

Sistemas de Posicionamento

José P. Molin
ESALQ/USP
jpmolin@usp.br



www.agriculturadeprecisao.org.br

Objetivo

Abordar os sistemas de posicionamento por satélites, sua constituição, funcionamento, fontes de erros e sistemas de correção desses erros.

Sistemas de Navegação Global por Satélites - GNSS

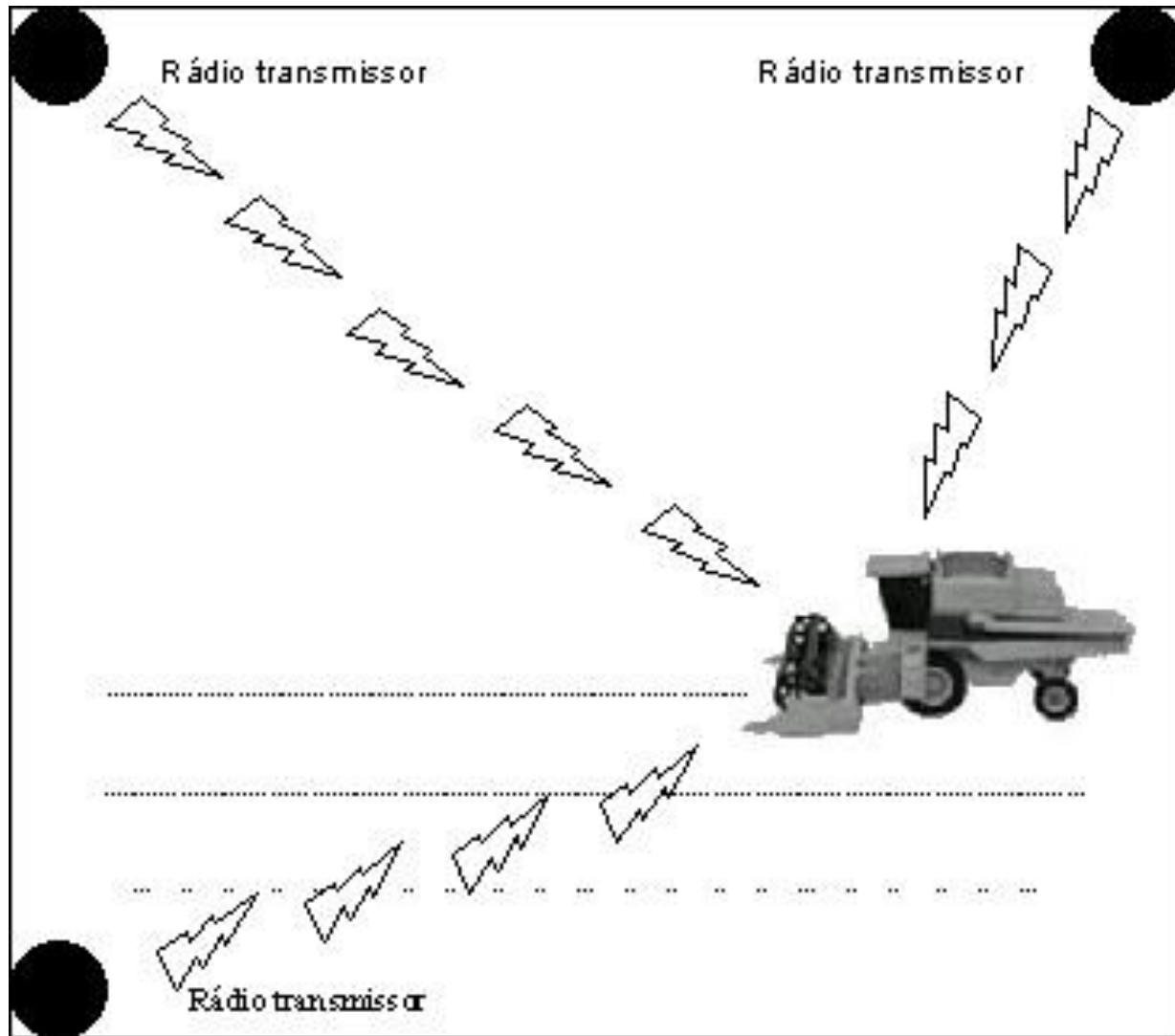
Funcionando:

- GPS (Global Positioning System) – EUA.
- GLONASS (GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema) – Russia.

Em construção:

- Galileo (União Européia)
- BeiDou Satellite Navigation System (BDS) (Compass) - China

Posicionamento local por triangulação via rádios



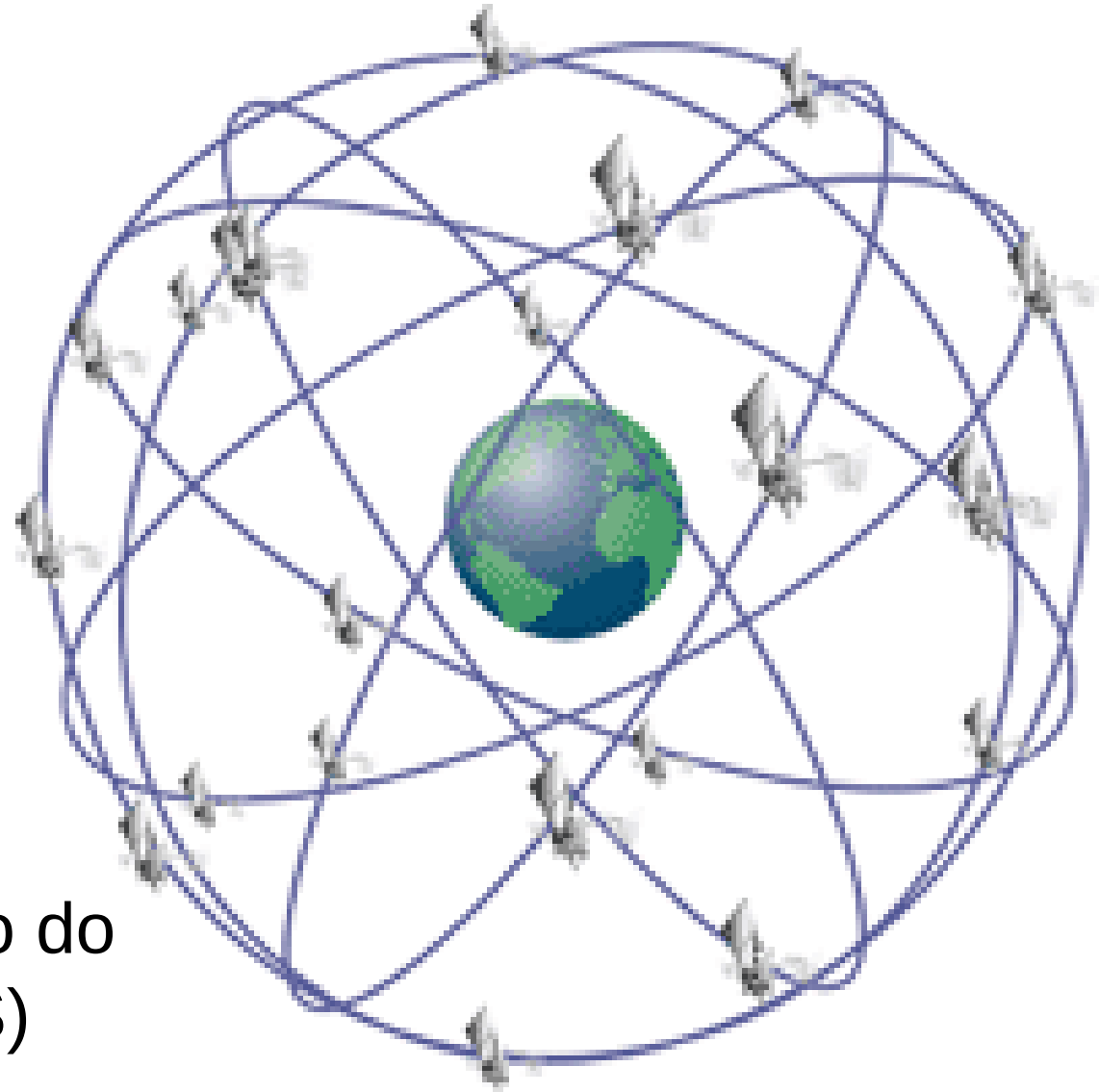
Posicionamento local por triangulação via rádios sendo utilizado nos trabalhos pioneiros de desenvolvimento de monitores de produtividade para grãos (1984/85) na Dinamarca



Como são formados os sistemas

- Segmento Espacial
- Segmento de Controle
- Segmento do Usuário

Segmento Espacial



A Constelação do
Sistema (GPS)

Os satélites

GPS Constellation Status

31 Operational Satellites

As of June 1, 2008 (Baseline Constellation: 24)

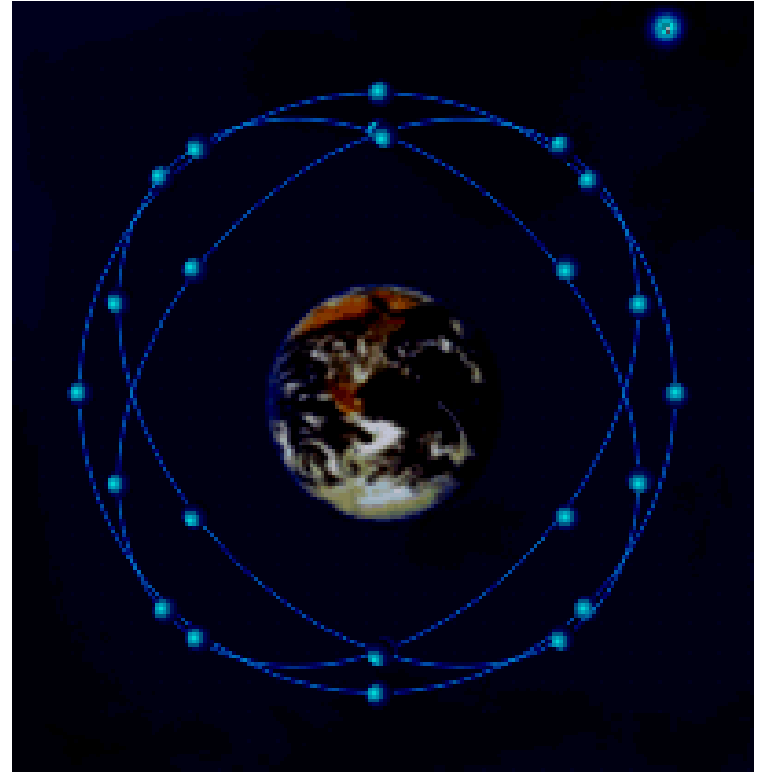
- 13 Block IIA
- 12 Block IIR
- 6 Block IIR-M
 - Transmitting new second civil signal
- Continuously assessing constellation health to determine launch need
 - 2 Block IIR-M's remaining
 - Next launch: September 2008



Kim, Y.J. (2008)

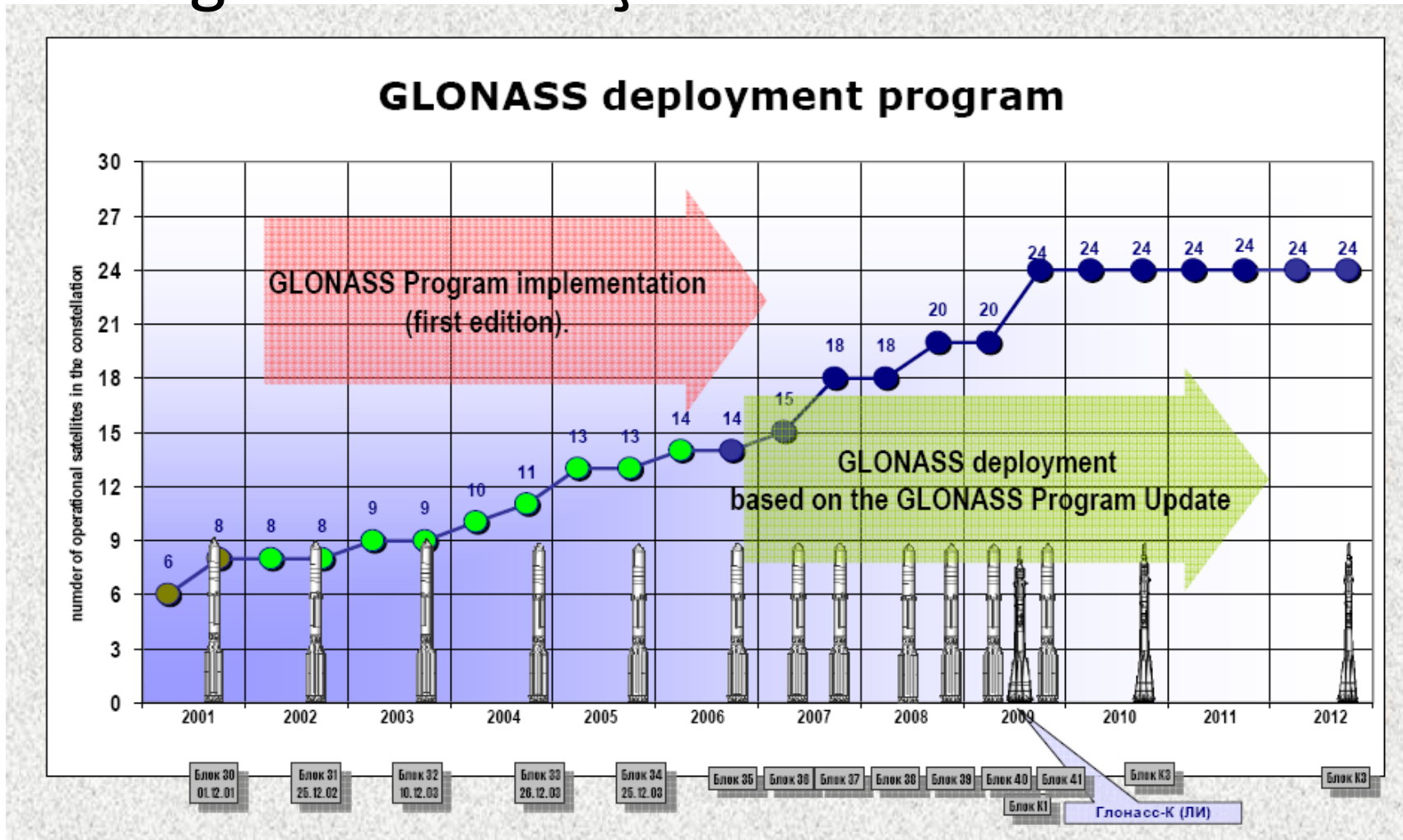
GLONASS Orbits

- Orbit constellation:
 - 24 satellites, 3 planes by 8 satellites
 - Orbit shift by 120° along the equator
- Orbit parameters
 - orbit – circular
 - height 19100 km
 - inclination 64.8°
 - revolution 11h15min



Revnivkykh, S. G (2008)

Programa de lançamentos do GLONASS



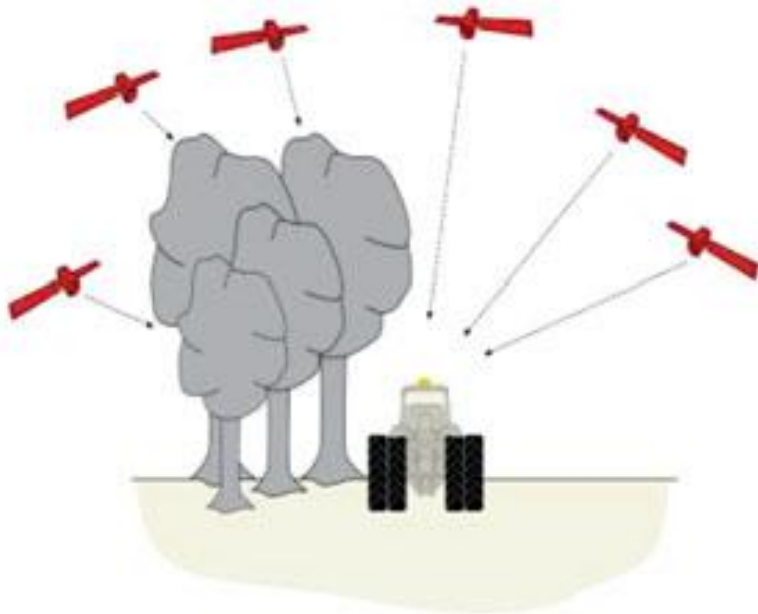
O GLONASS tem aproximadamente 100 satélites falhos em órbita
(Inside GNSS, março/abril, 2009)

Revnivkyh, S. G (2005)

Exemplos de GNSS: Garmin eTrex 10, 20, 30 (GPS + GLONASS)

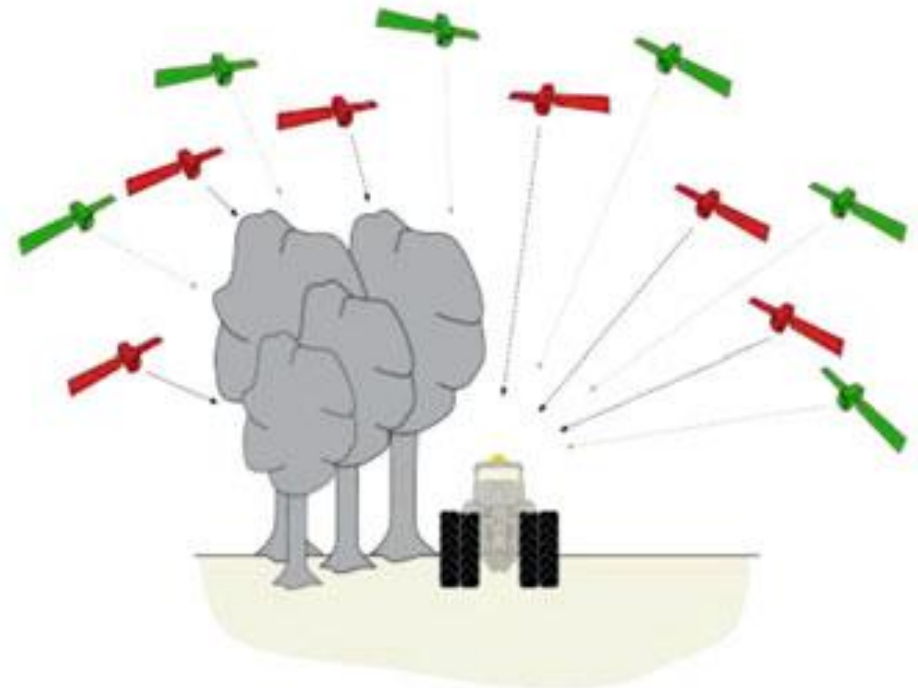


GPS



Sem posicionamento

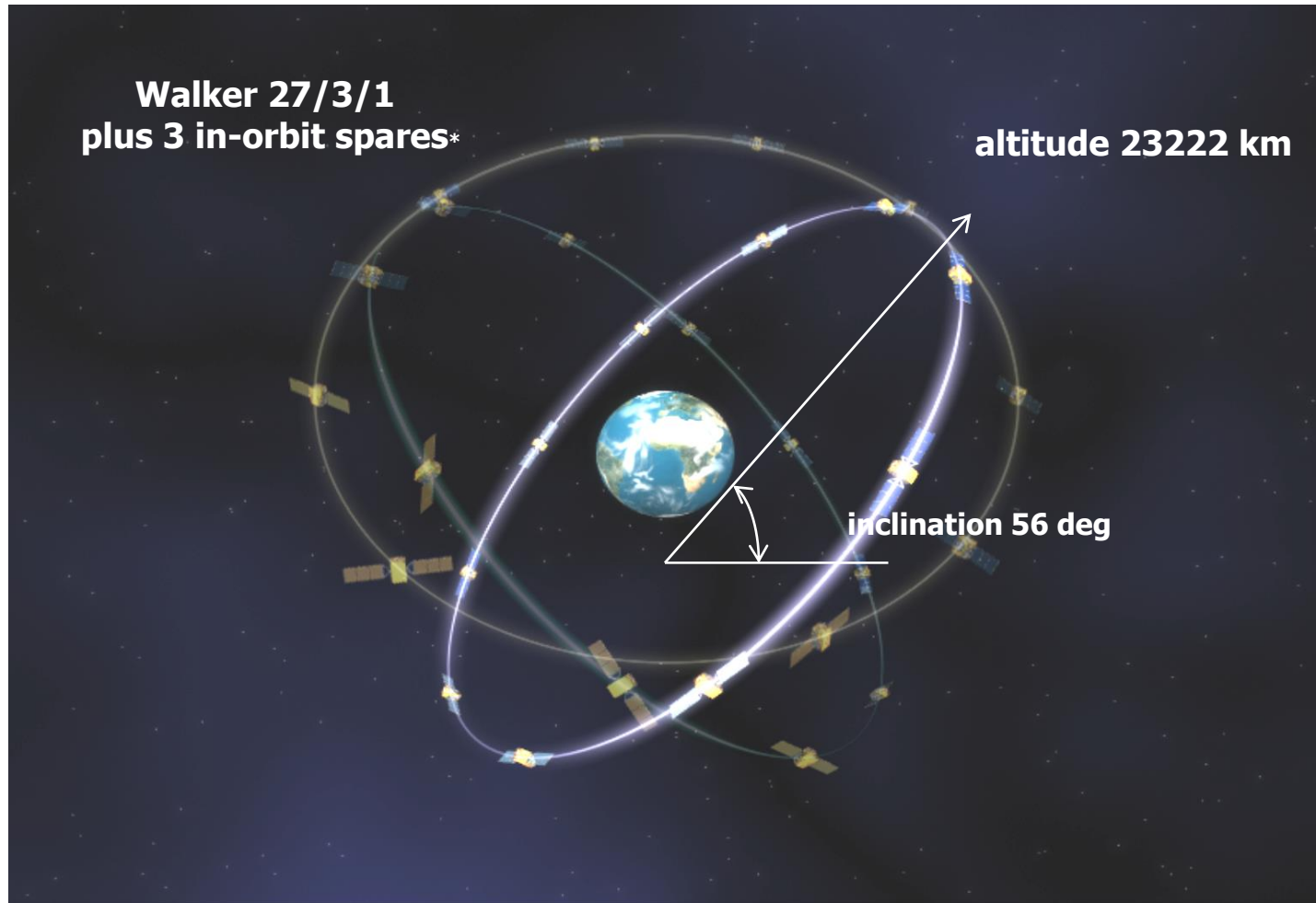
GPS + GLONASS



Com posicionamento

Heege (2013)

Constelação GALILEO



*) passive spares

Lucas, 2004

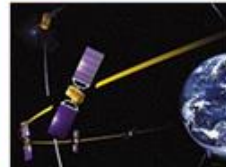
Galileo System Testbed v1
Validation of critical algorithms
2003



GIOVE A/B
2 test satellites
2005/2008



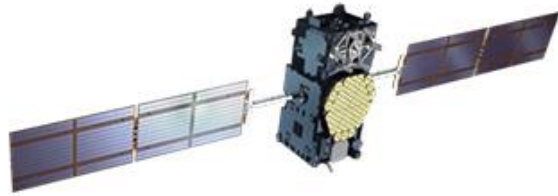
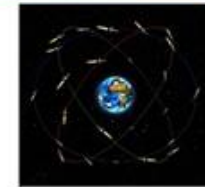
In-Orbit Validation
4 fully operational satellites
and ground segment
2012



Initial Operational Capability
Early services for OS, SAR, PRS
and demonstrator for CS
2014



Full Operational Capability
Full services, 30 satellites
2020



Segmento de Controle

- Estação mestre de controle
- Estações de monitoramento espalhadas pelo mundo

Segmento de Controle (GPS)



