Institute of Astronomy and Physical Geodesy, Technical University Munich
- BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

- Finland

- Finnish Geodetic Institute



# Colaborações Institucionais

- Netherlands
  - University of Delft
- Austria
  - Austrian Academy of Sciences, Graz
- Spain
  - ROA (Real Instituto y Observatorio de la Armada)
  - IGN (Instituto Geográfico Nacional)
  - SGE (Servicio Geográfico del Ejército)
- Denmark
  - Kort-og-Matrikelstyrelsen
- France
  - IGN (Institut Géographique National)
- Switzerland
  - ETH (Eidgenössische Technische Hochschule)

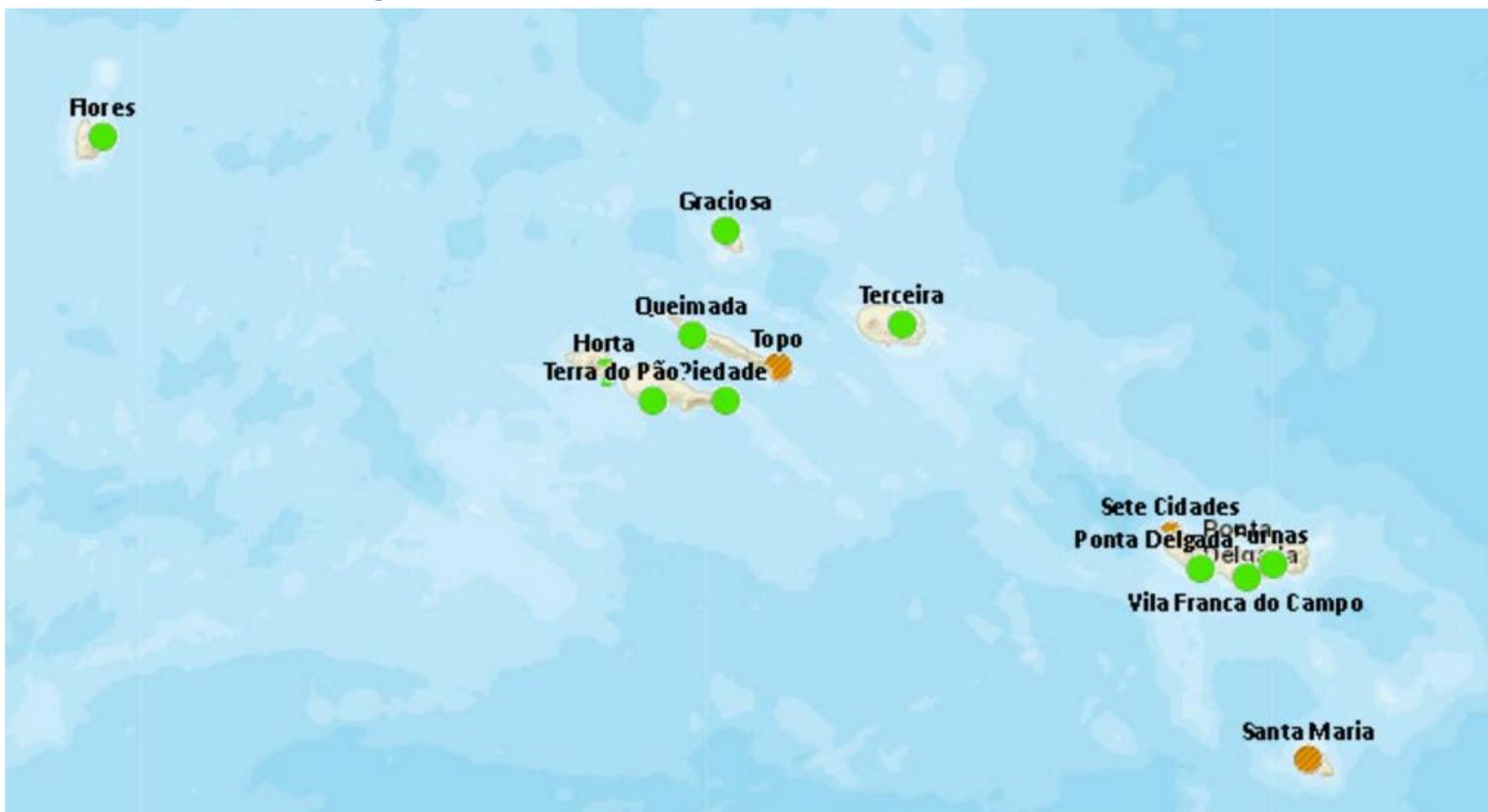


# Evolução da rede GPS nos Açores

- 1999 a 2001 - novos projetos complementares (Navarro et al., 2003; Fernandes et al., 2004) foram desenvolvidos, proporcionando uma melhor cobertura espacial, em particular no Grupo Central, com a **densificação da rede de estações** em cada ilha.
- Na década de 90 era já evidente que o objetivo de medir deformações horizontais com uma **precisão de 5 mm/ano** poderia em breve ser alcançado.
- Existência de registo de **mais de 20 anos de dados de campanhas GPS periódicas** na zona dos Açores.