L-Band



S-Band



■ MCS at Schriever AFB, CO
& Alternate MCS at VAFB

● 16 Monitor Stations
6 OCS + 10 NGA

▲ 12 Ground Antennas
4 GPS + 8 AFSCN

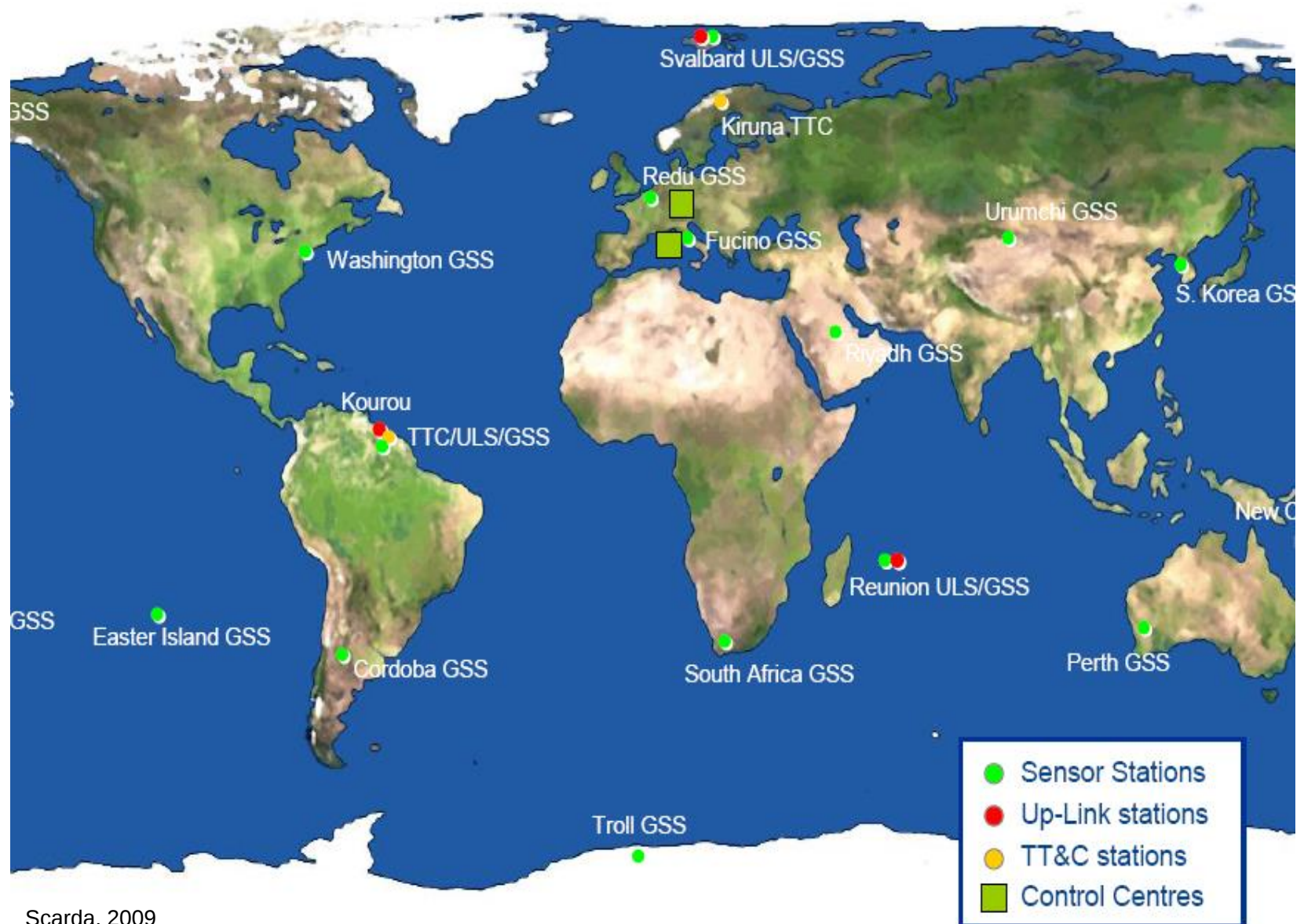


16

■ MCS Master Control Station Schriever AFB
■ AMCS Alternate MCS Vandenberg AFB

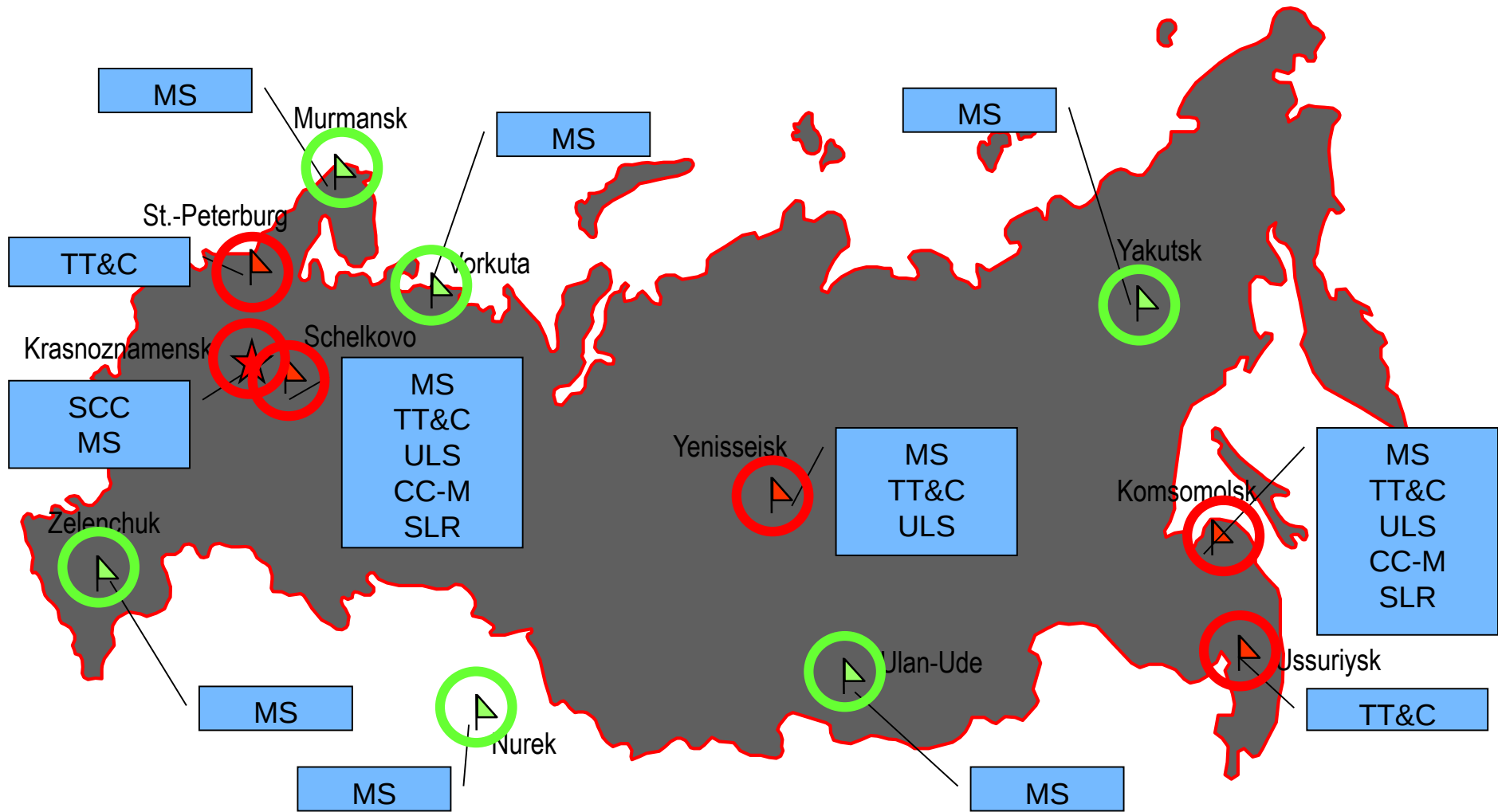
▲ GPS Ground Antennas
▲ AFSCN Remote Tracking Stations

Segmento de Controle (Galileo)



Scarda, 2009

GLONASS Ground Control Segment



Revnivkykh, S. G (2008)

Segmento do Usuário

Os receptores...



Os receptores...

3 m



Grupo I:

Receptores C/A, ou de Navegação, ou Autônomos;
Valores variam de R\$ 500 a 1500

0,03 m

Receptores GPS L1/L2 + Glonass
Valores da ordem de R\$ 40 a 50 mil
(para RTK são necessários dois)

Grupo II:

Receptores L1;
Valores variam de
R\$ 3.000 a 8.000

0,3 m
(na barra de luzes)



Grupo III:

Como Funciona o GPS

- Na constelação GPS existem em torno de 30 satélites
- Cada um é equipado com transmissores e receptores para enviar e receber ondas de rádio
- Os satélites giram a 20.200 km da Terra com um período de 12 h
- As ondas de rádio viajam na velocidade da luz, a $299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$ (aproximadamente 300.000 km s^{-1}) no vácuo.

O receptor mede o tempo gasto para que a onda chegue até ele

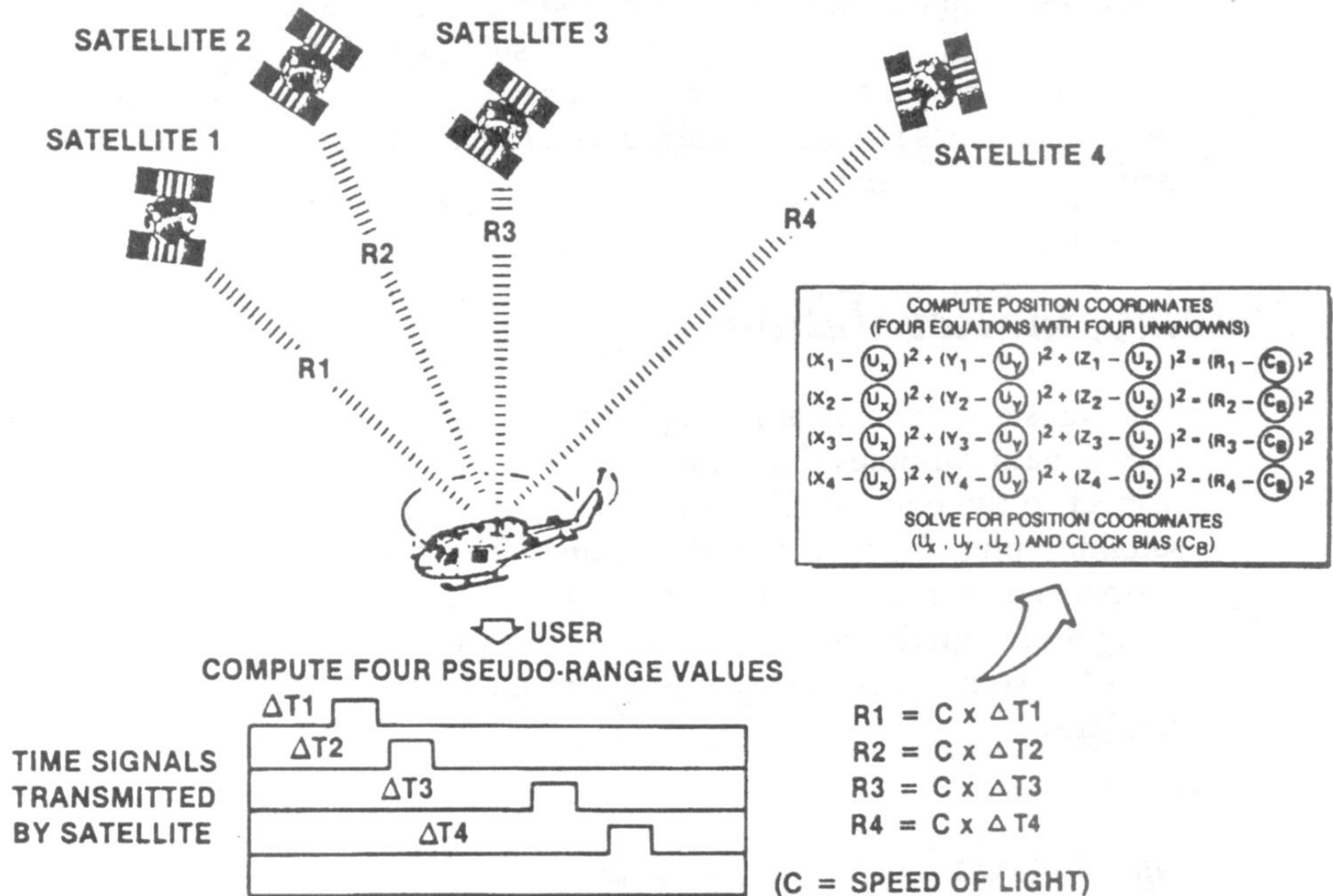
$$d = c \ t$$

d = distância do satélite ao receptor

c = velocidade da luz

t = tempo gasto

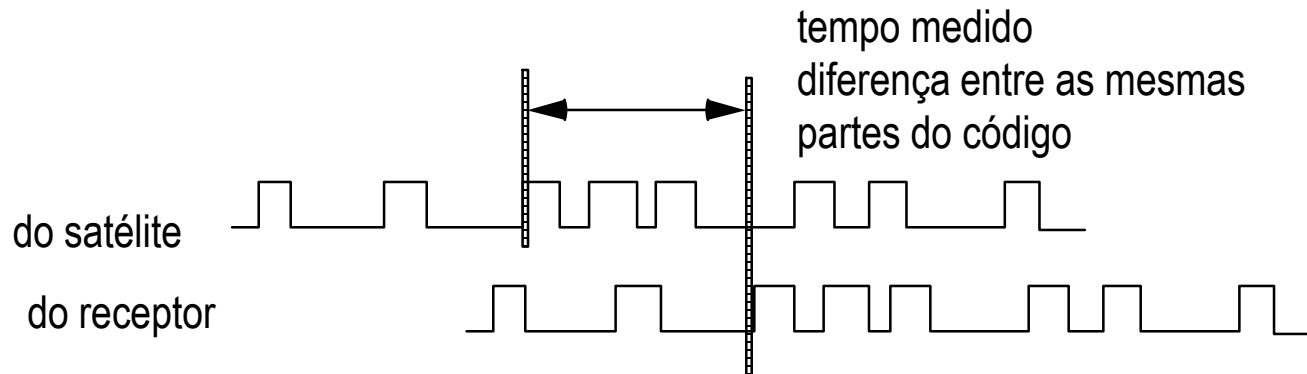
Solução matemática para o GPS



HOFMANN-WELLENHOF (1992)

Como medir o tempo?

- Usar o mesmo código no satélite e no receptor
- Sincronizar satélite e receptor, gerando o mesmo código ao mesmo tempo
- Quando o código chega do satélite se conhece quanto tempo atrás o receptor gerou o mesmo código



Monico, 2000

VISTA

etrex

AVISO

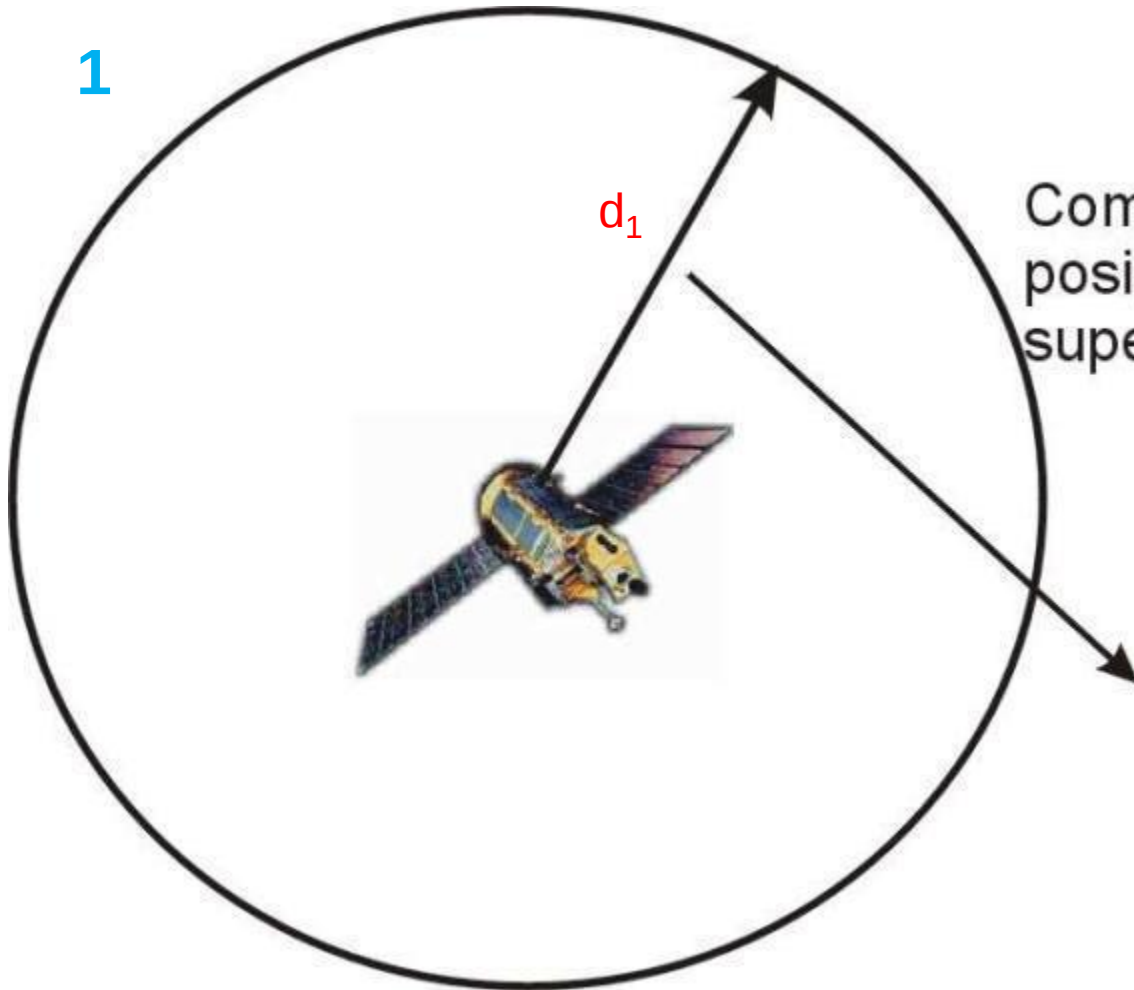
Todos os dados presentes
só para referência.

Assuma toda a
responsabilidade e risco
associados com o uso
deste equipamento.

GARMIN

Um satélite define uma esfera

1

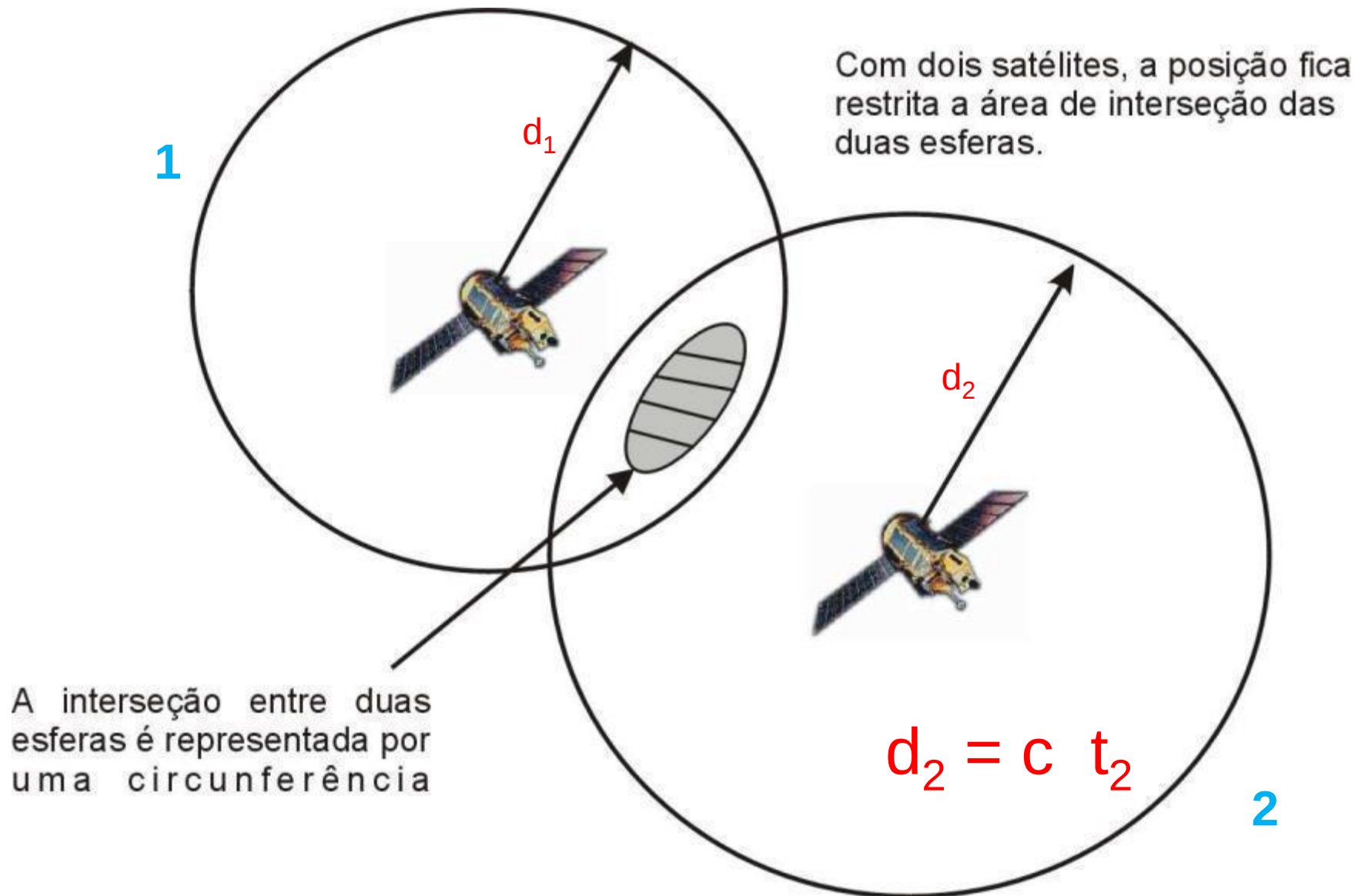


Com apenas um satélite nossa posição está em algum lugar na superfície da Terra.

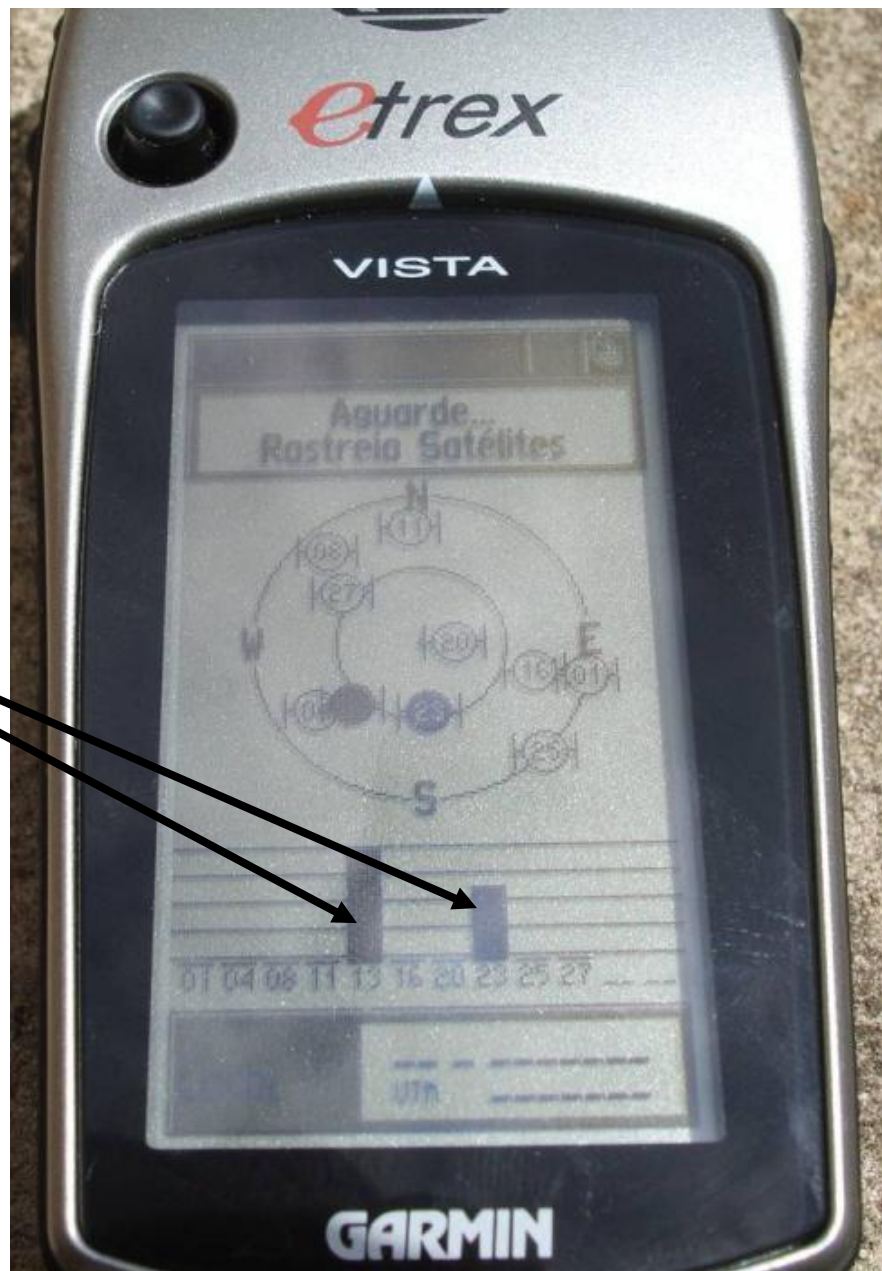
Distância do satélite ao receptor de sinal GPS

$$d_1 = c \ t_1$$

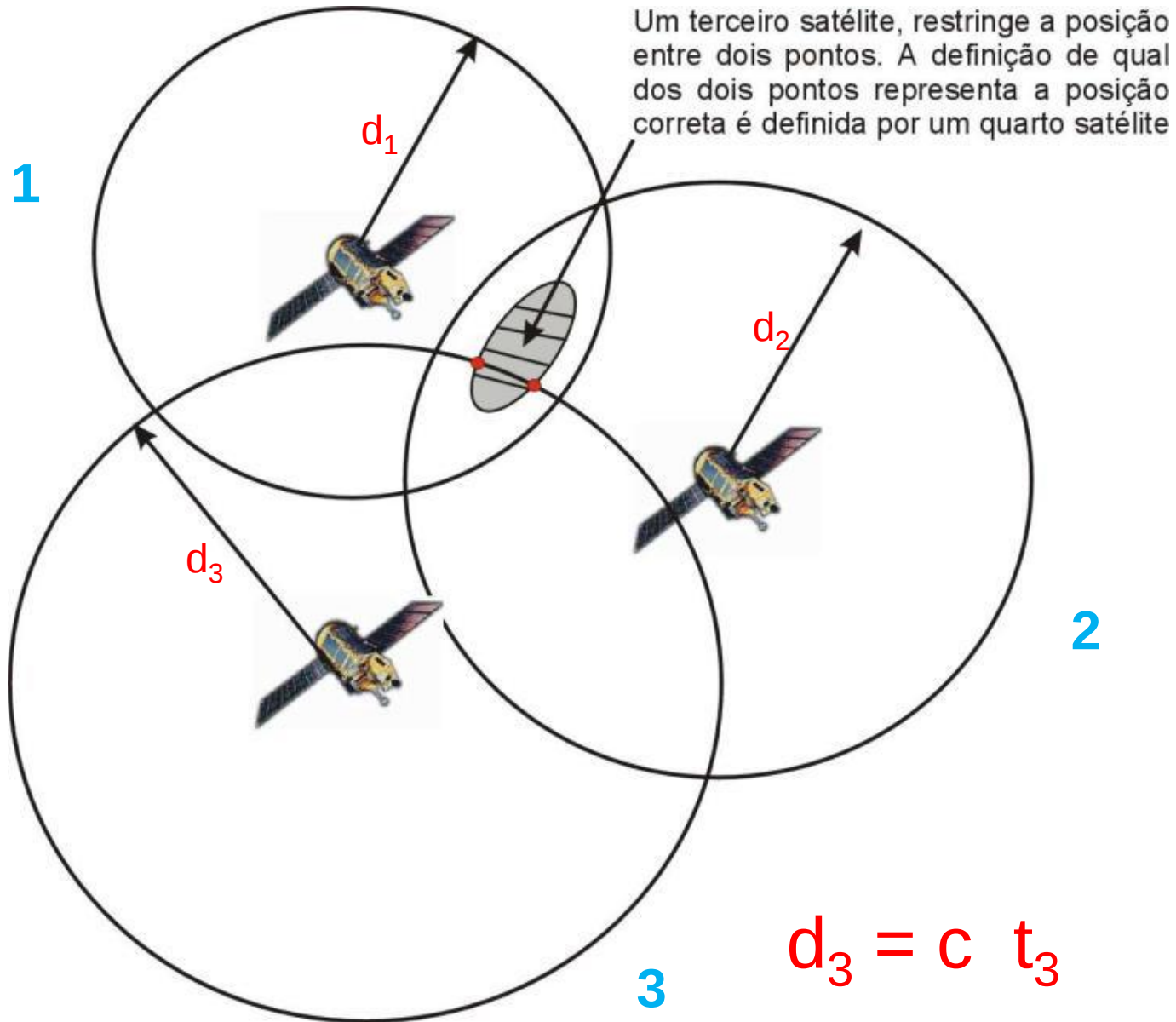
Dois satélites definem uma circunferência