- A partir de 1999 a rede GPS dos Açores começou a evoluir para **estações permanentes** (REPRAA, IVAR, FCUP, UBI...).

# Estações permanentes actuais nos Açores

- REPRAA – 10 estações (brevemente 12)
- IVAR – 10 estações adicionais





## Aumento de precisão

- No final da década de 90 assistimos a um aumento na precisão obtida com o **GPS** que passou **de centímetros para milímetros** nas soluções de posicionamento obtidas a partir das **redes permanentes** (posicionamento relativo usando medidas de fase).
- As metodologias de processamento mais utilizadas foram as Diferenças Duplas (**DD, Double Differences**) e as Diferenças Simples (**SD, Single Differences**).



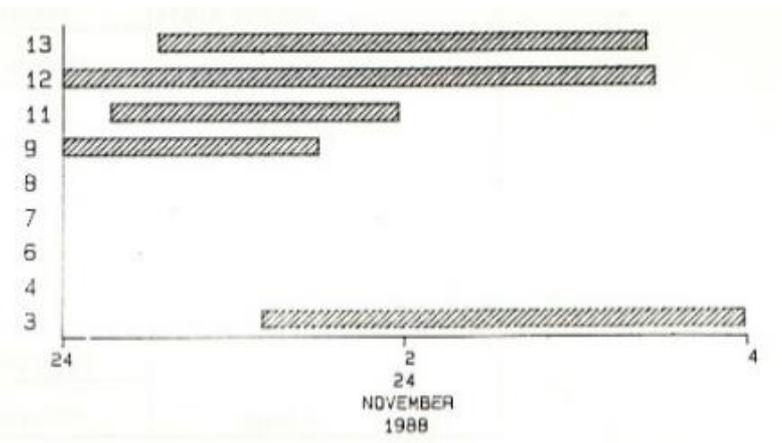
# Novas abordagens necessárias

- Sistema de Referência
- Resolução da ambiguidade da fase
- Correções Geofísicas
  - Correções de maré
  - Expansão térmica
  - Ajuste isostático
- Análise das séries temporais
  - Sinais periódicos
  - Correlação temporal e espacial
  - Ruído: propriedades e correlação espacial
- Monumentação
- Órbitas
- Correção dos erros com origem na ionosfera e troposfera
- Os problemas de hardware tornaram-se também mais evidentes (variação do centro de fase da antena, bias dos canais, ...)

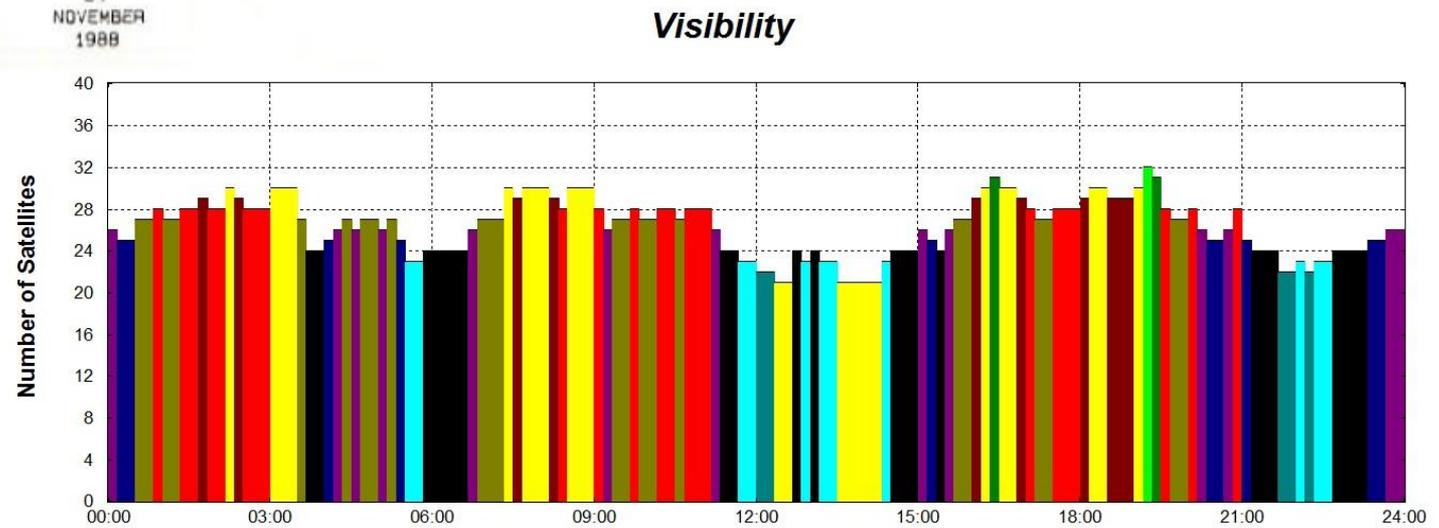


# Resultados recentes

## Melhoria na visibilidade dos satélites



Visibilidade dos satélites: 1988 e 2017

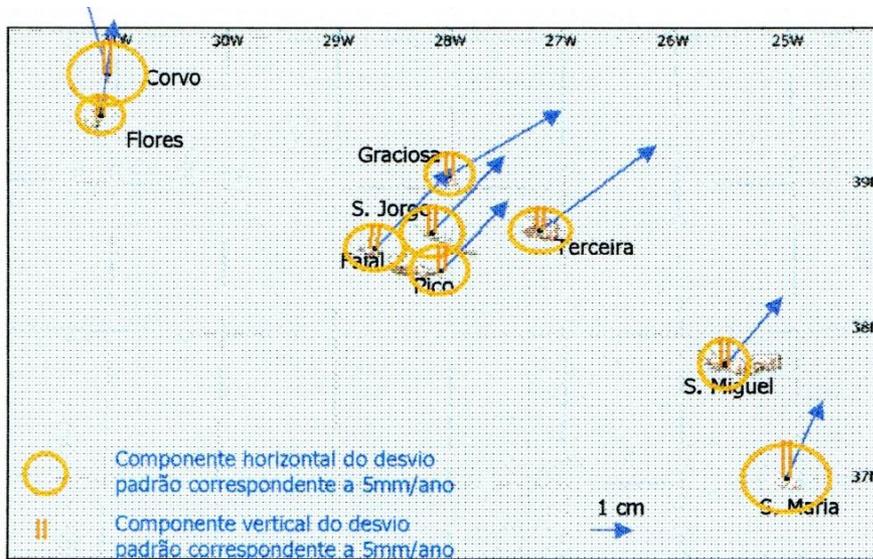


Station Near: Lajes Azores North 37° 50' West 27° 6' Height 0m  
 Satellites 54 GPS 31 Galileo 24 Galileo 13 Compass 14 WAAS 12 [almanac alm (23-06-2017)]  
 Elevation cutoff 0° Obstacles 0%  
 Time 23-06-2017 00:00 - 24-06-2017 00:00 (UTC+0.0h)

# Resultados recentes

## Direcção e intensidade do movimento idênticas

• 1998



• 2015

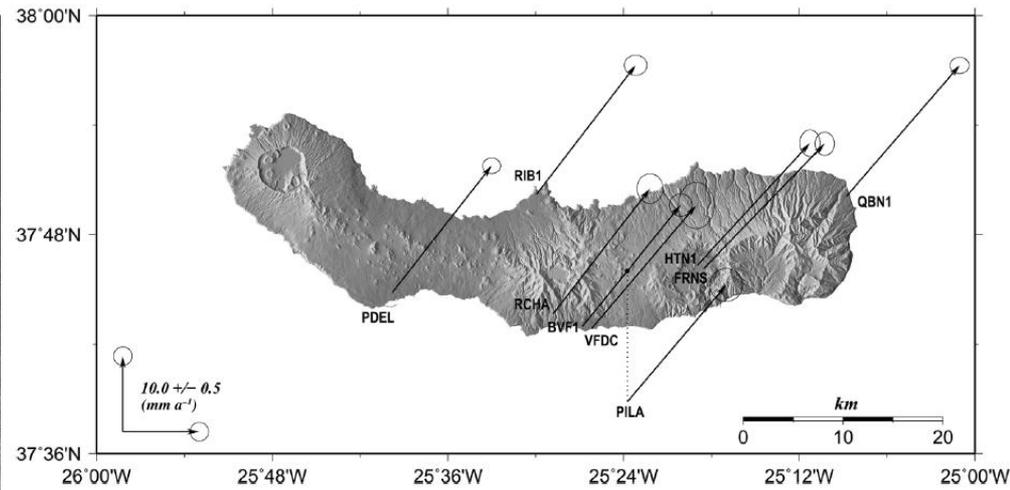


Fig. 18.5. ITRF2005 horizontal velocity field in São Miguel Island for the period of April 2008 to May 2013. The error ellipses represent 95% confidence intervals.