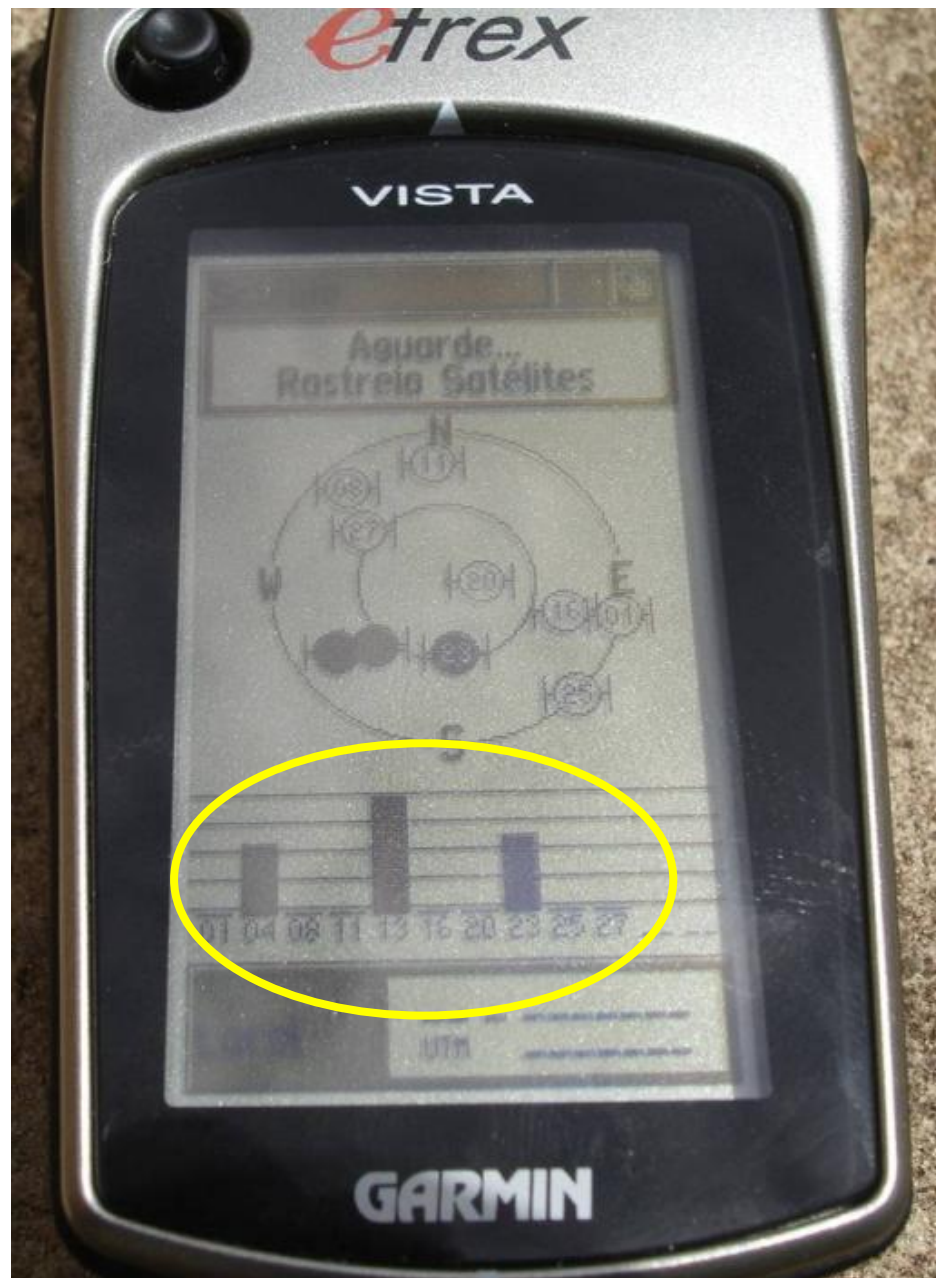
Dois satélites
foram sintonizados



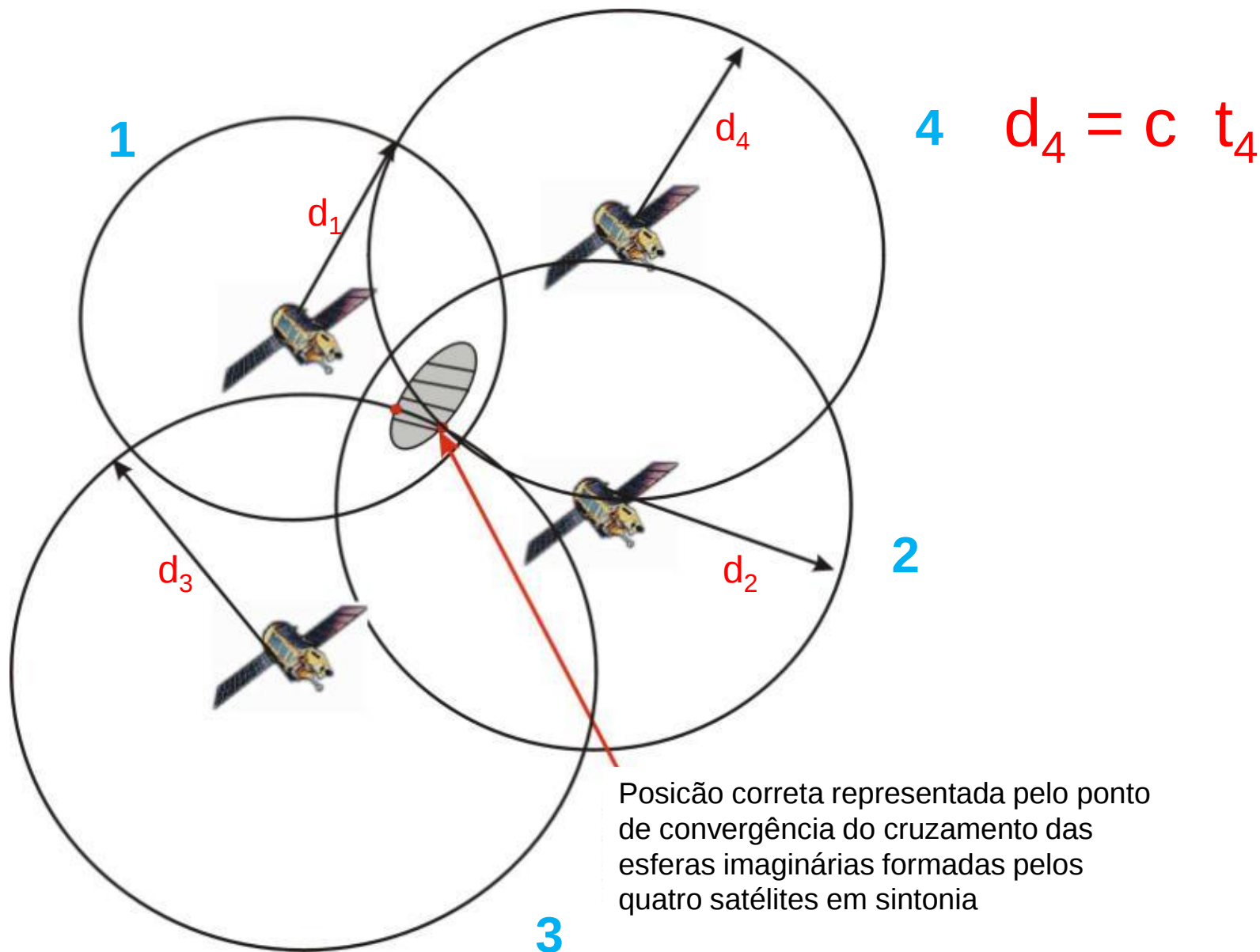
Três satélites definem dois pontos



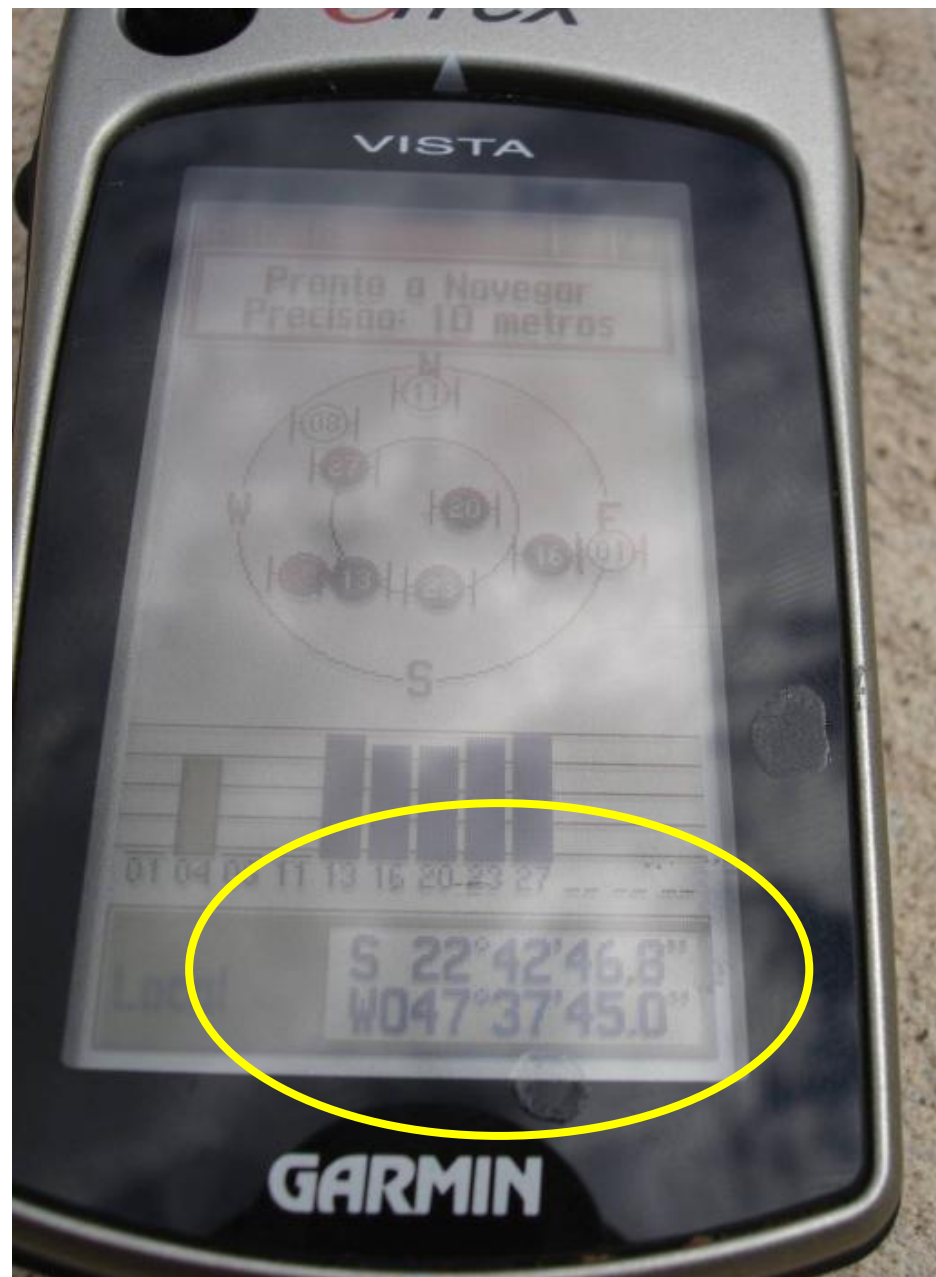
Três satélites
foram sintonizados



Quatro satélites definem apenas um ponto



O receptor já
oferece posição



Especificações do Sistema

For single-frequency C/A-code URE (User Range Error) <http://pnt.gov/public/docs/2008-SPSPS.pdf>



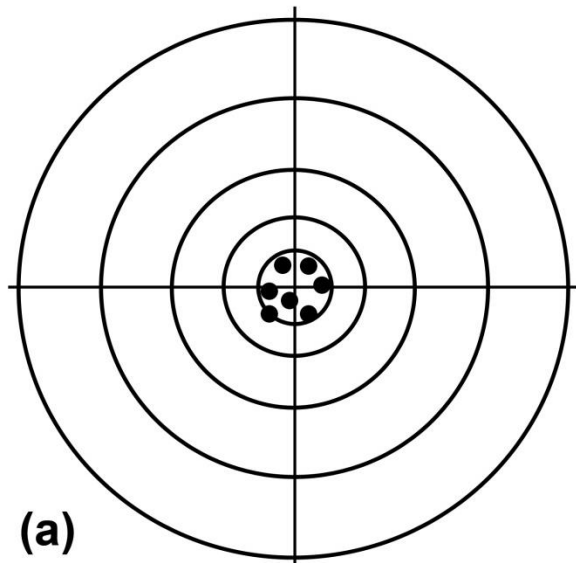
GPS Performance Standard Metric		SPS Signal Specification June 1995 (user performance)	SPS Performance Standard October 2001 (signal in space)	SPS Performance Standard September 2008 (signal in space)
1	Global Accuracy All-in-View Horizontal 95% All-in-View Vertical 95%	≤ 100 meters ≤ 156 meters	≤ 13 meters ≤ 22 meters	≤ 9 meters ≤ 15 meters
	Worst Site Accuracy All-in-View Horizontal 95% All-in-View Vertical 95%	≤ 100 meters ≤ 156 meters	≤ 36 meters ≤ 77 meters	≤ 17 meters ≤ 37 meters
3	User Range Error (URE)	NONE	≤ 6 meters RMS (Constellation RMS URE)	≤ 7.8 meters 95%, (Worst Satellite URE) <i>equivalent to 4 m RMS</i>
4	Geometry (PDOP ≤ 6)	≥ 95.87% global ≥ 83.92% worst site	≥ 98% global ≥ 88% worst site	≥ 98% global ≥ 88% worst site
5	Constellation Availability	NONE	≥ 95% Probability of 24 Healthy Satellites ≥ 98% Probability of 21 Healthy Satellites (assumes 24 primary slots)	≥ 95% Probability of 24 Healthy Satellites ≥ 98% Probability of 21 Healthy Satellites ≥ 99.999% Probability of 20 Healthy Satellites (assumes 24 primary slots)

<http://pnt.gov/public/2008/2008-12-ICG/>

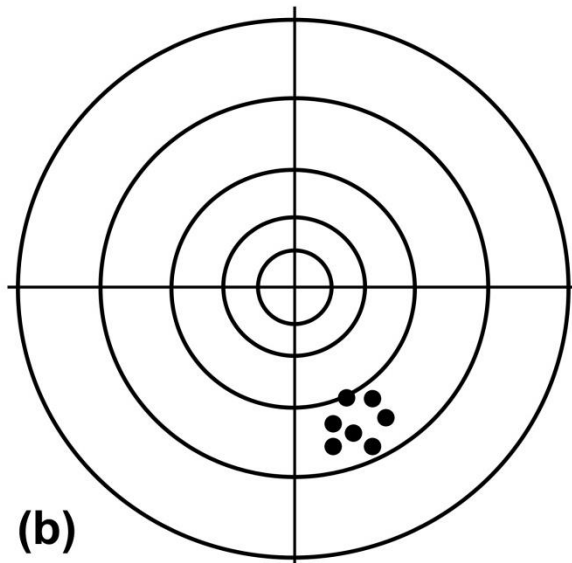
Exatidão dos GNSS e fatores envolvidos

Relembrando:

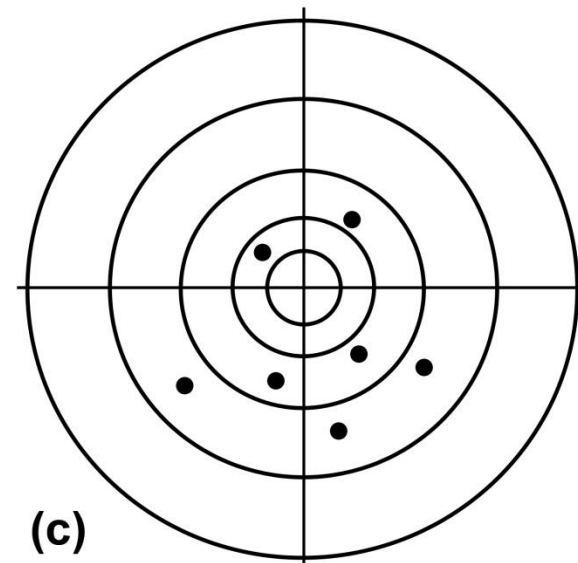
- Exatidão ou Acurácia – grau de aproximação da grandeza mensurada em relação ao valor verdadeiro
- Precisão – repetibilidade na mensuração de uma dada grandeza
- Resolução – é o menor intervalo de leitura



(a)
alta exatidão e alta precisão



(b)
baixa exatidão e alta precisão



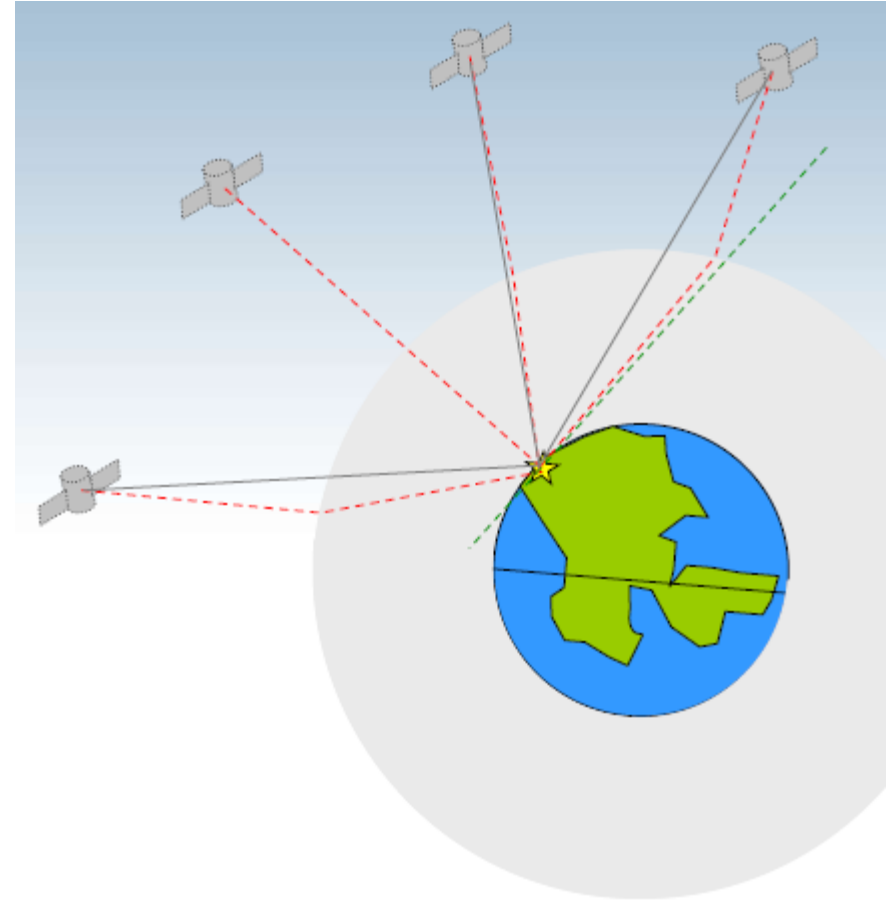
(c)
baixa precisão e baixa exatidão

Fontes de Erro

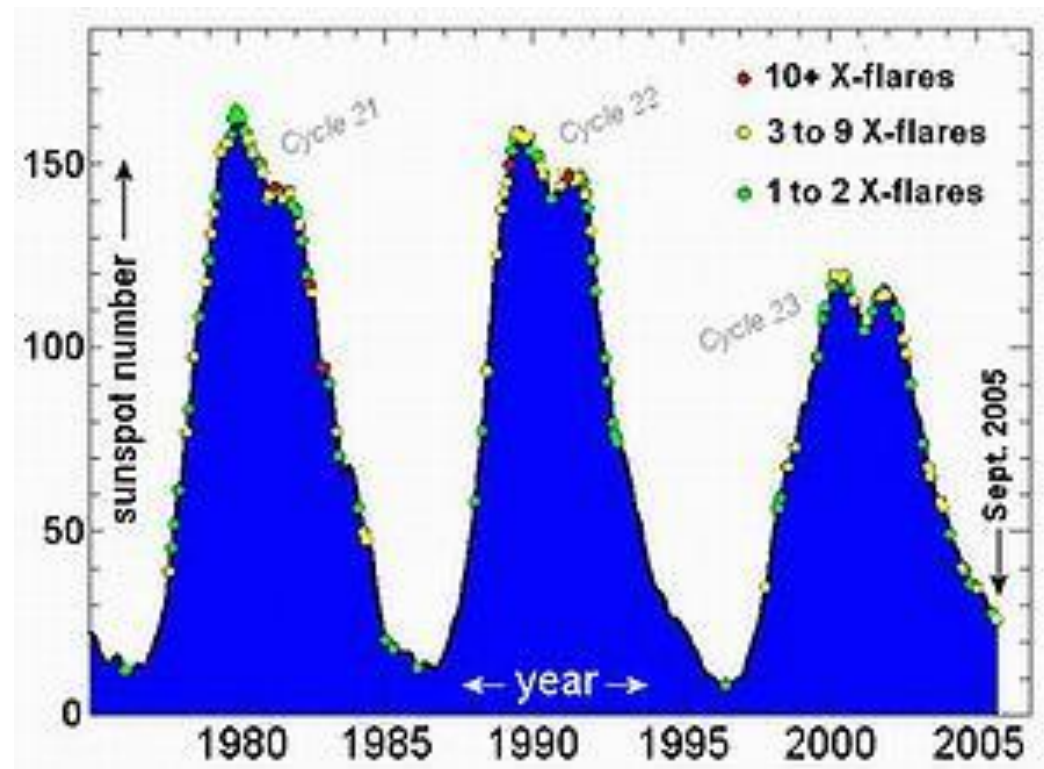
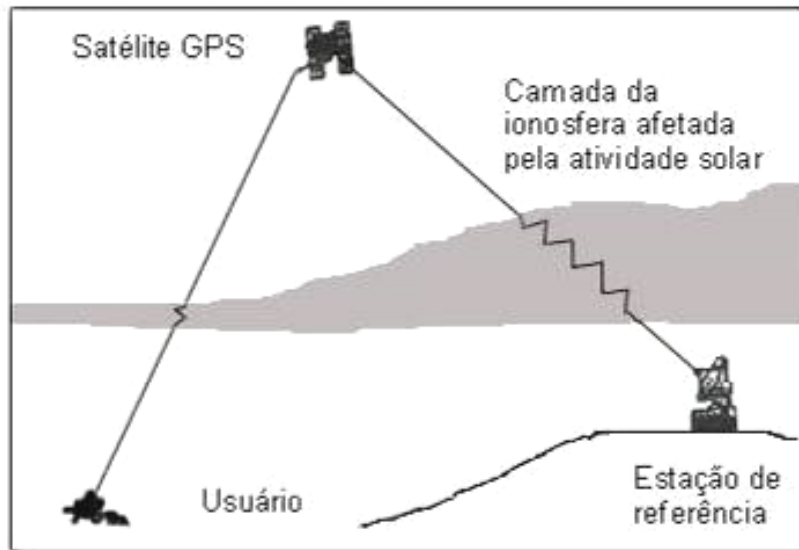
- Relógio do satélite
- Relógio do receptor
- Órbita do satélite
- Reflexão
- Refração

Erro de refração

- Atrasos nas ondas ocorrem na Ionosfera, camada carregada eletricamente e de 80 a 400 km de espessura sobre Terra.
- A Troposfera, camada abaixo da Ionosfera, também pode atrasar os sinais, pois contém partículas de água.
- Este erro pode ser da ordem de 4 m.

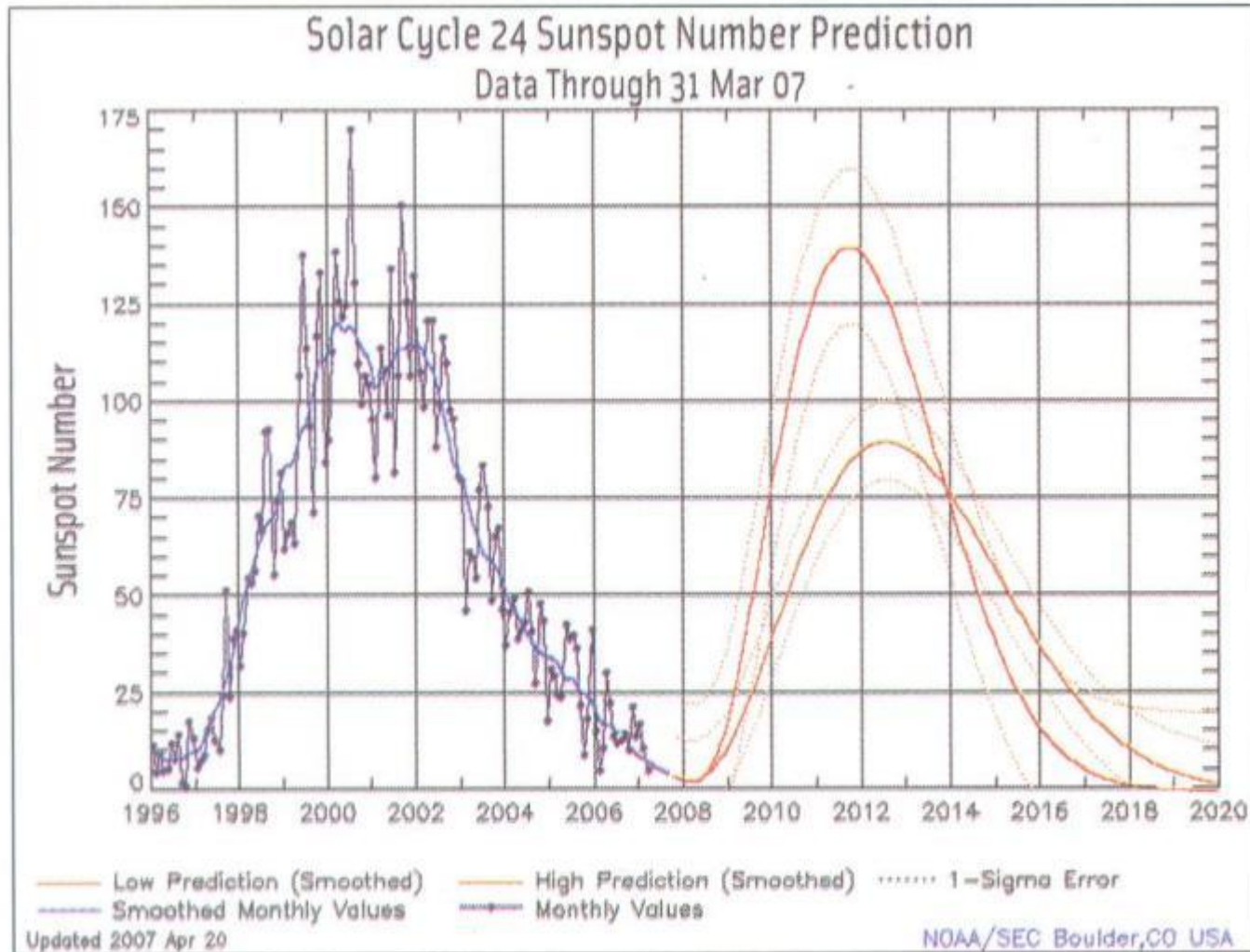


A refração e a cintilação



<http://www.ens-newswire.com/ens/apr2007/2007-04-09-02.asp>

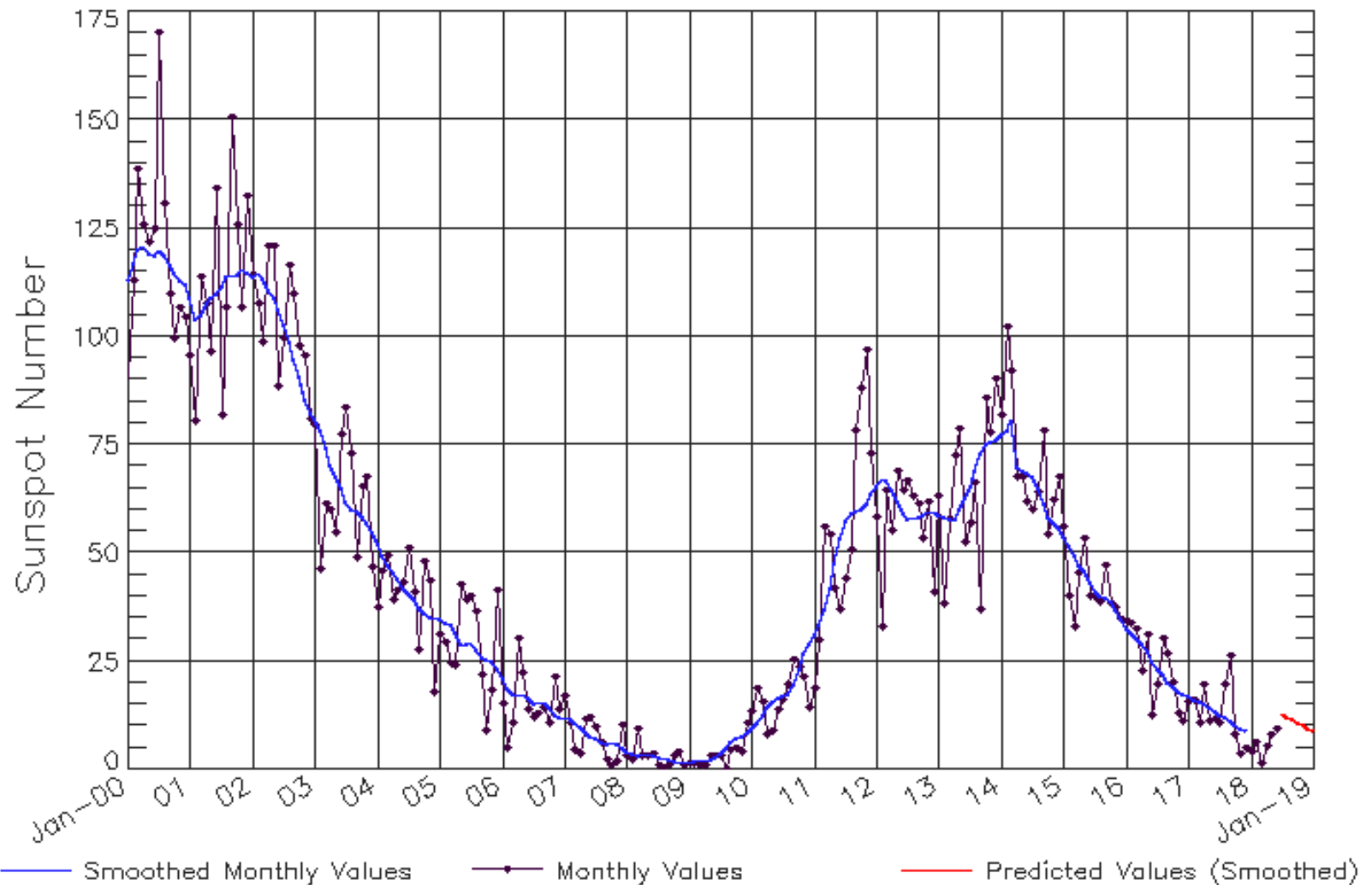
Efeitos da atividade solar



KUNCHES, J. (2007)

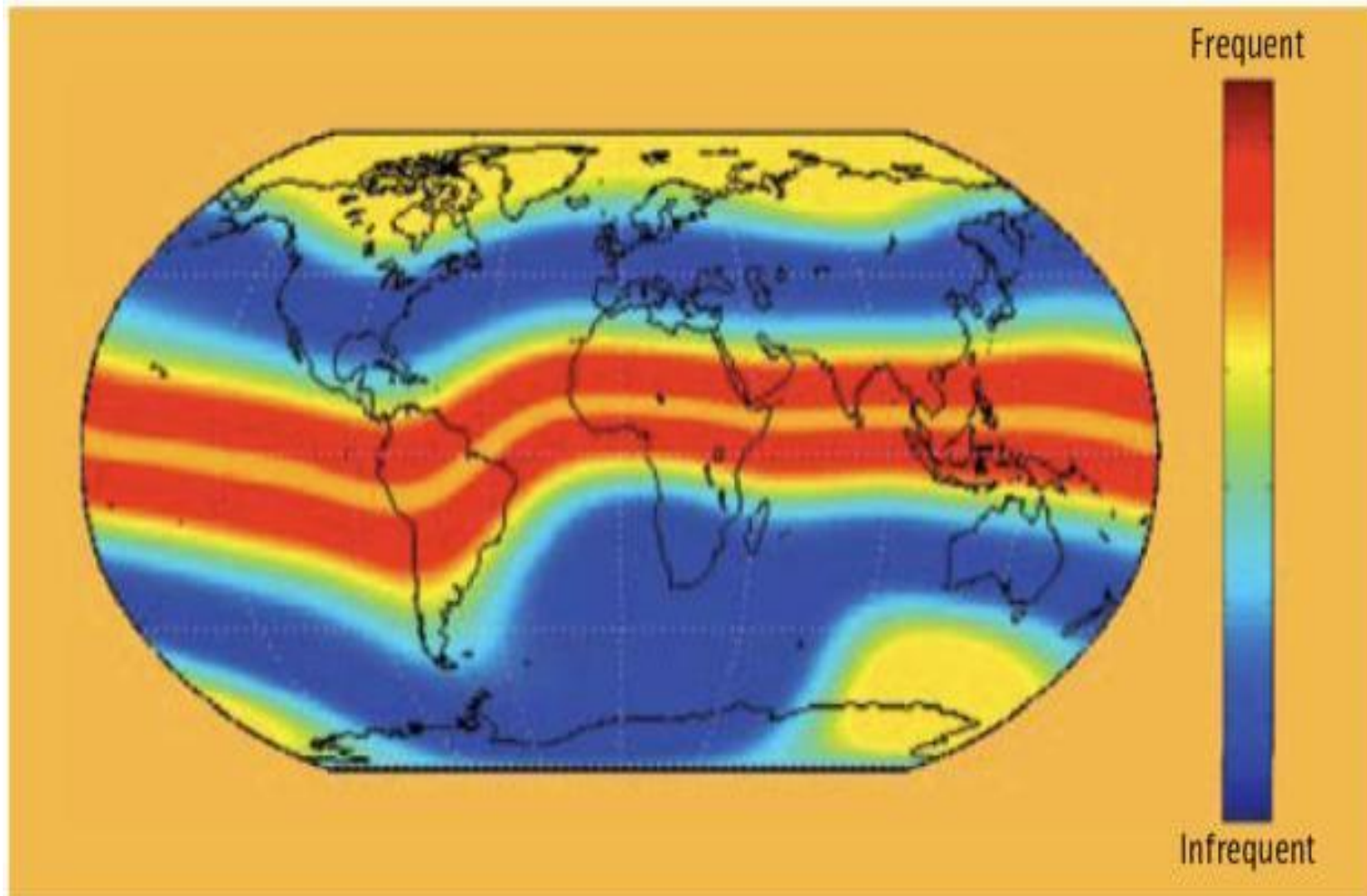
ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression

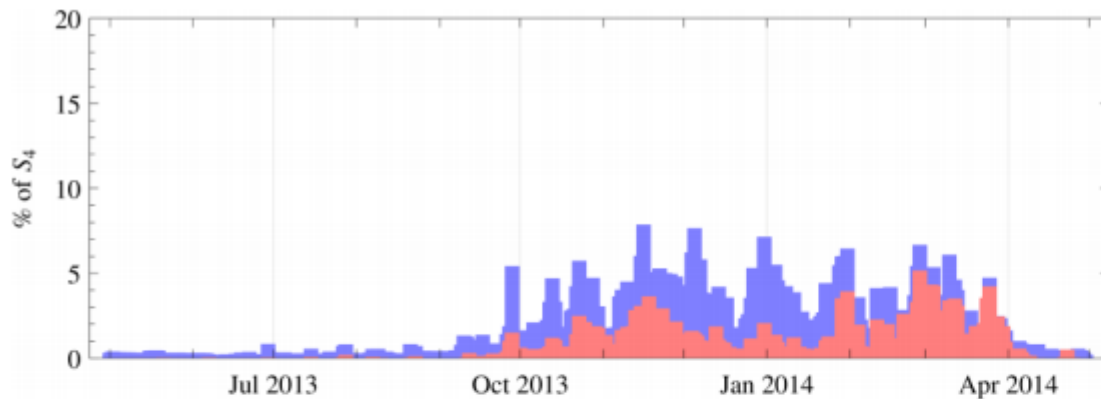
Observed data through Jun 2018



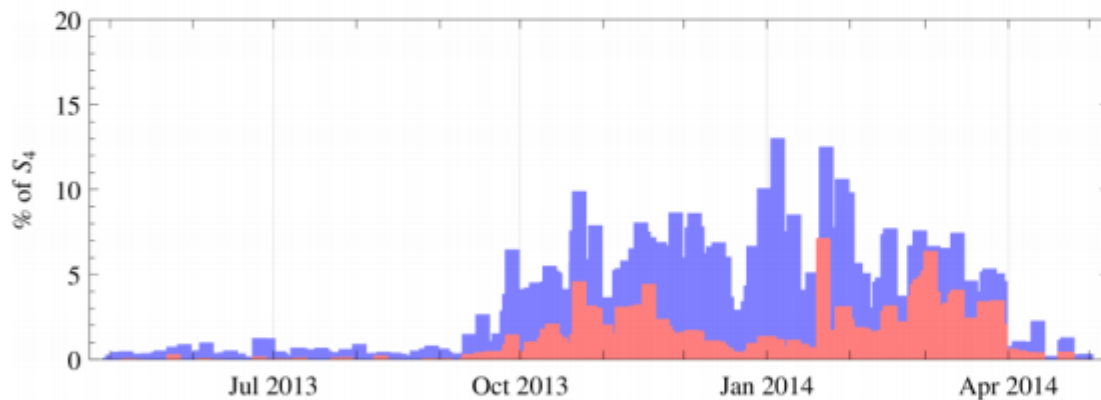
Updated 2018 Jul 9

NOAA/SWPC Boulder, CO USA





SJC station



PRU1 station

- **light blue** presents the percentage of occurrence of S4 between 0.3 and 0.7
- **light red** presents the percentage of occurrence of S4 above 0.7

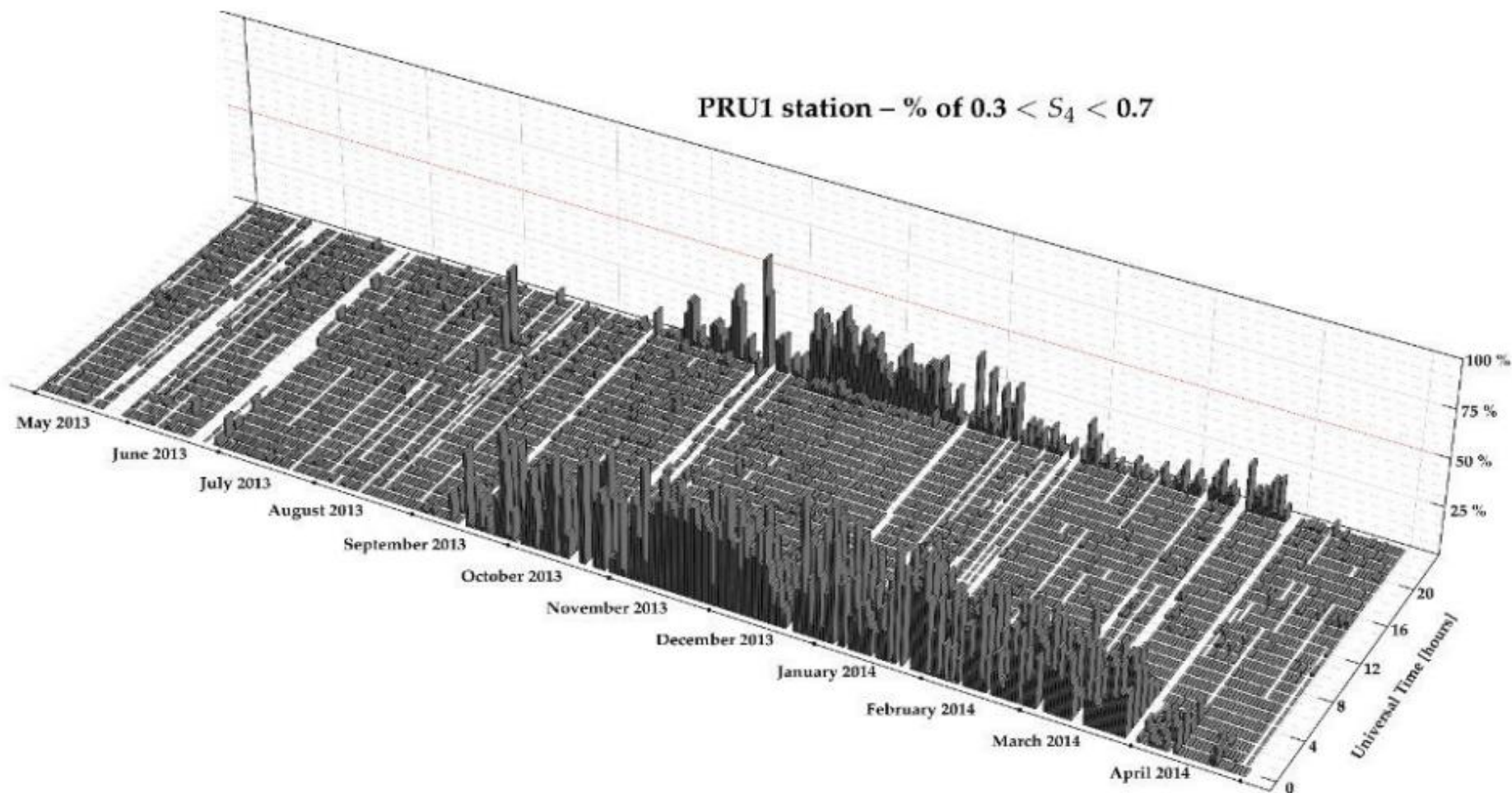


UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Presidente Prudente

EFEITO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO GNSS
Workshop – 27 de março de 2015



Monico, 2015



unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Presidente Prudente

EFEITO DA CINTILAÇÃO IONOSFÉRICA NO GNSS
Workshop – 27 de março de 2015



Monico, 2015

Diluição da Precisão

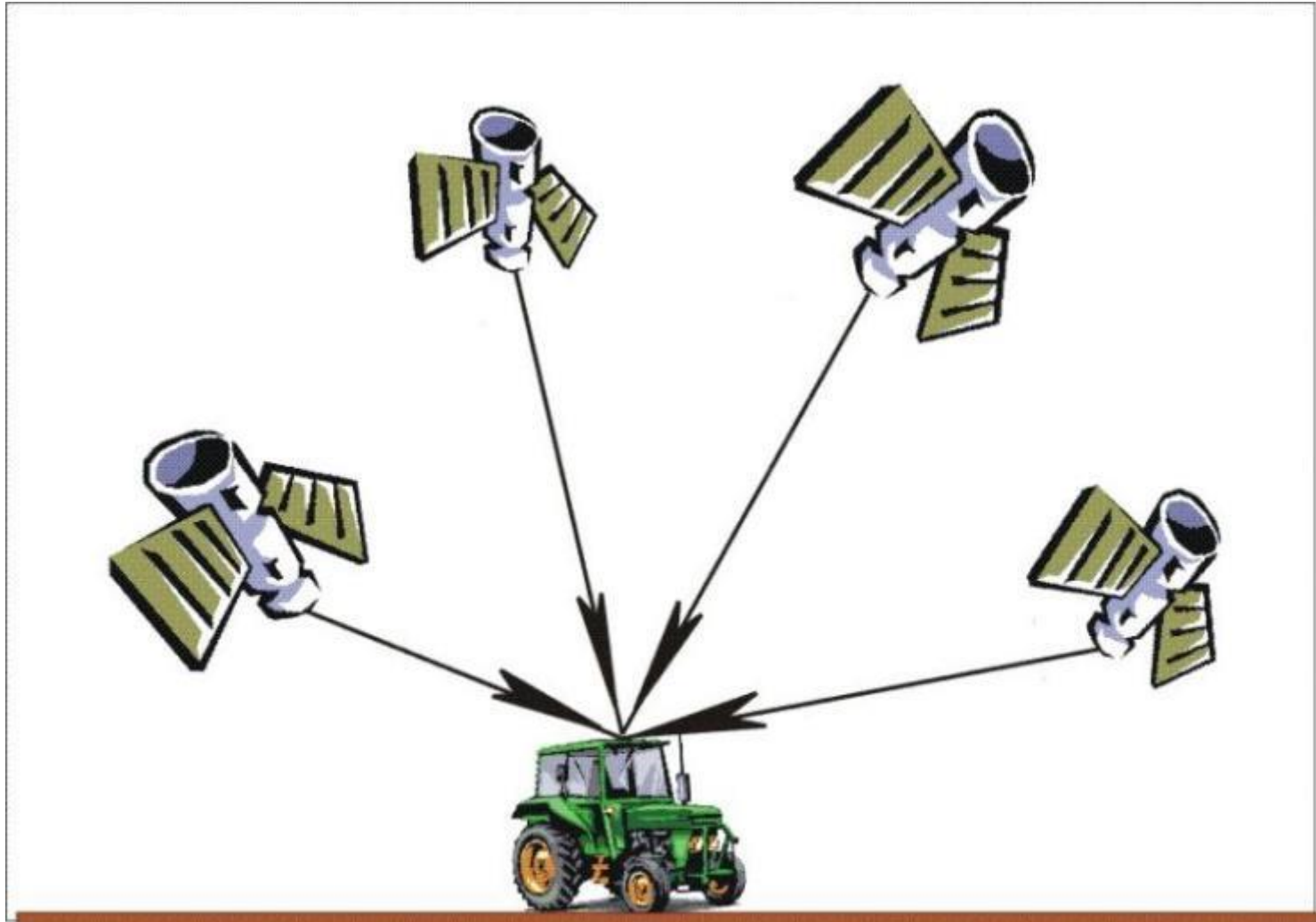
Conjunto de satélites muito próximos entre si