### Tectonic and volcanic deformation at São Miguel Island, Azores, observed by continuous GPS analysis 2008–13

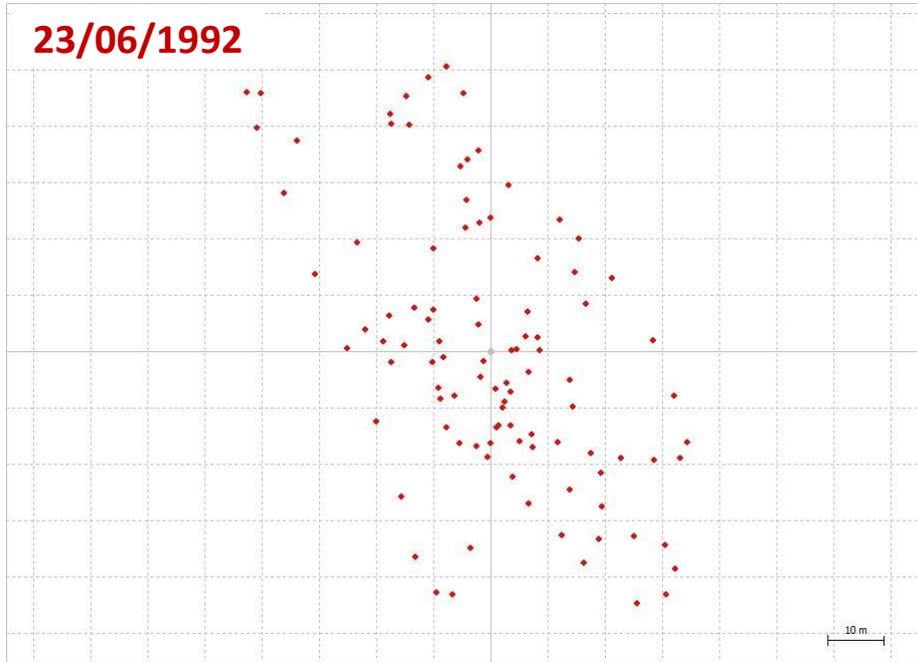
JUN OKADA<sup>1\*</sup>, FREYSTEINN SIGMUNDSSON<sup>2</sup>, BENEDIKT G. ÓFEIGSSON<sup>3</sup>, TERESA J. L. FERREIRA<sup>1</sup> & RITA M. M. T. C. RODRIGUES<sup>4</sup>

Figure 4.1 Annual absolute velocities and standard deviation associated for the Azores Archipelago. It was used the GPS absolute position of the station.

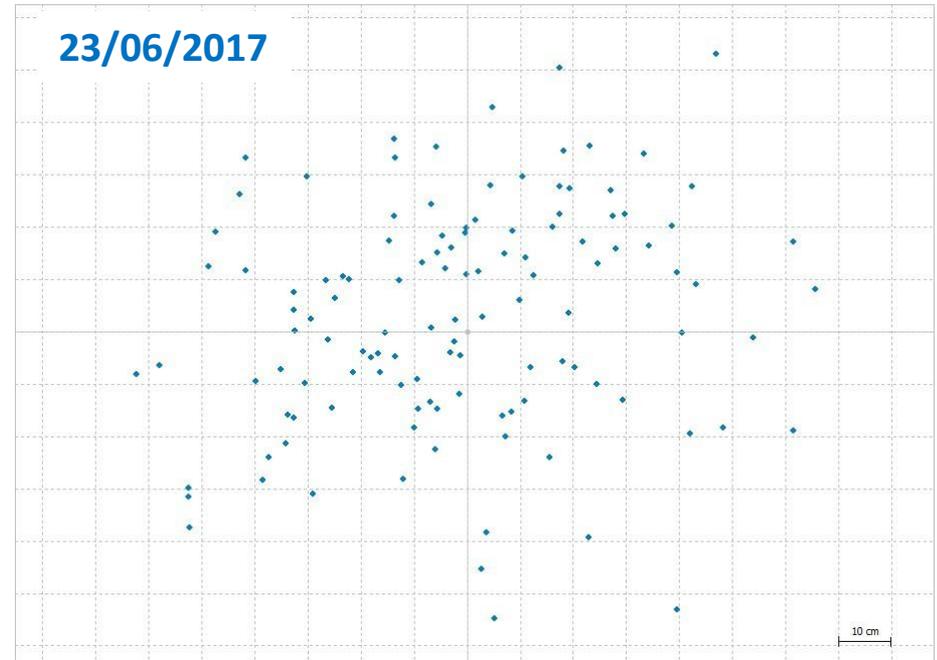
# Resultados recentes

Novos algoritmos/abordagens PP (usando códigos)