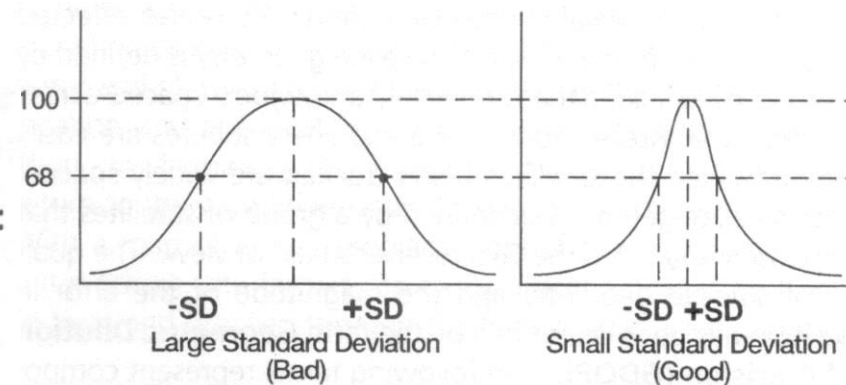
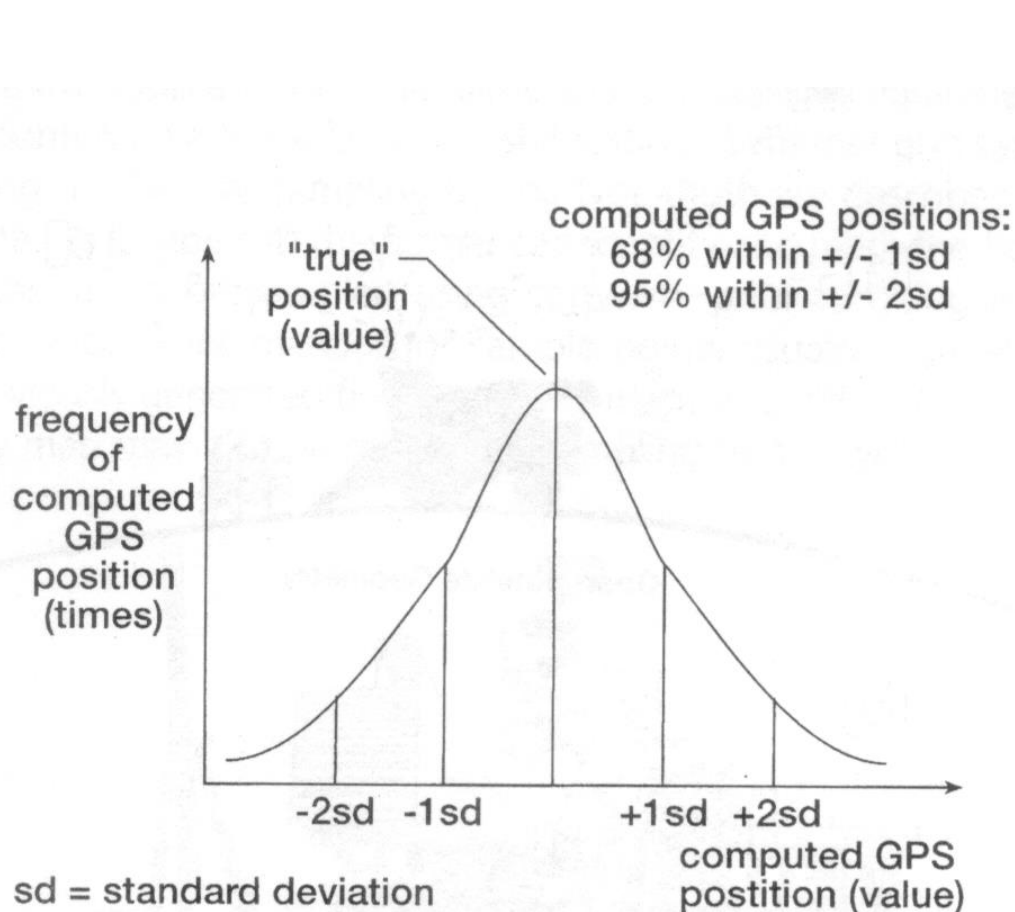
Diluição da Precisão

- Diluição de precisão horizontal (HDOP)- interfere nas coordenadas latitude e longitude;
- Diluição de precisão vertical (VDOP) – interfere na altitude;
- Diluição de precisão na posição (PDOP) – nas três dimensões;
- Diluição de precisão no tempo (TDOP).

Quatro satélites bem distribuídos



Como expressar a acurácia de um GPS



Uma distribuição normal tem 68% dos dados entre ± 1 SD e 95% dos dados entre ± 2 SD

E - Erro de Posicionamento (dispersão)

$$E = \sqrt{(Xr - \bar{X})^2 + (Yr - \bar{Y})^2}$$

Xr - Valor Leste da coordenada de referência

$\bar{X}$ - Média do valor da coordenada Leste

Yr - Valor Norte da coordenada de referência

$\bar{Y}$ - Média do valor da coordenada Norte

$$\sigma_{Nj} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(ENij - \bar{ENj} \right)^2}$$

$$\sigma_{Ej} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(EEij - \bar{EEj} \right)^2}$$

σ_{Nj} - desvio padrão dos erros da coordenada N

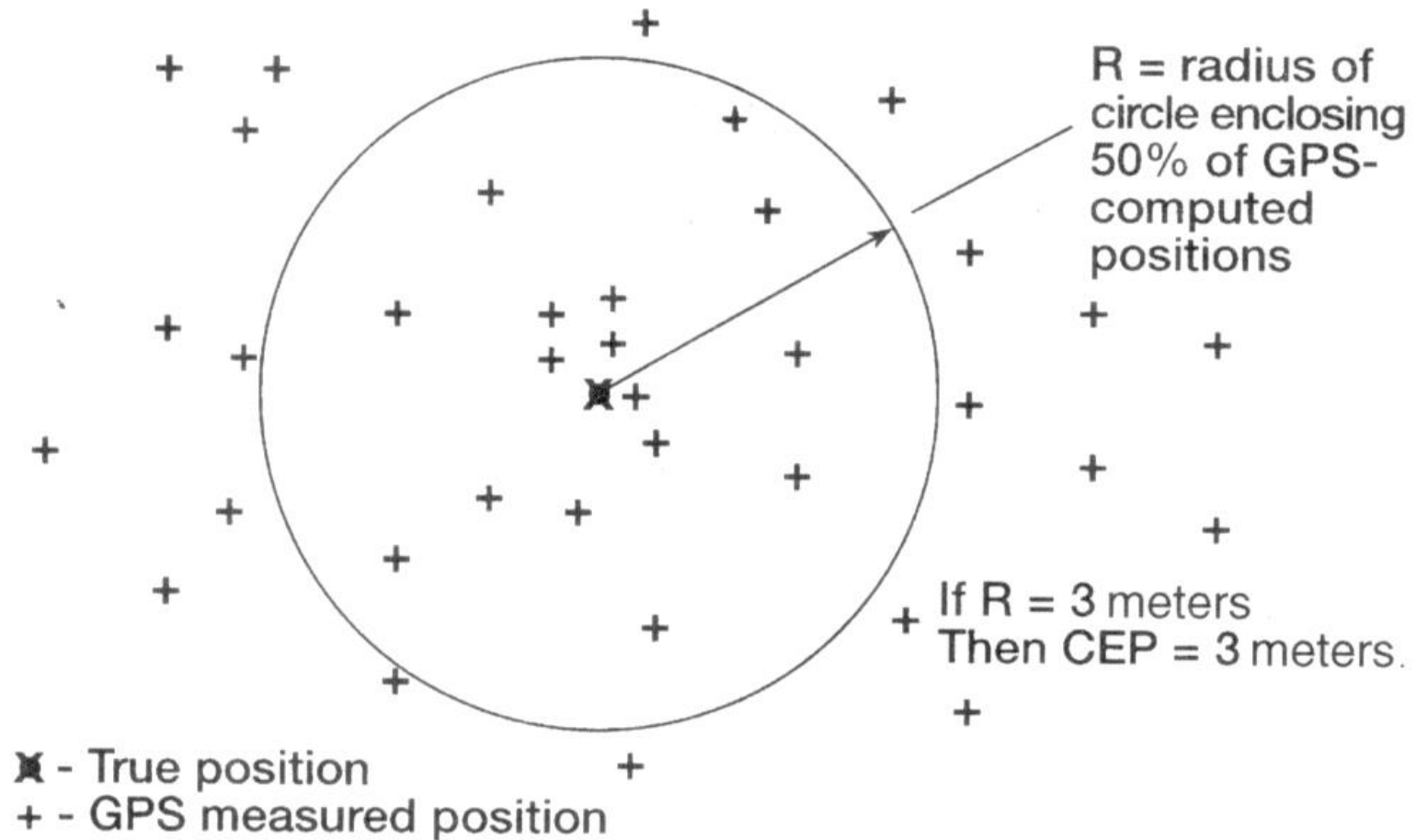
σ_{Ej} - desvio padrão dos erros da coordenada E

$ENij$ $EEij$ - diferença entre coordenada de referência e coordenada do receptor ensaiado (erro)

$\bar{ENj}$ $\bar{EEj}$ - média os erros das coordenadas do receptor ensaiado, que representa a tendência

n - número total de coordenadas coletadas “i” de um tratamento “j”

Como expressar a acurácia de um GPS



Erro Circular Provável

CEP – Erro circular provável

$$\text{CEP} = 1,18 \sqrt{\sigma_E^2 + \sigma_N^2}$$

σ_E = desvio padrão na coordenada E

σ_N = desvio padrão na coordenada N

Correção diferencial

- Correção diferencial necessita de um receptor na estação de referência, onde são geradas as correções.
- A correção pode ser pós-processada (mas não serve para AP)
- Quando em tempo real é necessária uma conexão - rádio, rede ou satélites de comunicação
- A correção diferencial reduz ou elimina erros de reflexão, refração, erros de relógio do satélite e erros de órbita do satélite

Métodos de Correção Diferencial

- Com estação fixa
 - Pós processamento
 - Em tempo real via rádio VHF/UHF/AM
- Rede de estações e sinal via satélite geoestacionário
 - Privado
 - Público
- Redes de estações fixas
 - Via rádio
 - Via telefonia celular
- *(Algoritmos internos)*

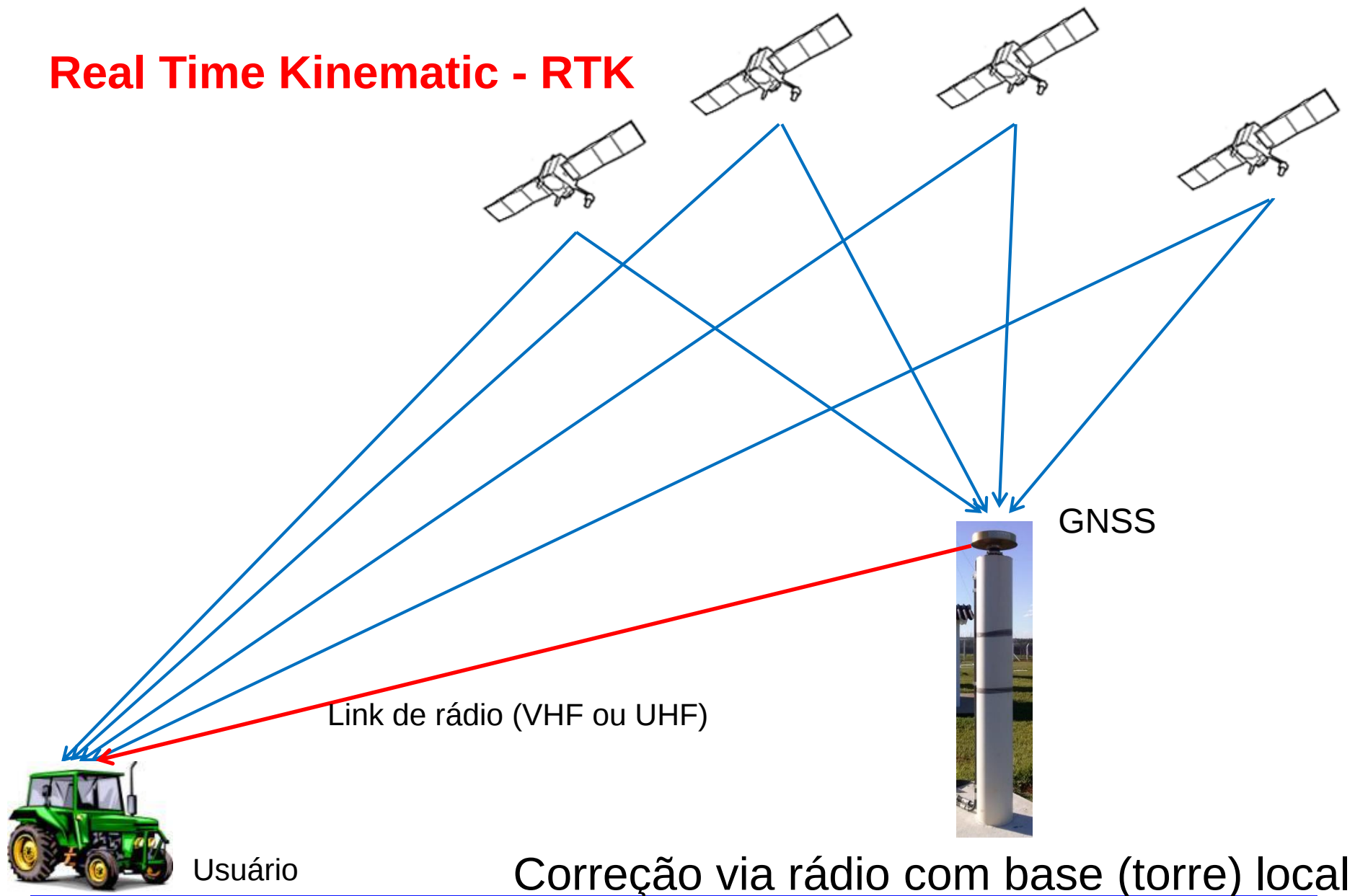
Pós processamento

Torres com antena para
correção pós processada
na ESALQ/USP, em
Piracicaba



Real Time Kinematic - RTK

Satélites da constelação GPS



GNSS

Link de rádio (VHF ou UHF)

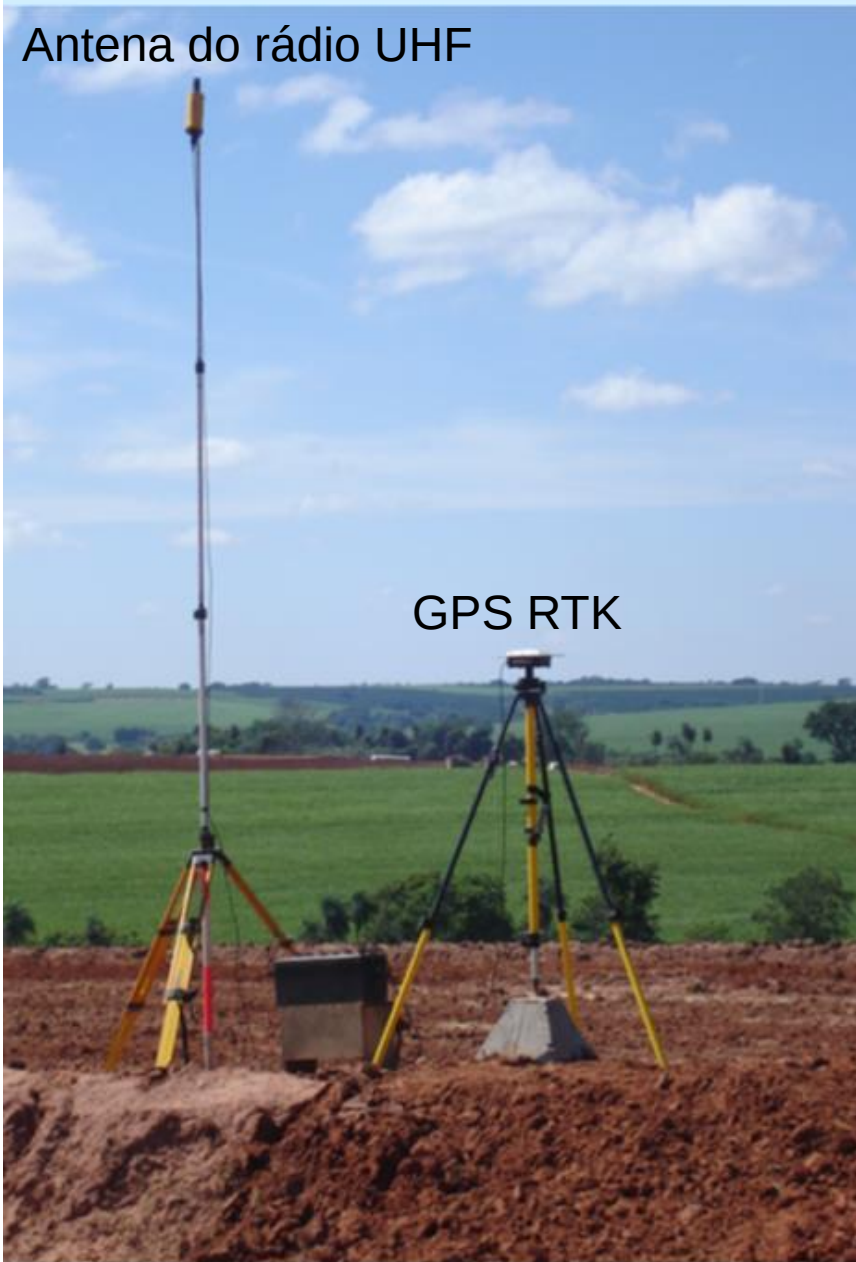
Usuário

Correção via rádio com base (torre) local

Correção diferencial RTK via rádio UHF para piloto automático



Antena do rádio UHF



GPS RTK

Correção
diferencial RTK
via rádio UHF
com torre móvel



Marco





Antena do rádio UHF

Correção diferencial RTK via
rádio UHF com torre fixa

GPS RTK em torre fixa

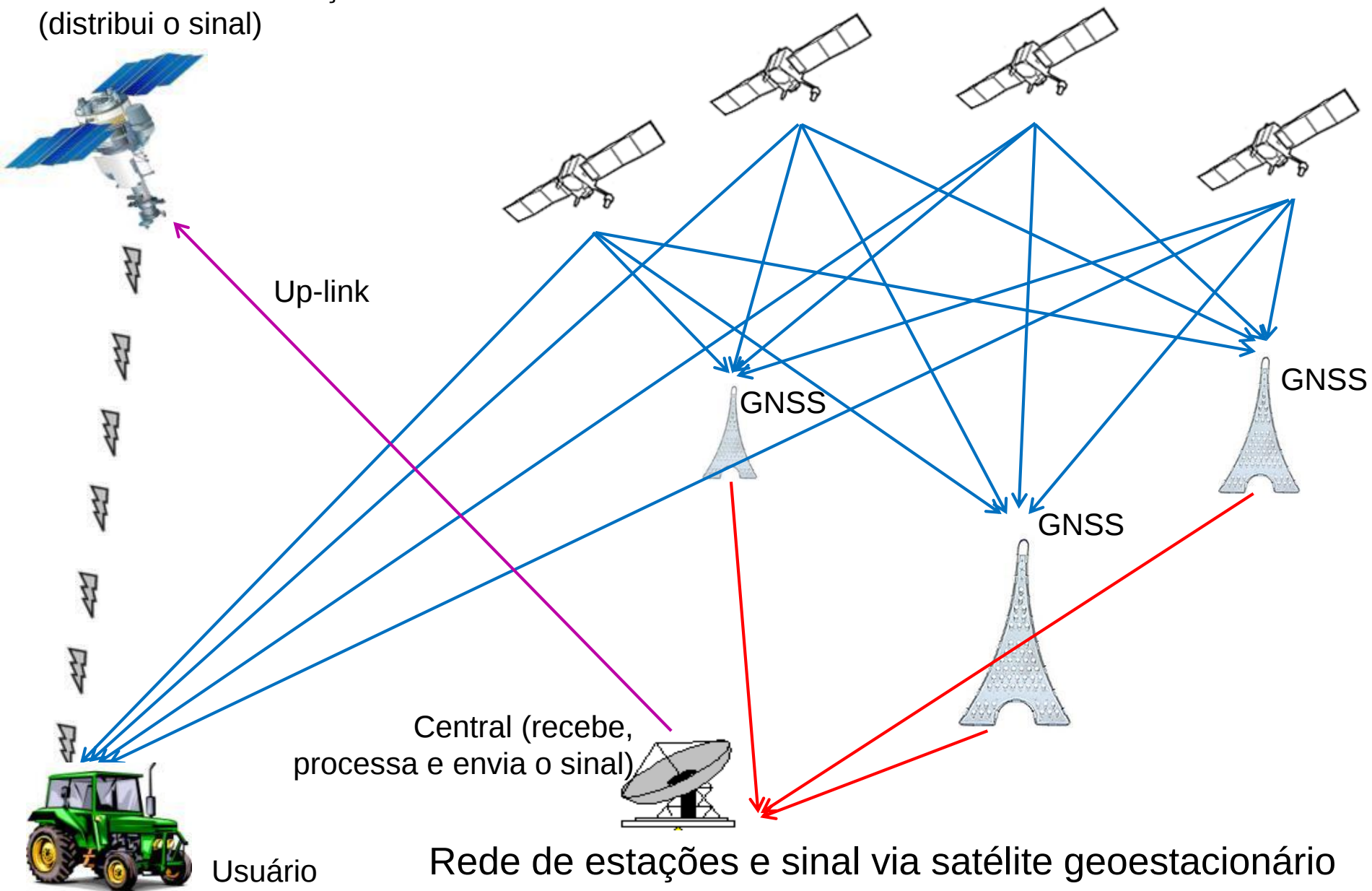


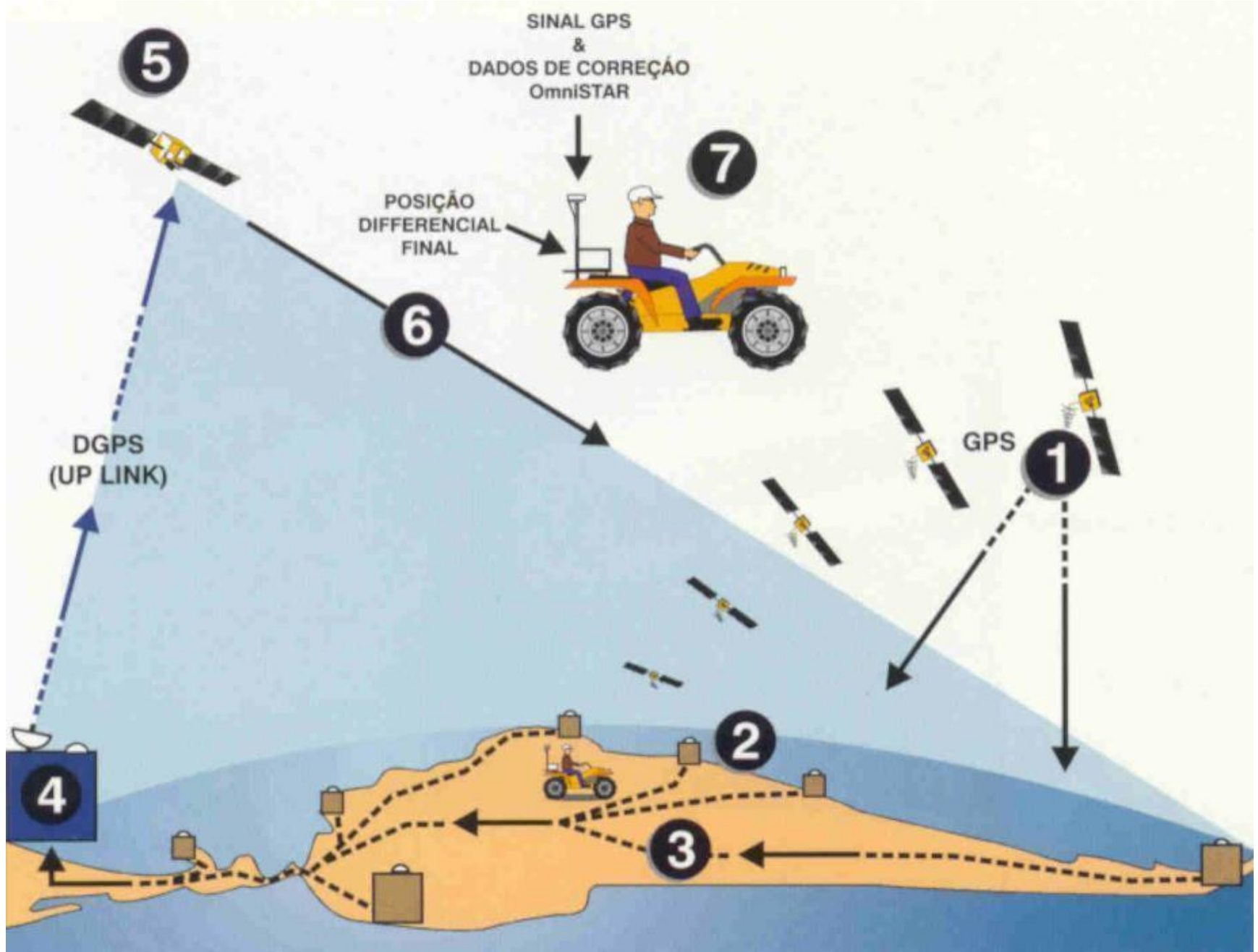
Carretas
repetidoras



Satélite de comunicação
(distribui o sinal)