23/06/1992



23/06/2017





# Resultados recentes

Novos algoritmos/abordagens PPP

Station AZGR using RTKLIB (units: m)  
(2016)

Days	Results	Coordinates			Internal Precision		
		X	Y	Z	sigmaX	sigmaY	sigmaZ
007		4376062.7266	-2329042.1031	3999949.7214	<b>0.0042</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.0030</b>
008		4376062.7166	-2329042.1028	3999949.7205	<b>0.0038</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.0028</b>
009		4376062.7128	-2329042.1029	3999949.7252	<b>0.0038</b>	<b>0.0035</b>	<b>0.0028</b>

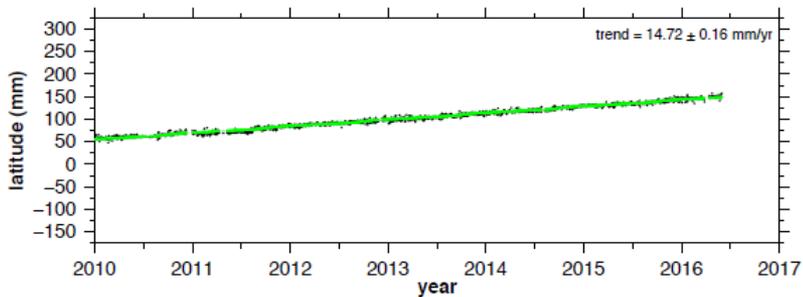


# Resultados recentes (cortesia de Rui Fernandes)

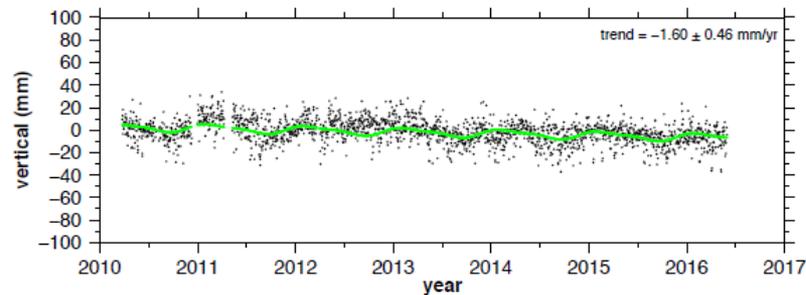
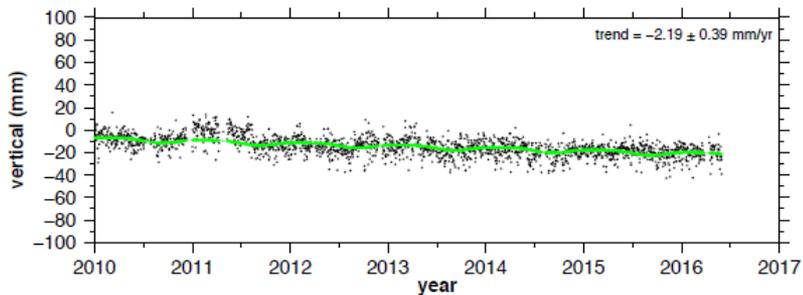
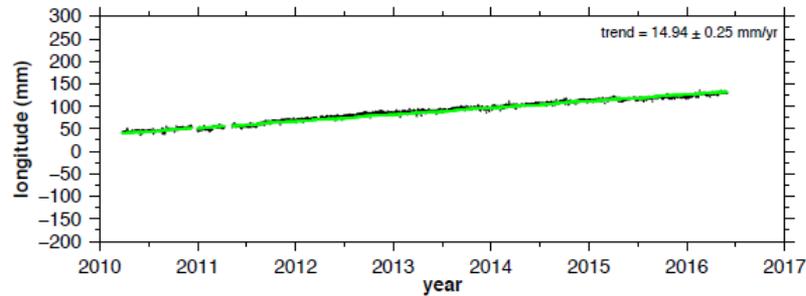
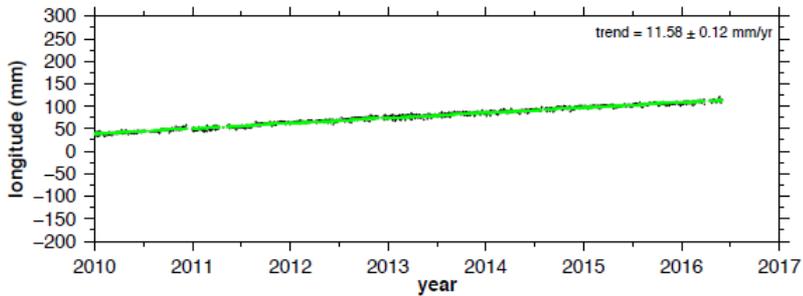
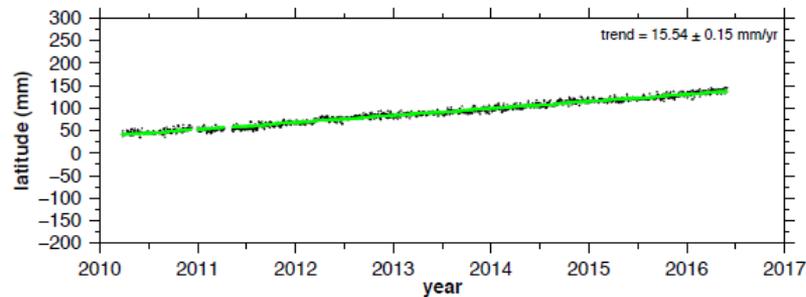
## Novos algoritmos/abordagens PPP

### GIPSY PPP approach (SEGAL solution)

site PIED



site FRNS





# Resultados recentes (cortesia de Rui Fernandes)

## Soluções precisas em tempo real

<http://segal.ubi.pt/realtime/PAGU/>



### PAGU Station



#### Position

Latitude: 38.767311645°  
Longitude: 332.815662727°  
Ellipsoidal Height: 304.538 m

#### Displacement

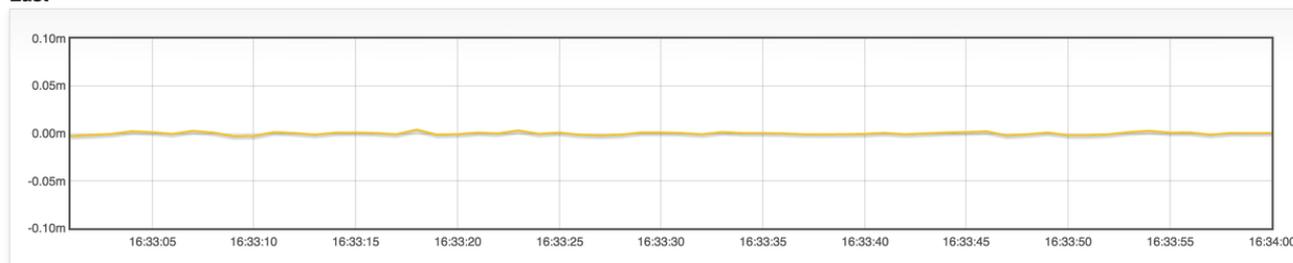
East: 0.000 m  
North: 0.004 m  
Vertical: -0.004 m