Satélites da constelação GPS

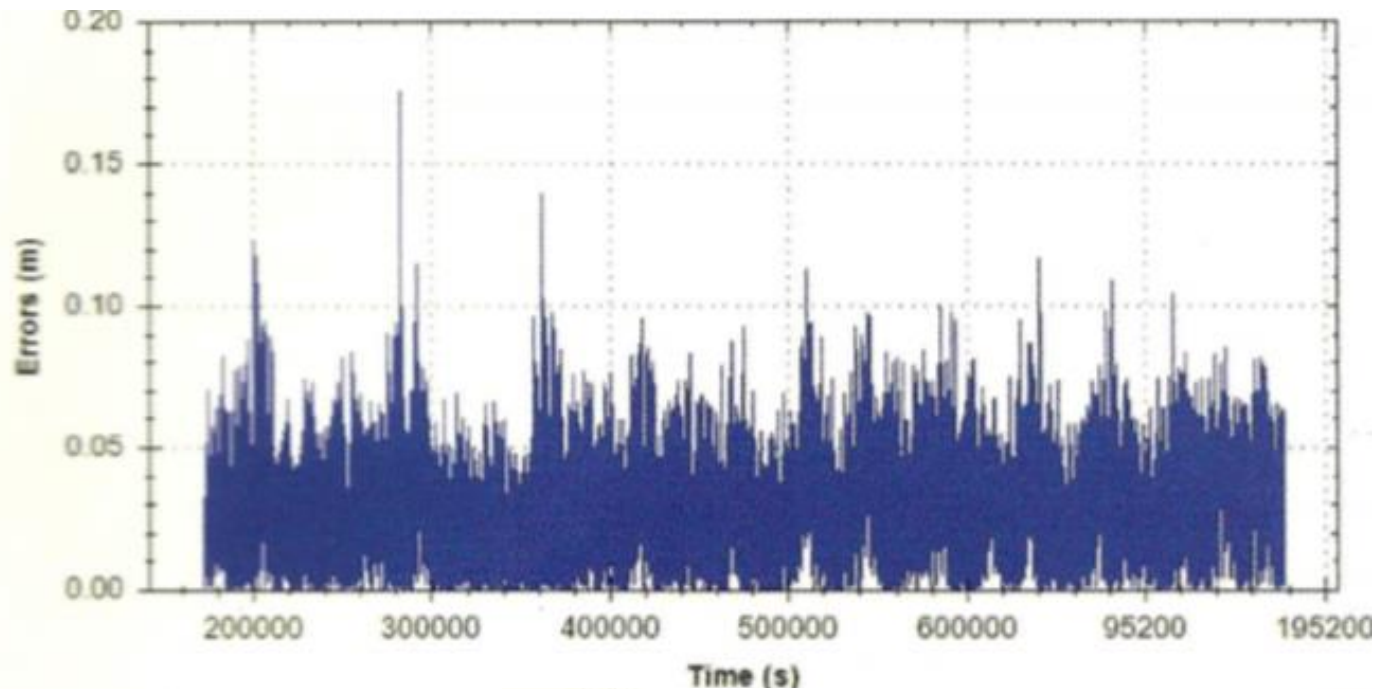




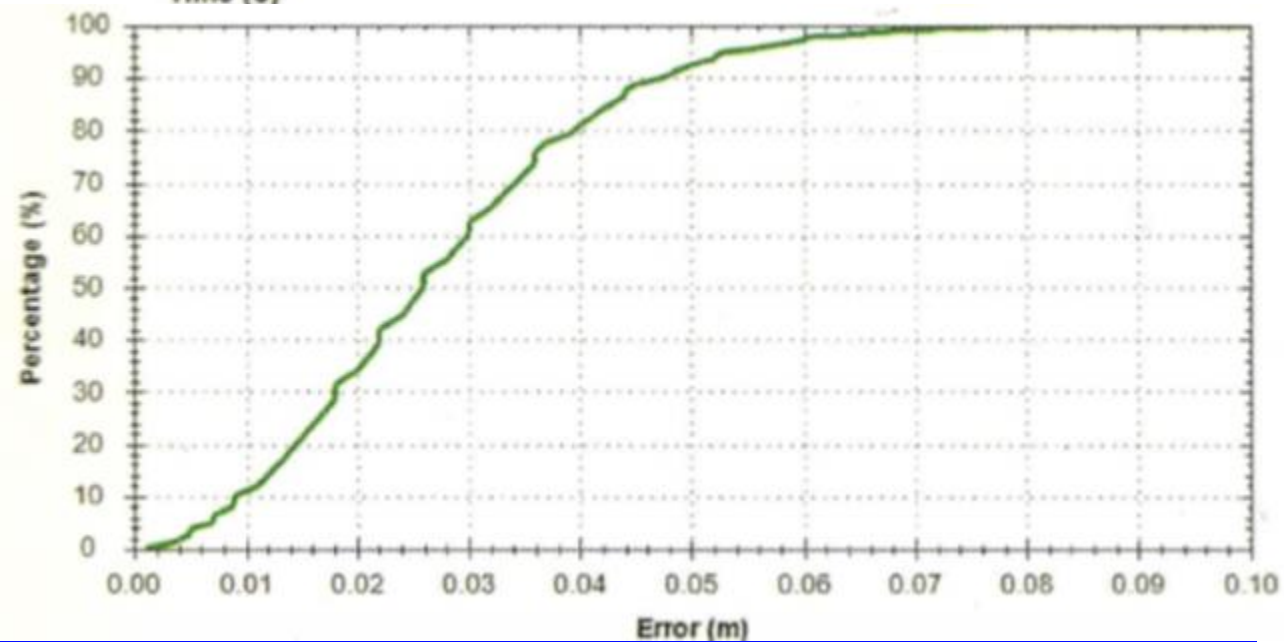
Sinais de correção via satélite ou SBAS/Brasil

Provedor	Marca	Receptor	Convergência inicial	Erro 95% (m)	Repetibilidade*
Trimble	CenterPoint RTX	GPS + GLONASS (IP ou satélite)	30 min	0,038	M/A
	Omnistar XP	GPS	45 min	0,15	B
	Omnistar XP/G2	GPS + GLONASS	45 min	0,05	M
	Omnistar G2	GPS + GLONASS	20 min	0,10	B
	Omnistar HP	GPS		0,10	B
	Range Point RTX	GPS + GLONASS	5 min	≤ 0,50 (≤ 0,15 passada a passada)	
	xFill Premium	GPS + GLONASS	30 min	≤ 3.8 cm (para usuários com Base RTK, que desejam estender o sinal quando perdem comunicação de rádio com a base; c/ receptor XCN-2050/TMX-2050)	M/A
JD StarFire	SF1	L1		0,30	B
	SF2	L1/L2 + GLONASS		0,10 sendo descontinuado	B
	SF3	L1/L2 + GLONASS	30 – 45 min	0,04	M/A
Hexagon (Veripos)	TERRASTAR-C	L1/L2 + GLONASS	30 – 45 min	0,04	M/A
	TERRASTAR-D	L1/L2 + GLONASS		0,10	
	TERRASTAR-M	L1 + GLONASS		< 1,00 sendo descontinuado	
Hemisphere (Atlas)	H100	IP ou satélite		1,00	
	H30			0,30	
	H10			0,08	

* A - alta; M – média; B - baixa



Sinal TerraStar

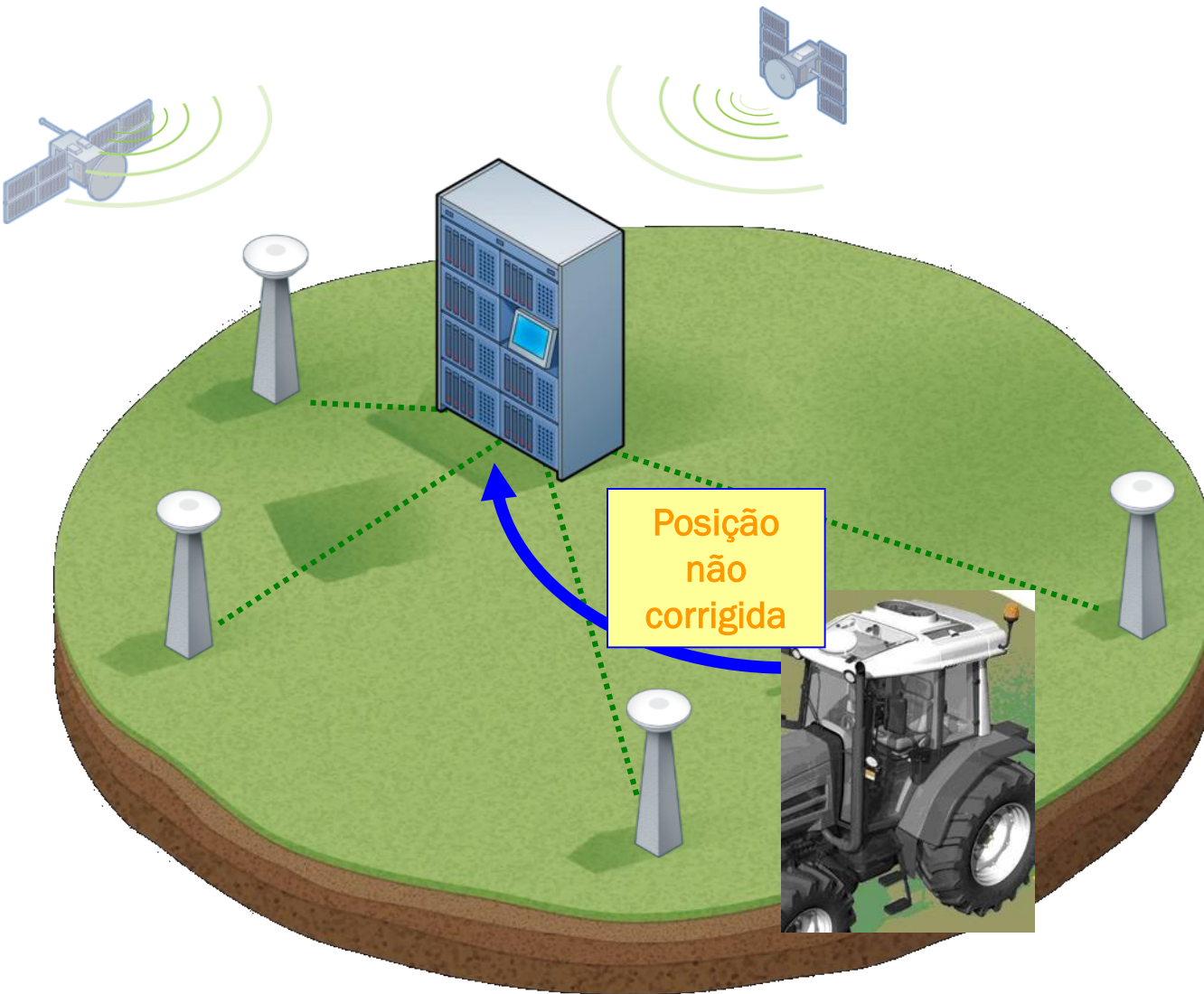


Novatel, 2014

Virtual Reference Stations – VRS

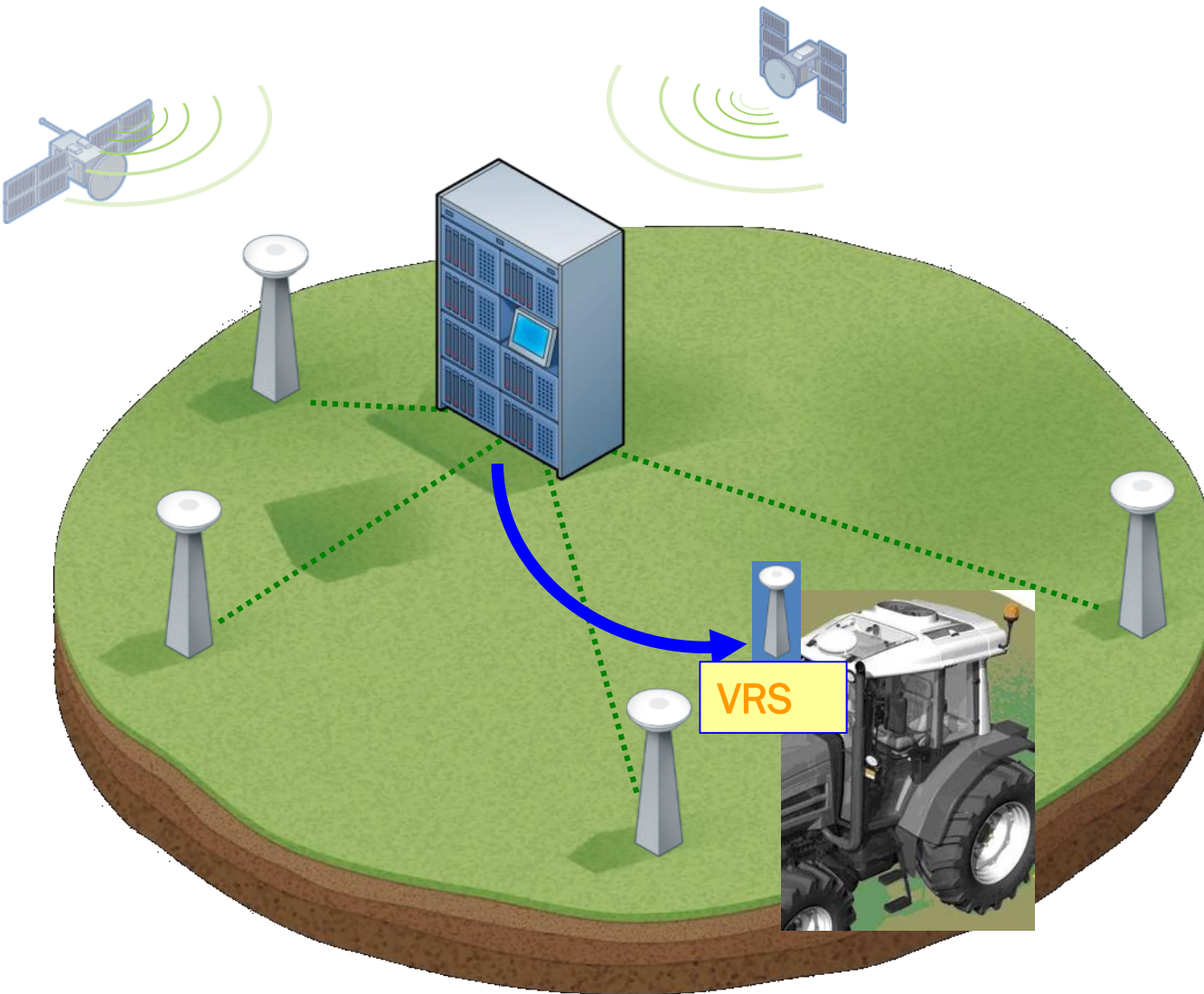
- Uma rede VRS consiste de estações de referência GNSS distribuídas em uma grande área, normalmente a 60-70km uma da outra.
- As estações de referência enviam dados GNSS a um servidor central, onde um software cria um modelo de correção para a região coberta pela rede.
- A exatidão de posicionamento é homogênea em toda a área da Rede VRS.
- Receptores GNSS rover se comunicam via modem celular com o servidor VRS e recebem uma correção de tipo RTK.