#### GPS Time

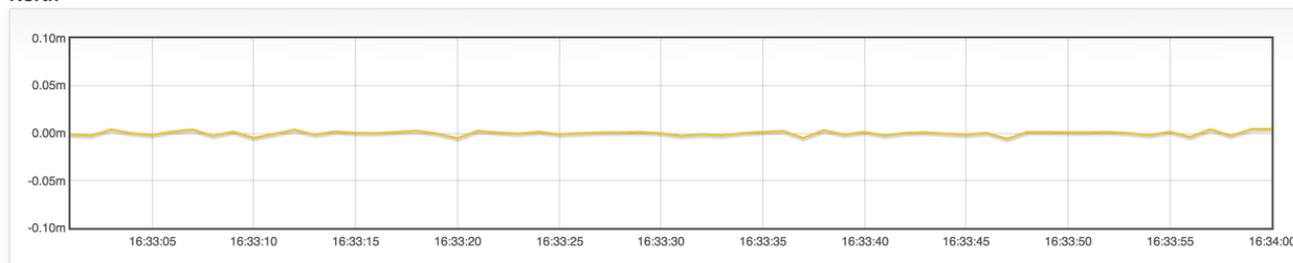
Clock: 12/09/2016 16:34:00.0

#### Alerts

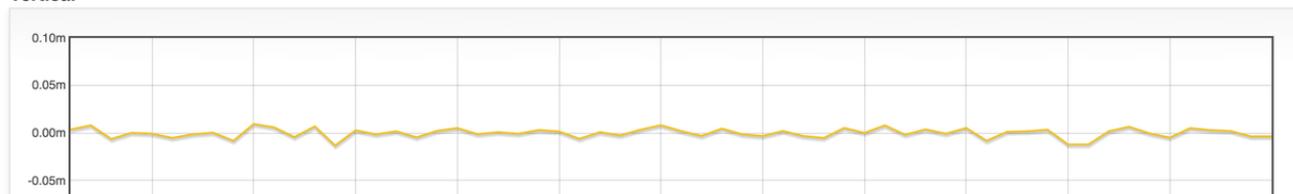
#### East



#### North



#### Vertical



Computed by

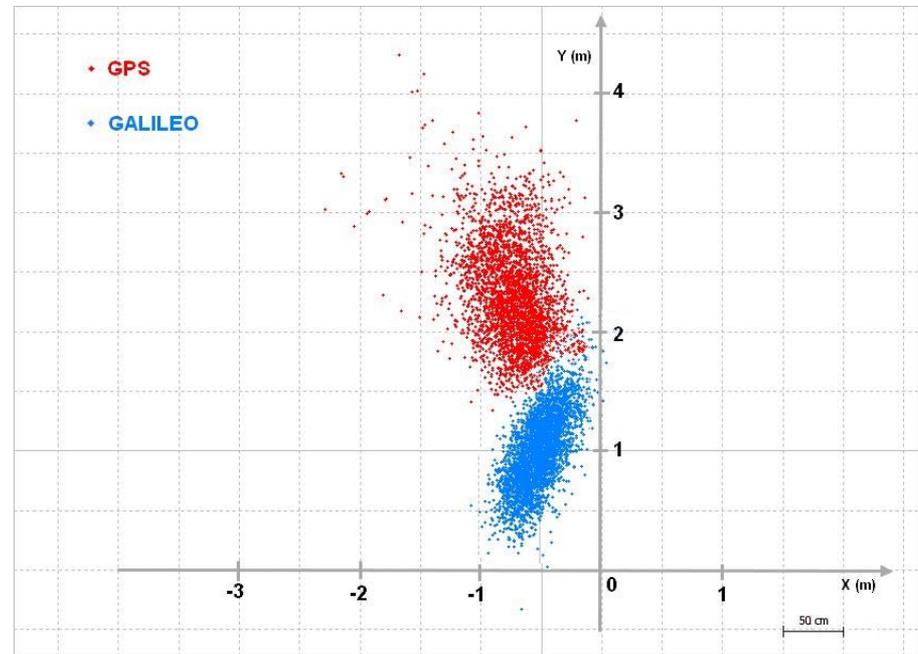
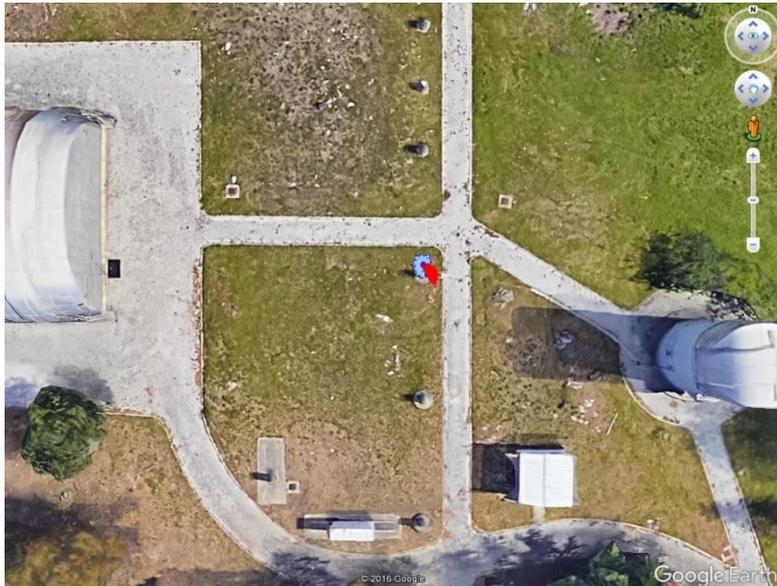


Provided by



# Resultados recentes

Novos GNSS + Soluções PP (usando códigos)



- GPS (azul) e Galileo (vermelho)



# Evolução

- Nas últimas 3 décadas houve muitos desenvolvimentos no estabelecimento de redes permanentes e nas metodologias de processamento.
- Na última década, a precisão **PPP** (Precise Point Positioning) melhorou **dos dm para os cm**.
- Actualmente, usando o **PPP**, é possível obter **precisões milimétricas** no processamento de observações das estações permanentes.