Estações de Referência Virtuais



Trimble, 2010

Estações de Referência Virtuais



Trimble, 2010

CEGAT – Alezi Teodolini



Alezi Teodolini, 2015

POLIGONO SP

-  SPIP-SPSC-SPRG
-  SPIP-SPSC-SPRG
-  SPSP-SPJA-SPSS
-  SPJA-SPSS-SPUB

... mais 52

BASES COMPLETO

-  BRDF
-  RJRJ
-  SPLN
-  MGIT

... mais 69



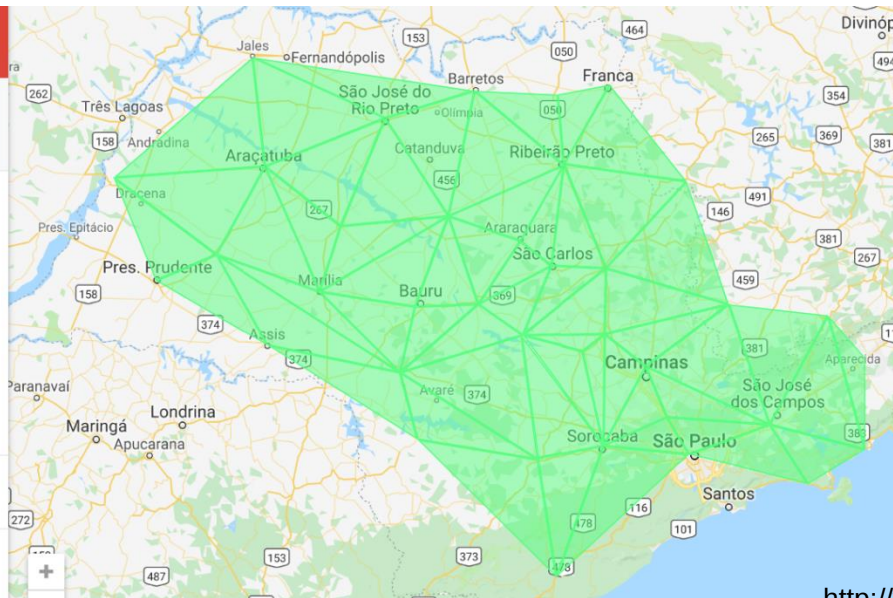
2.193 visualizações

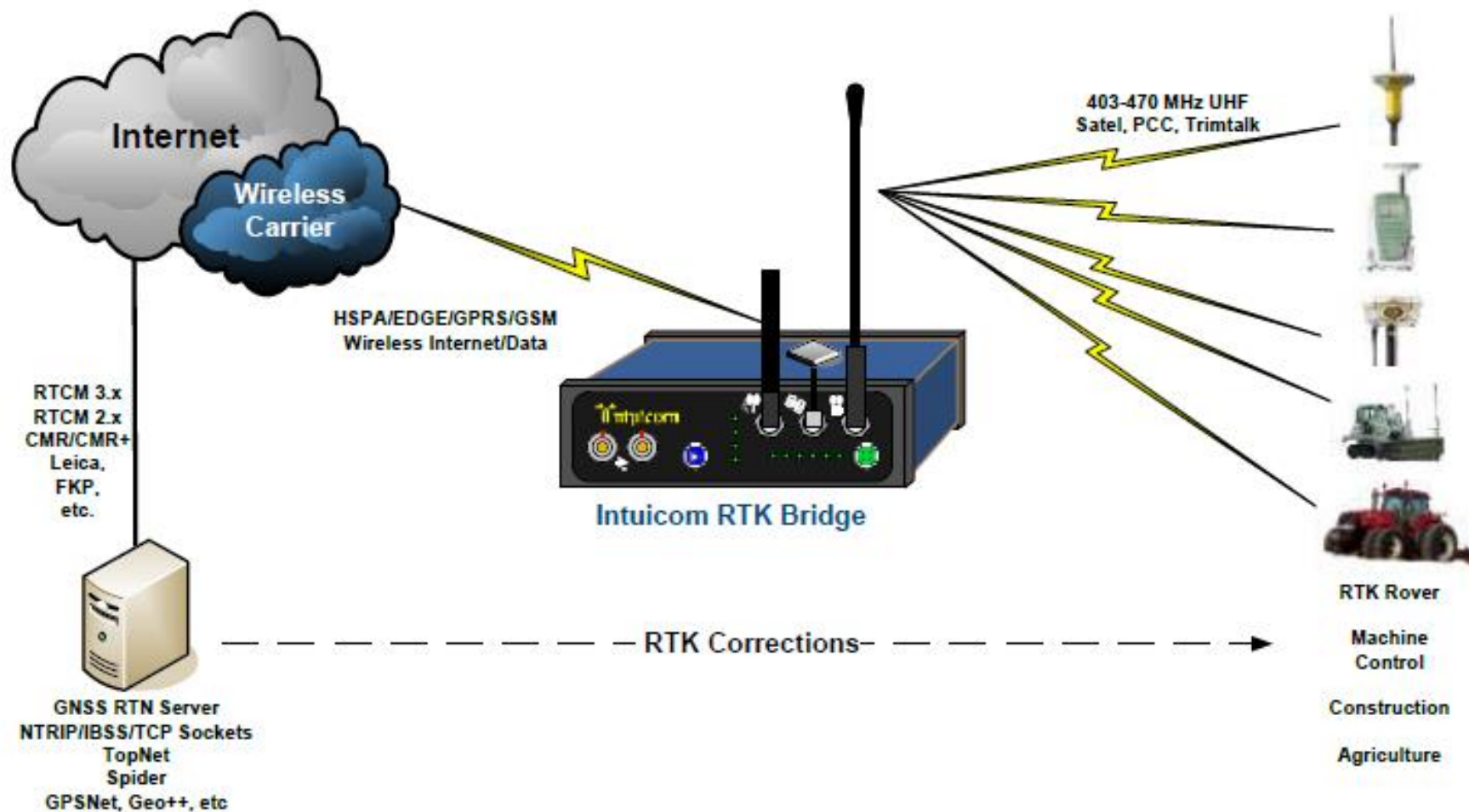
COMPARTILHAR

☒ POLIGONO SP

-  SPIP-SPSC-SPRG
-  SPIP-SPSC-SPRG
-  SPSP-SPJA-SPSS
-  SPJA-SPSS-SPUB

... mais 52

☐ BASES COMPLETO

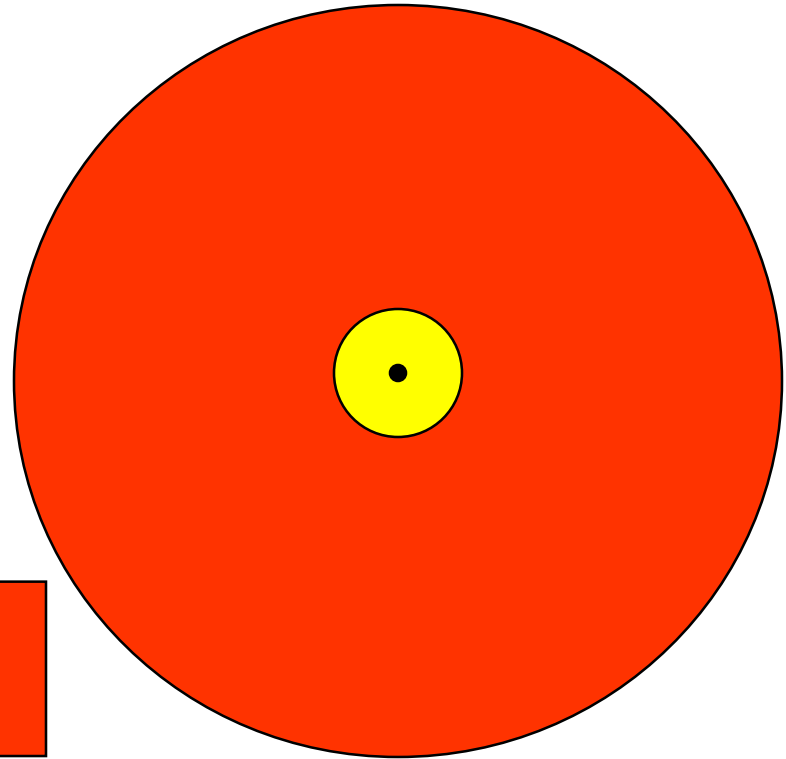


Alezi Teodolini, 2015

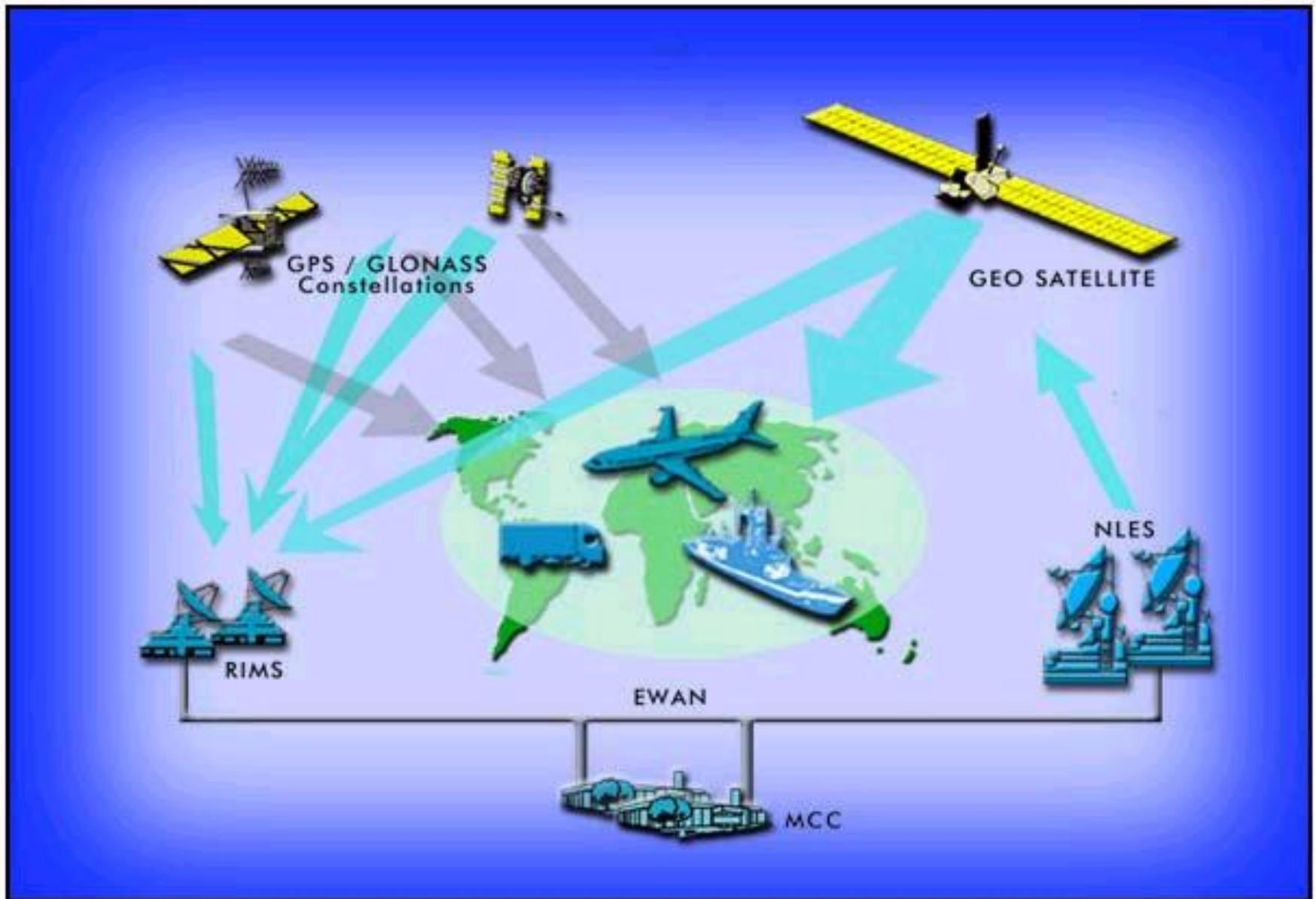
**Grupo III (RTK):
0,03 m**

**Grupo II (com correção):
0,3 (0,2 – 1,0 m)**

**Grupo I - GPS Autônomo:
3,0 m (2-10 m)**

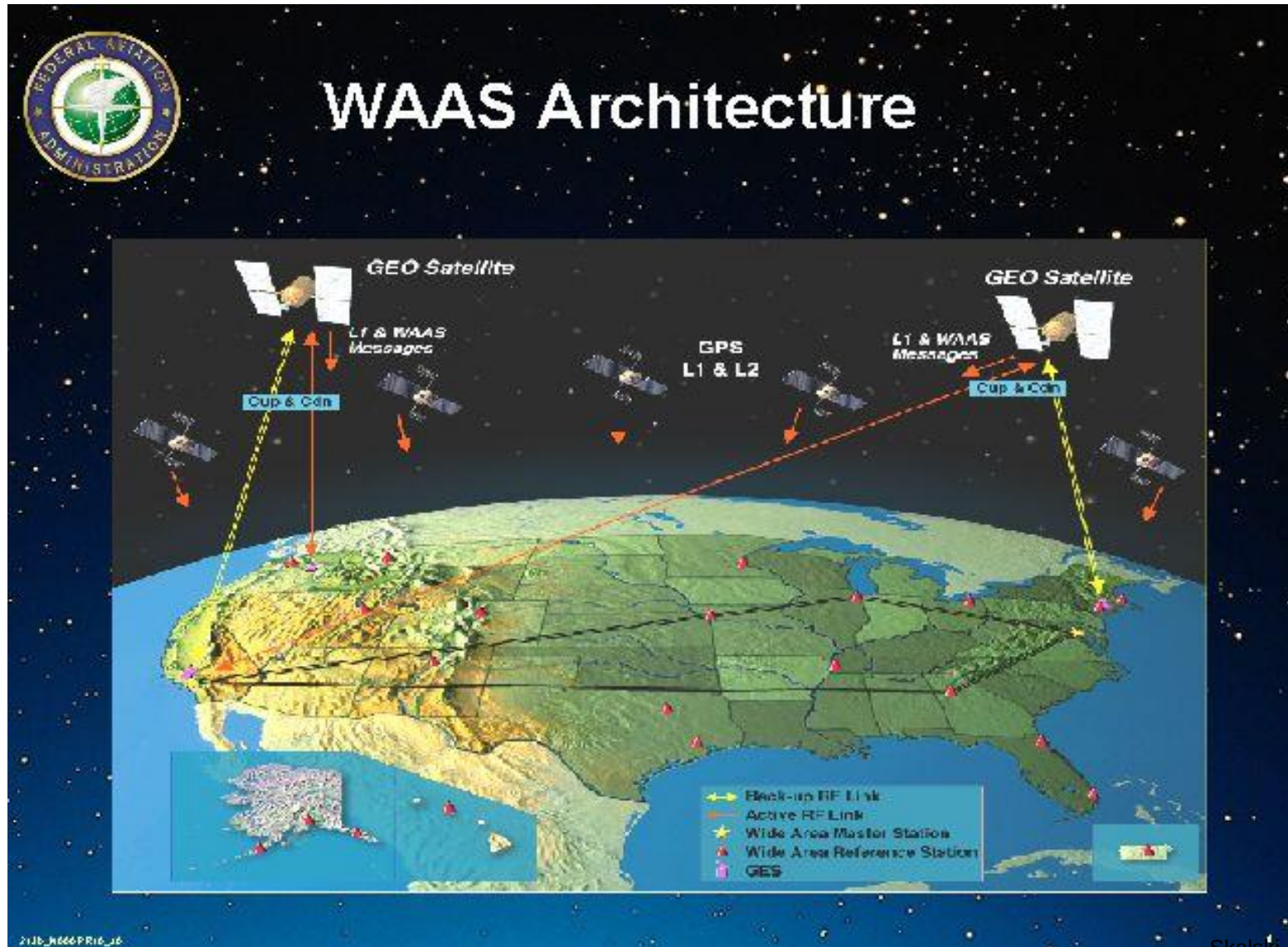


Sistemas Públicos: EGNOS, WAAS, MSAS...

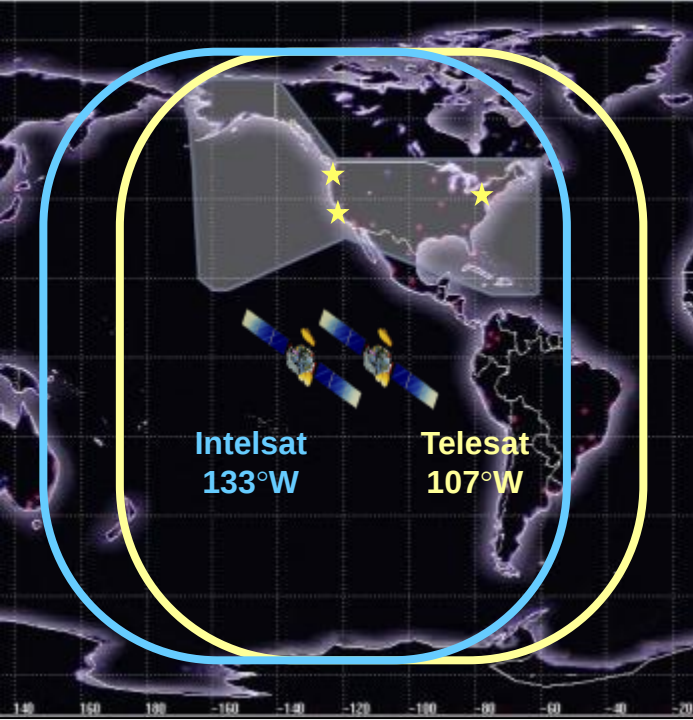


Wide Area Augmentation System (WAAS)

US Federal Aviation Administration

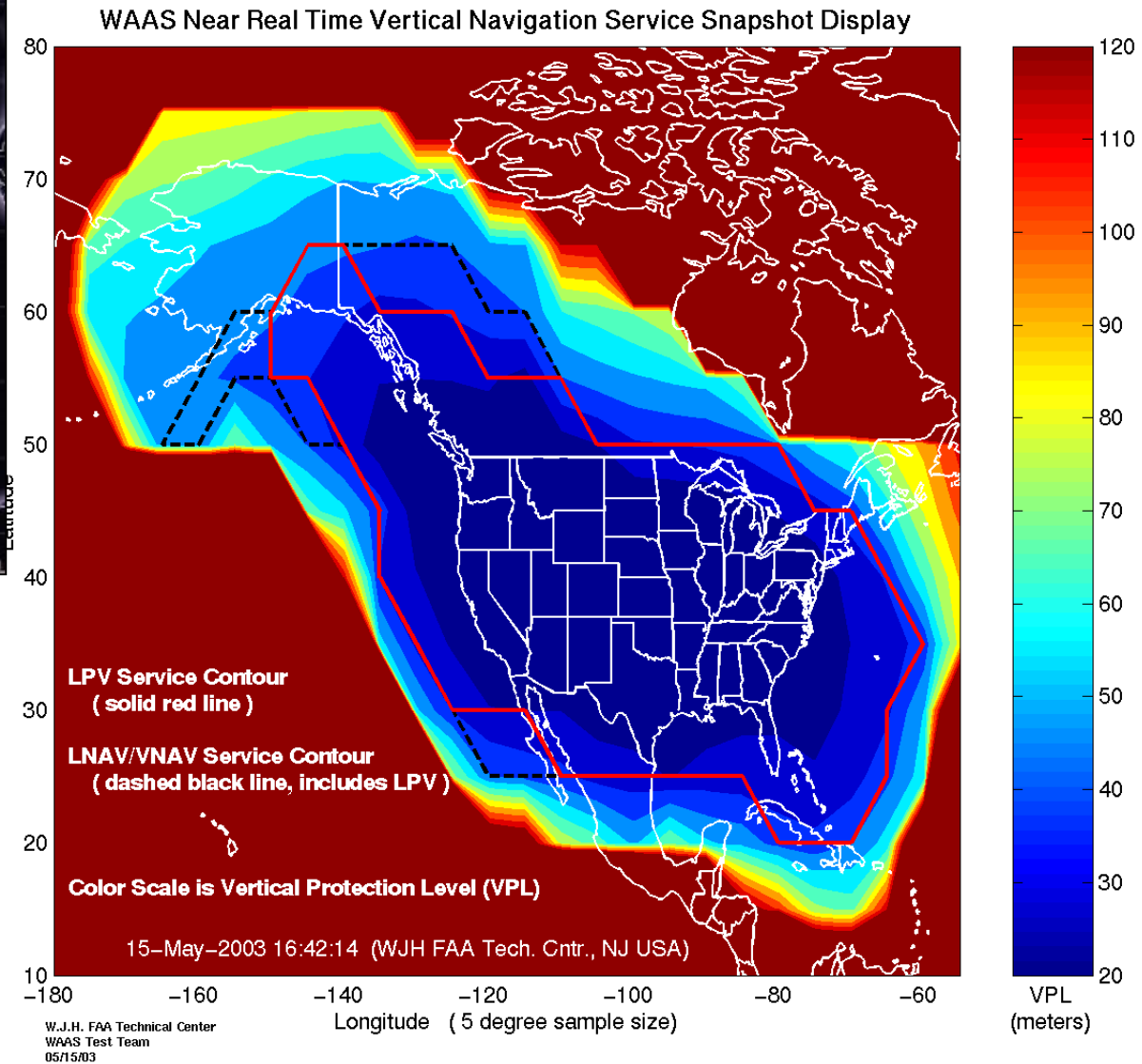


Skalski, 2004



Posição e
cobertura dos
satélites

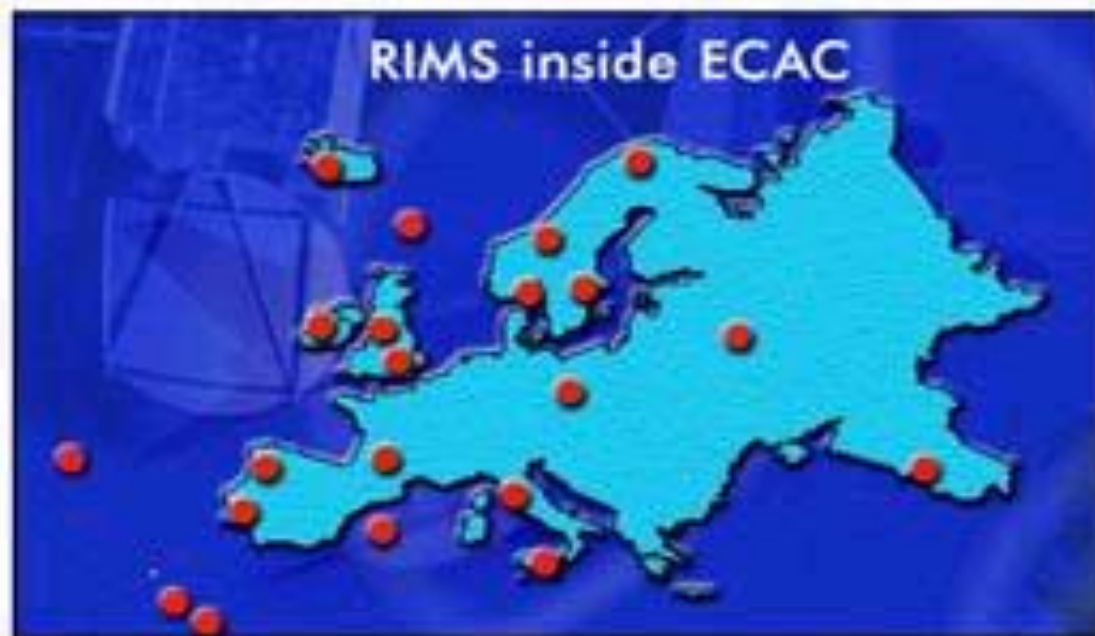
Cobertura WAAS para aviação



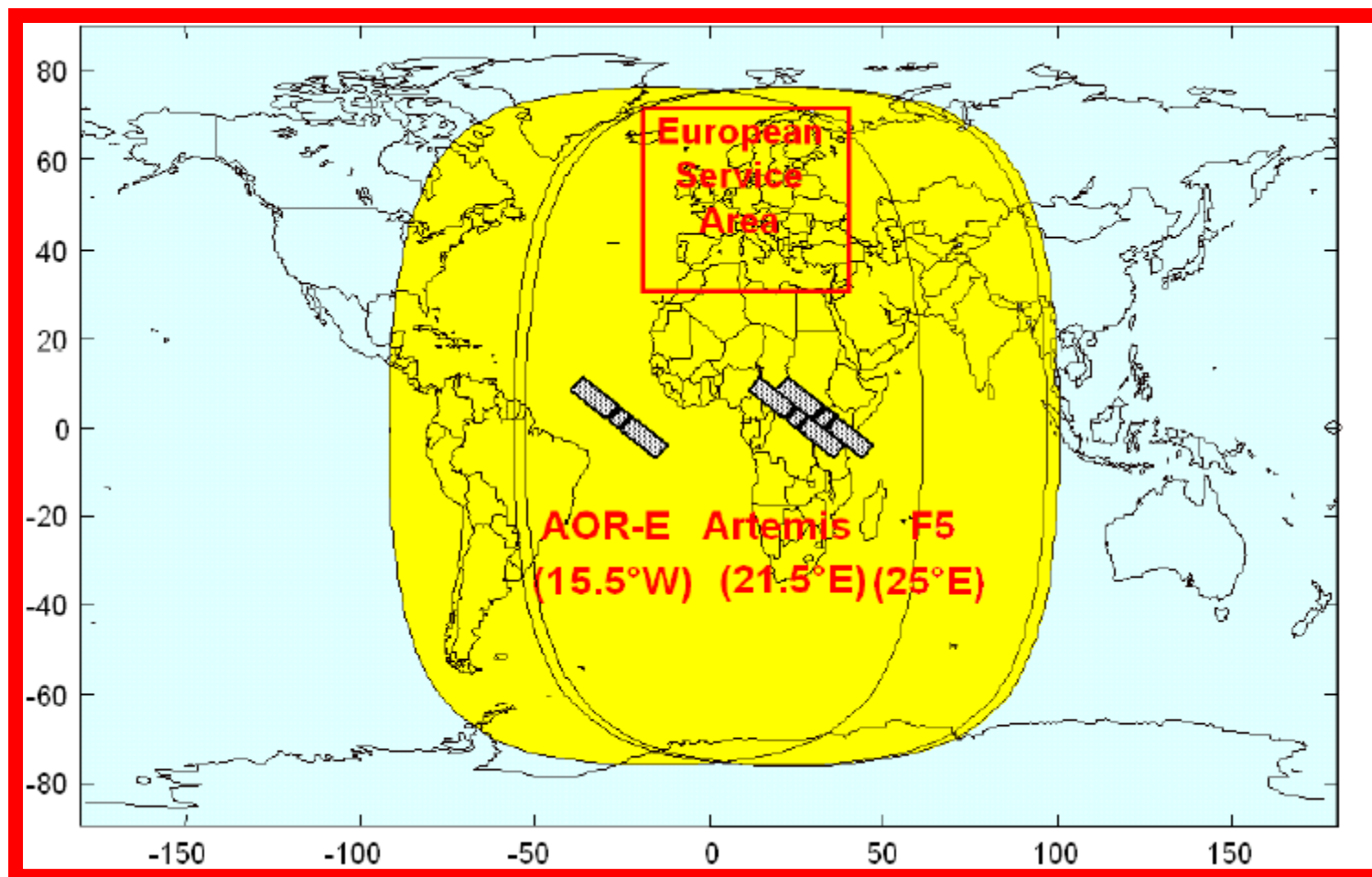
Vertical Protection Level (VPL)

Sistema EGNOS

European
Geostationary
Navigation
Overlay Service

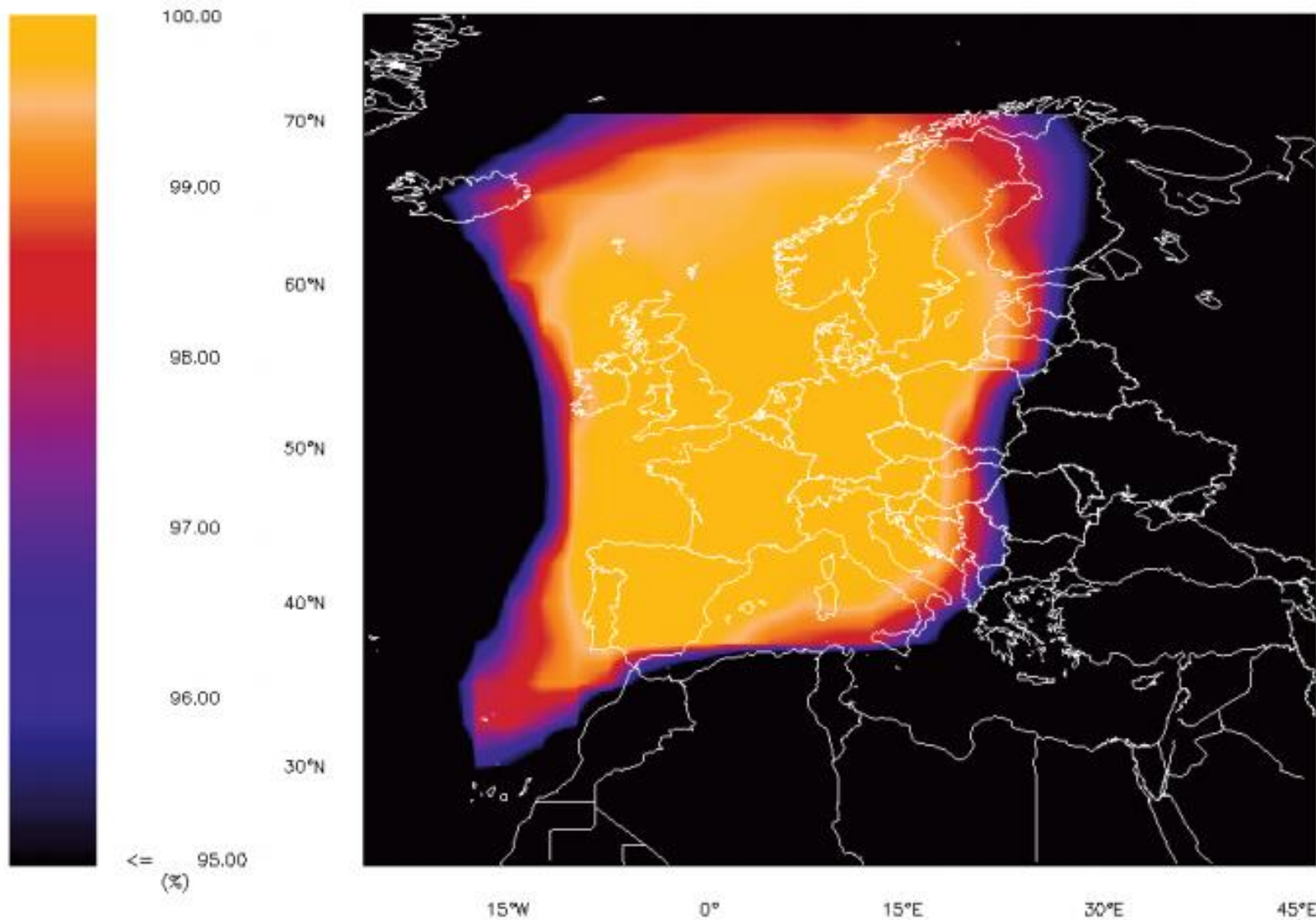


EGNOS GEO Satellites



“Triple coverage over Mediterranean and Africa”

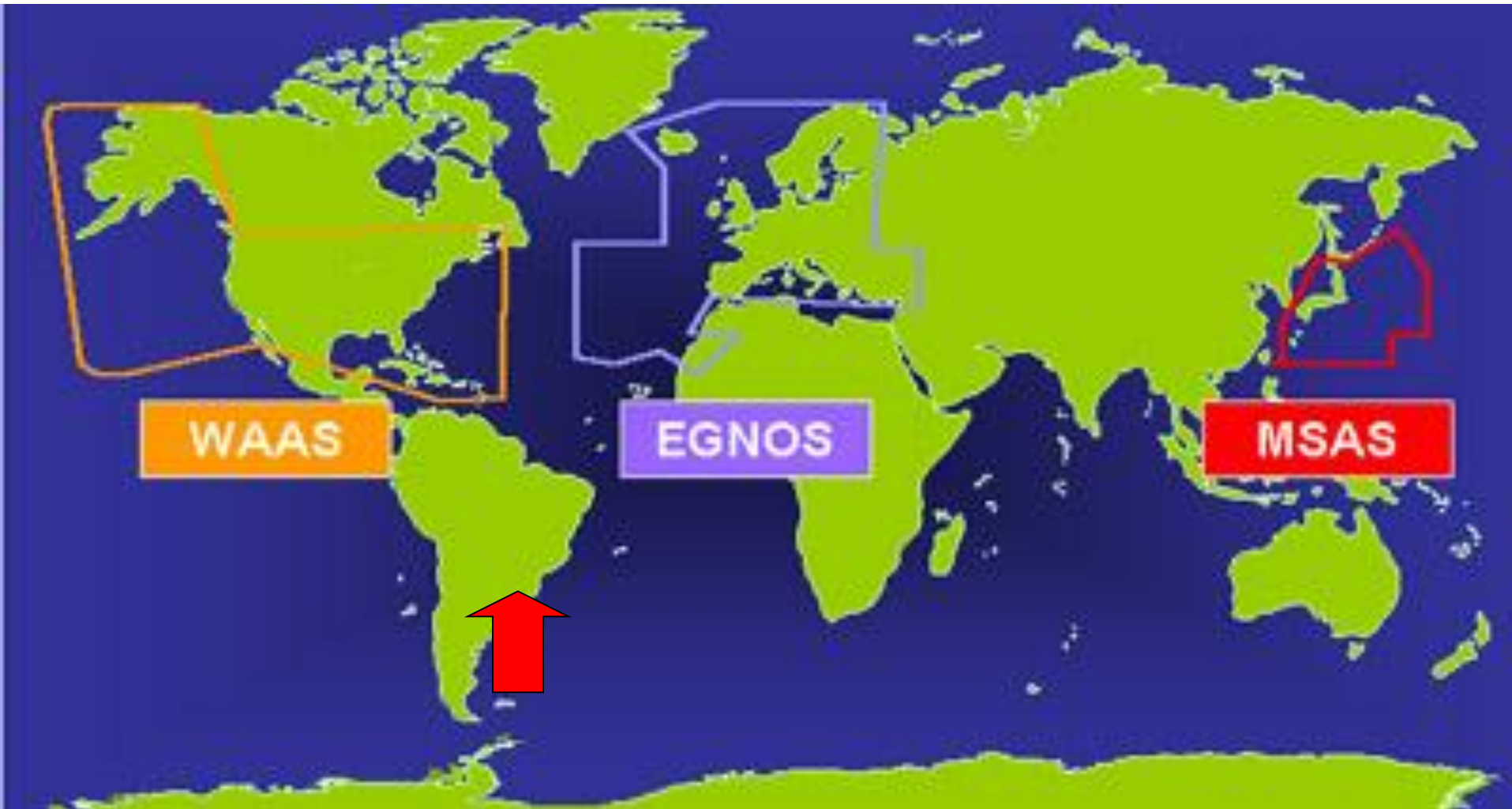
Lucas, 2004



EGNOS safety-of-life service: vertical guidance approach service coverage (95-100 per cent availability)

Horizontal accuracy (95 per cent) 3 m; Vertical accuracy (95 per cent) 4 m

Sinais Diferenciais Públicos



Ensaio Estático (2006)



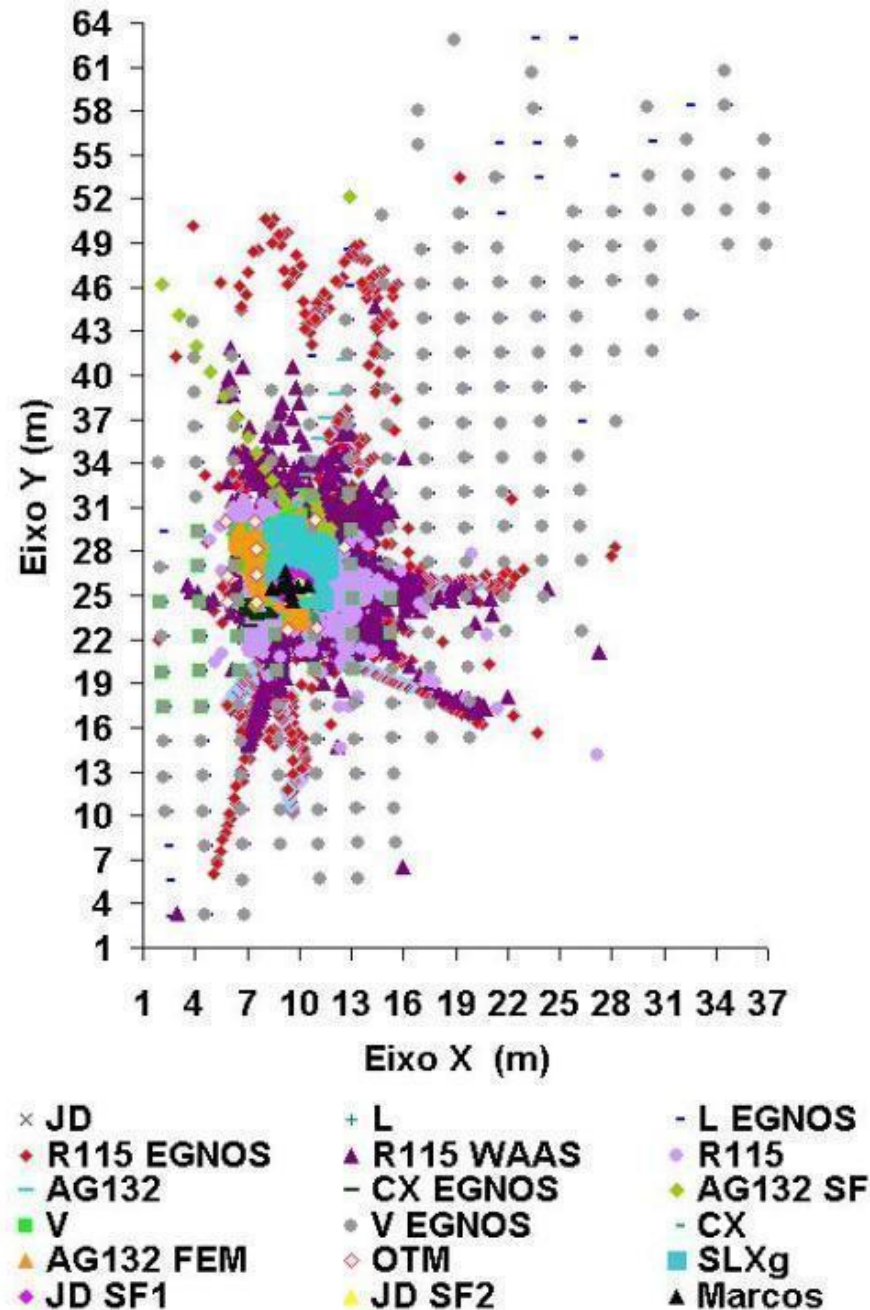
Receptores

- Trimble AG132 (AG132);
- SatLoc SLXg (SLXg);
- OmniStar TM 7000L (OTM);
- Raven 115 (R115);
- John Deere (JD);
- Garmin Legend (L);
- Garmin Vista (V);
- Garmin Vista CX (CX).

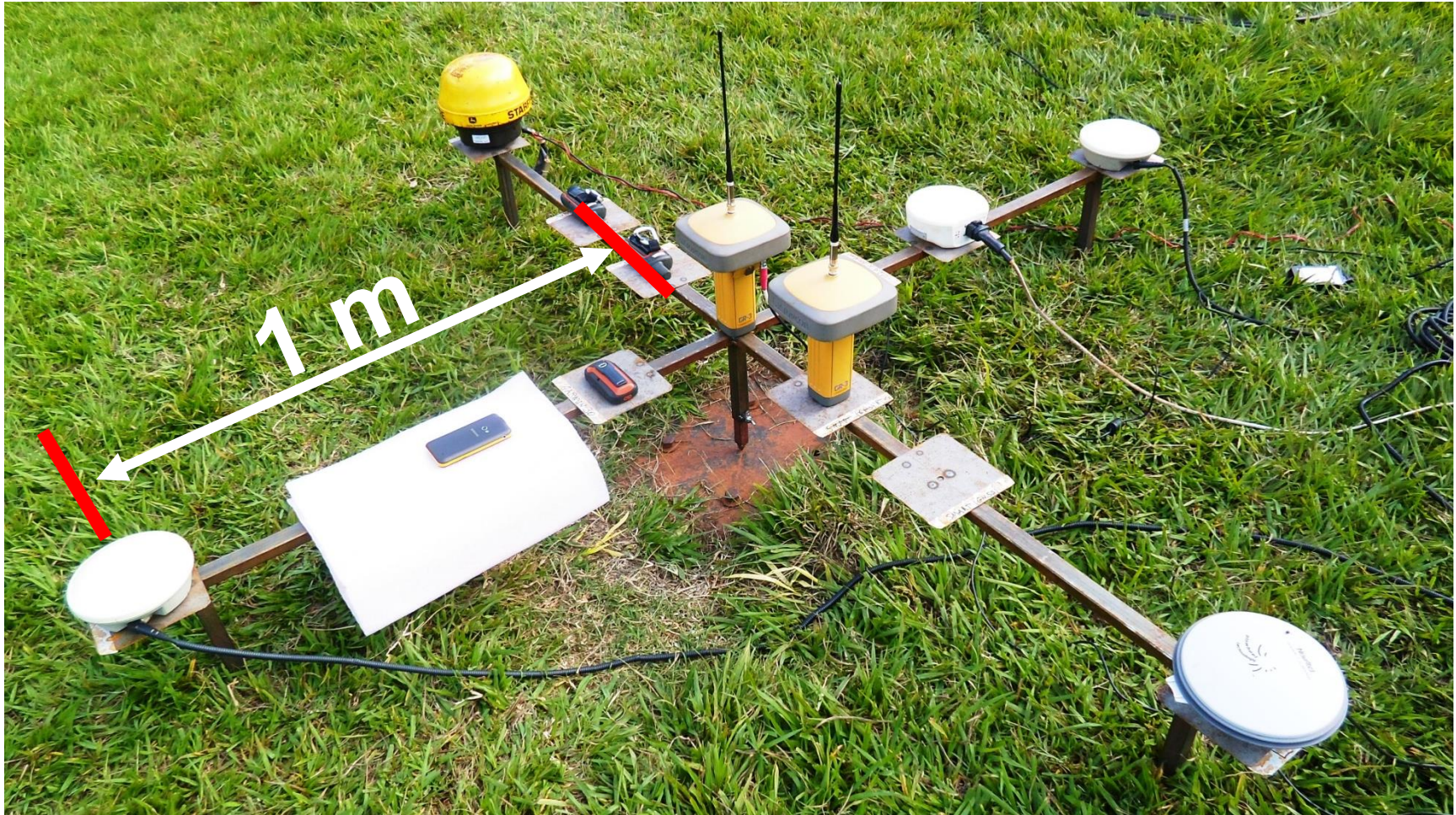


Dispersão de todos os receptores juntos

Para se converter essas coordenadas para seus valores originais basta somar 229758 no eixo X e 7485999 e no eixo y



Ensaio Estático (2014)

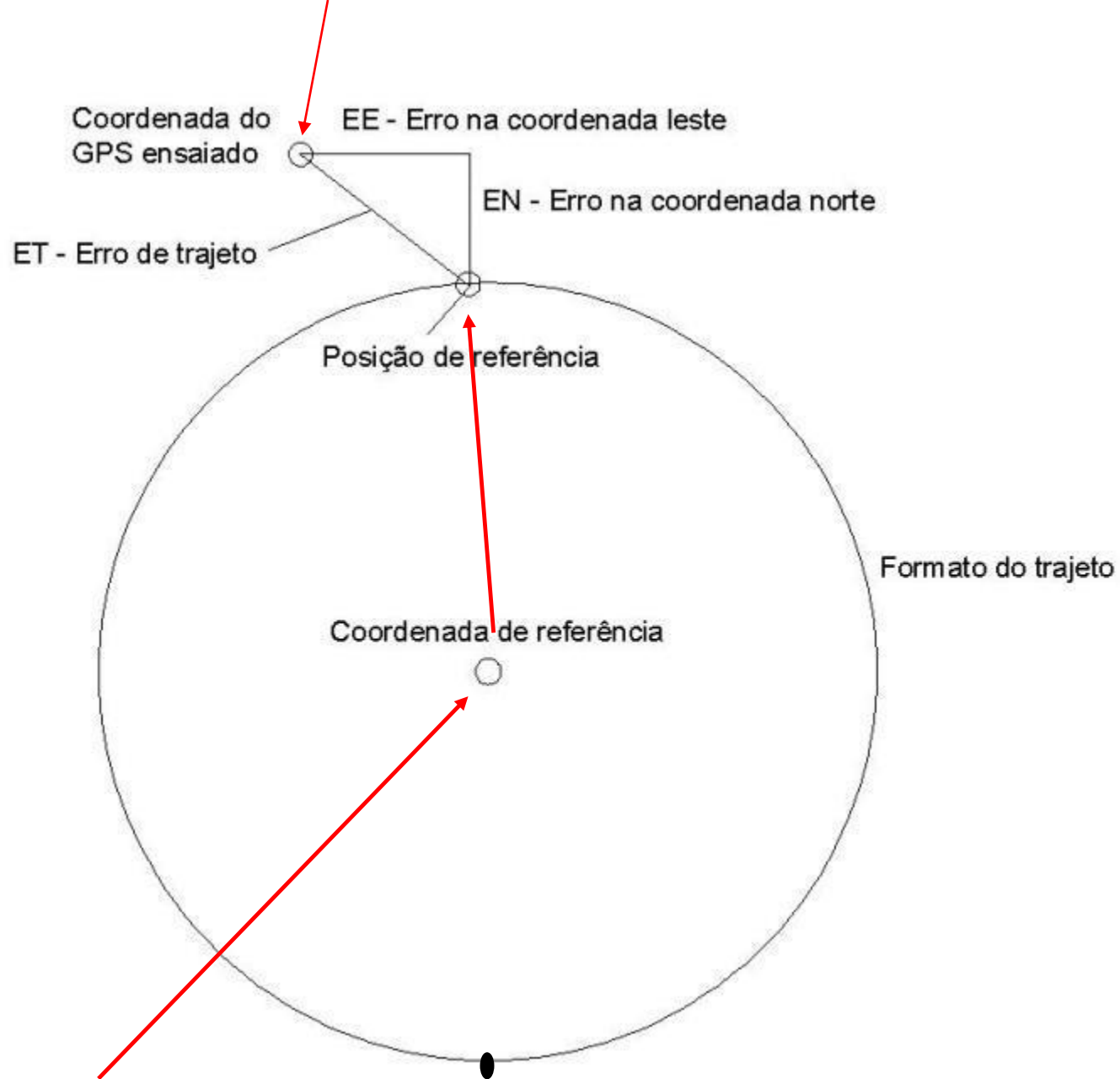


Ensaaios cinemáticos (2006)

- Veículo;
- Plataforma instrumentada;
- Pivô;
- Cabo de aço;
- Receptor GPS Trimble AG 132;
- Coletores de dados;
- Baliza topografica;
- Detector óptico de pulsos
- Sensor fotoelétrico.







Transferência da coordenada

Erro de Trajeto

$$D = \frac{\text{Pr } Np}{240}$$

$$\alpha = \frac{D}{R}$$

$$\text{PN} = \text{sen}(\alpha) R$$

$$\text{PE} = \text{cos}(\alpha) R$$

$$\text{PRN} = \text{PN} + \text{CRN}$$

$$\text{PRE} = \text{PE} + \text{CRE}$$

$$\text{EN} = \text{PRN} - \text{CGPSN}$$

$$\text{EE} = \text{PRE} - \text{CGPSE}$$

$$ET = \sqrt{(\text{EN}^2 + \text{EE}^2)}$$



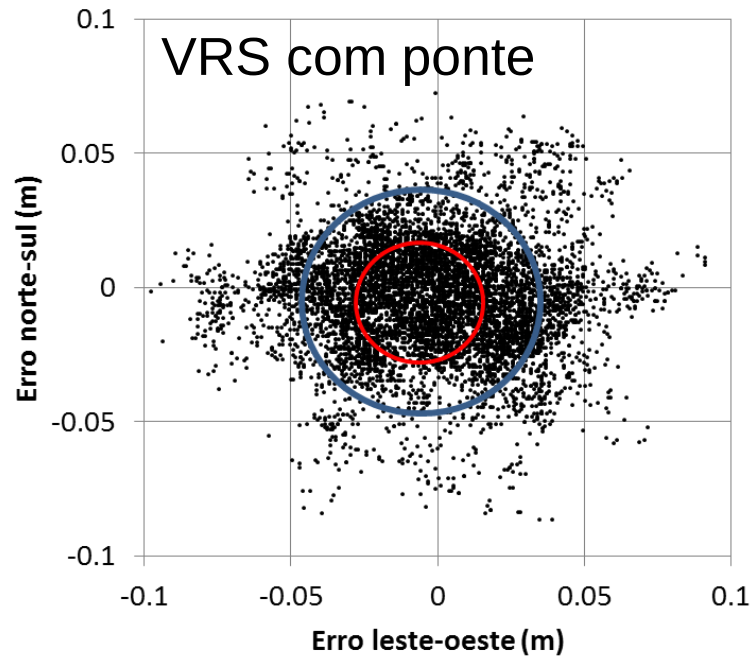
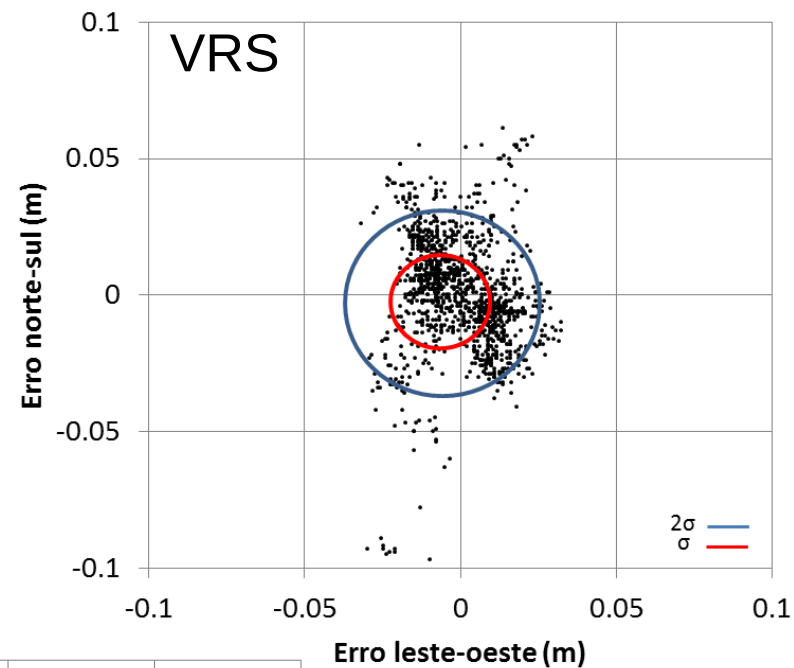
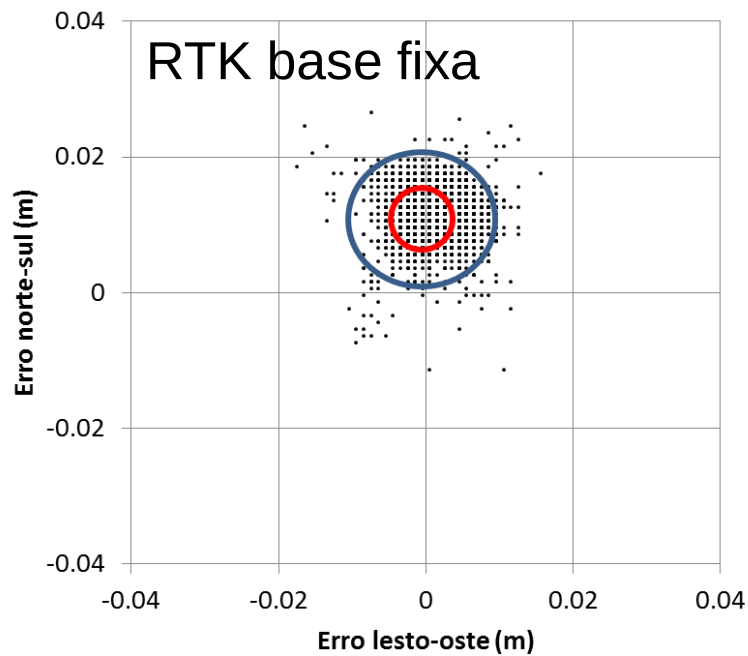


Ensaio Cinemático (2014)

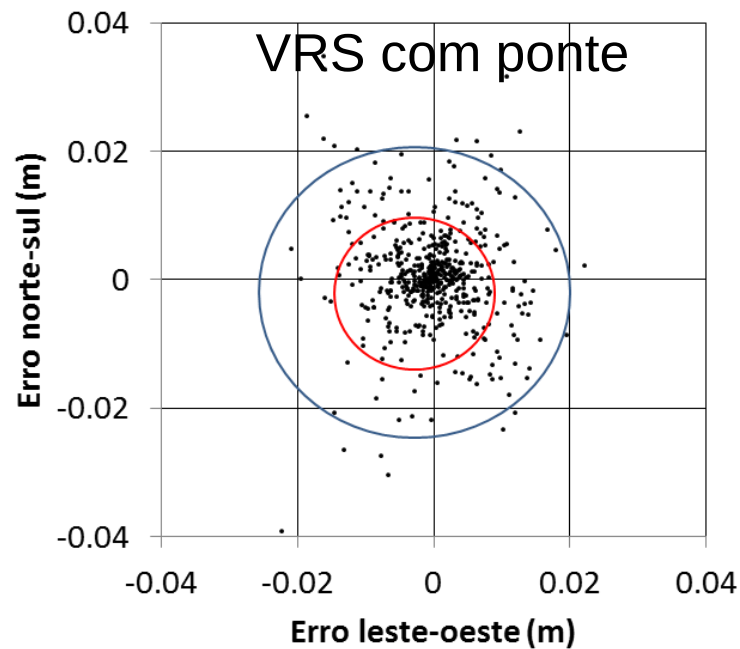
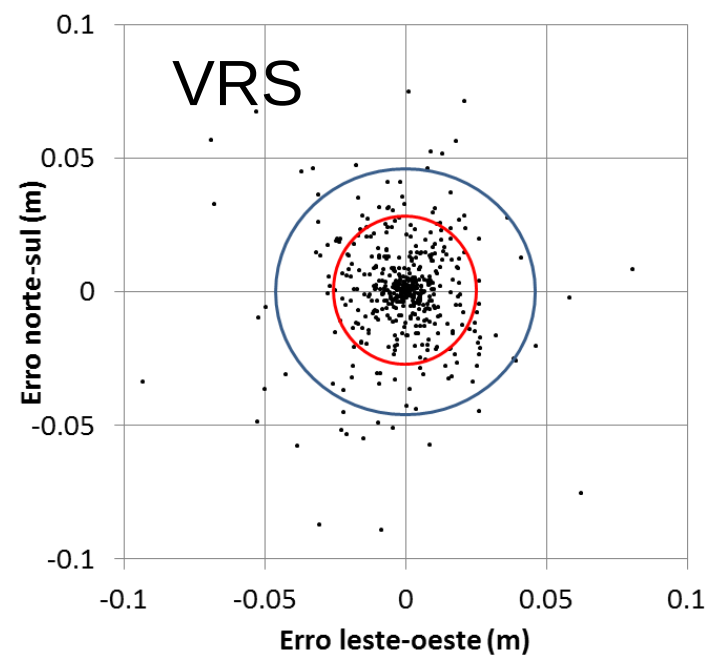
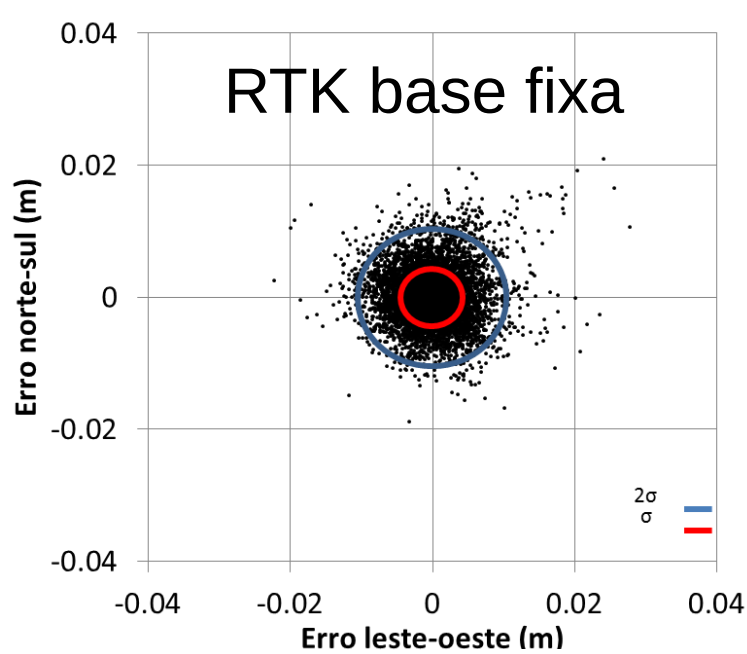


Ensaio Cinemático (2014)



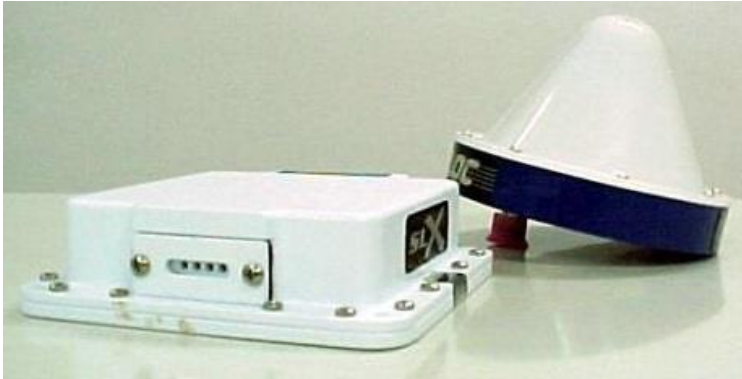


Ensaio estático
2015



Ensaio cinemático
2015

Correção por algoritmos internos



eDIF



GL1DE



Firmware