## Processamento Multi-GNSS PPP (Guochang Xu, 2007)

Station AZGR (units: m)

Results Days	Coordinates			Internal Precision		
	X	Y	Z	sigmaX	sigmaY	sigmaZ
007	4376062.7175	-2329042.1007	3999949.7085	<b>0.0028</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0024</b>
008	4376062.7221	-2329042.0916	3999949.7135	<b>0.0028</b>	<b>0.0018</b>	<b>0.0025</b>
009	4376062.7202	-2329042.1054	3999949.7255	<b>0.0028</b>	<b>0.0020</b>	<b>0.0024</b>



# Novas questões

- Passagem de redes a escalas globais e regionais para escalas locais
- Aumento das taxas de amostragem
- Redução de erros sistemáticos em frequências sísmicas
- Melhores modelos ionosféricos (que permitam lidar com efeitos de cintilação)
- Melhores modelos troposféricos (que permitam considerar os gradientes verticais e horizontais)
- Soluções precisas em tempo quase real (órbitas e relógios)
- Algoritmos de processamento multi-GNSS otimizados
- Bias inter-satélites
- Integração com outros sensors (acelerómetros, giróscópios, inclinómetros, etc.)
- Evolução para abordagens multi-técnica (GNSS, InSAR, imagem) e exploração de plataformas operadas remotamente (ex. UAV)



# Mudança de paradigma

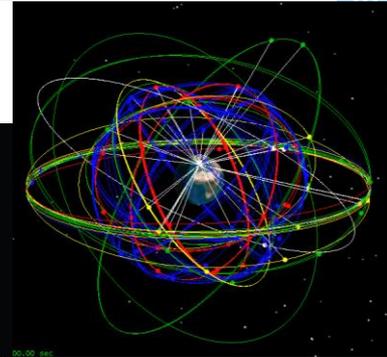
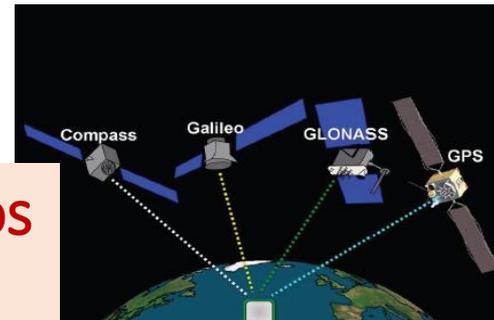
- As redes permanentes constituirão suporte fundamental para a obtenção de **órbitas mais precisas** e de **modelos de ionosfera e de troposfera melhores** e mais detalhados.
- A possibilidade de utilização de receptores multi-GNSS e multi-frequência de baixo custo contribuirá de forma decisiva para que um crescente número de utilizadores possa obter **soluções PPP muito precisas**.
- A melhoria na relação **custo/eficácia** do posicionamento preciso terá um **grande impacto nos utilizadores** e no modo como será feita a monitorização.



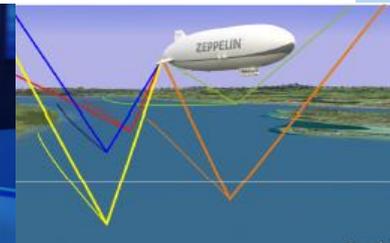
# Novas oportunidades e desafios

- Novos GNSS (mais de 100 satélites em 2020) e novos sinais

Integração de Sensores e dados  
Multi-GNSS, Multi-sensor



- Novas plataformas e desenvolvimentos tecnológicos (UAVs, ASVs, maior capacidade de processamento, comunicações mais fáceis/rápidas/baratas na transferência de dados)





## Perspectivas futuras

- Os sistemas GNSS contribuirão decisivamente para desvendar processos ligados aos fenómenos **sismotectónicos**, e também **meteorológicos**, constituindo um passo decisivo **na avaliação de risco**.
- **Serão disruptivos também em muitas outras aplicações.**
- Os desenvolvimentos, quer a nível tecnológico quer a nível de algoritmos de processamento, levarão ao aparecimento de **novas aplicações que dificilmente antecipamos.**



***Um agradecimento especial às pessoas e instituições que apoiaram a implementação do Rede TANGO contribuindo para a exploração dos GNSS em Portugal***

***Obrigada pela vossa atenção!***