

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE**  
**FACULTAD DE HUMANIDADES**  
**CARRERA DE POSGRADO**  
**ESPECIALIZACIÓN EN TECNOLOGÍAS DE LA**  
**INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (TIG)**

***Módulo I***  
***Tema 2: Geodesia y Cartografía***

*Profesor: Agrim. Sergio Cimbaro*



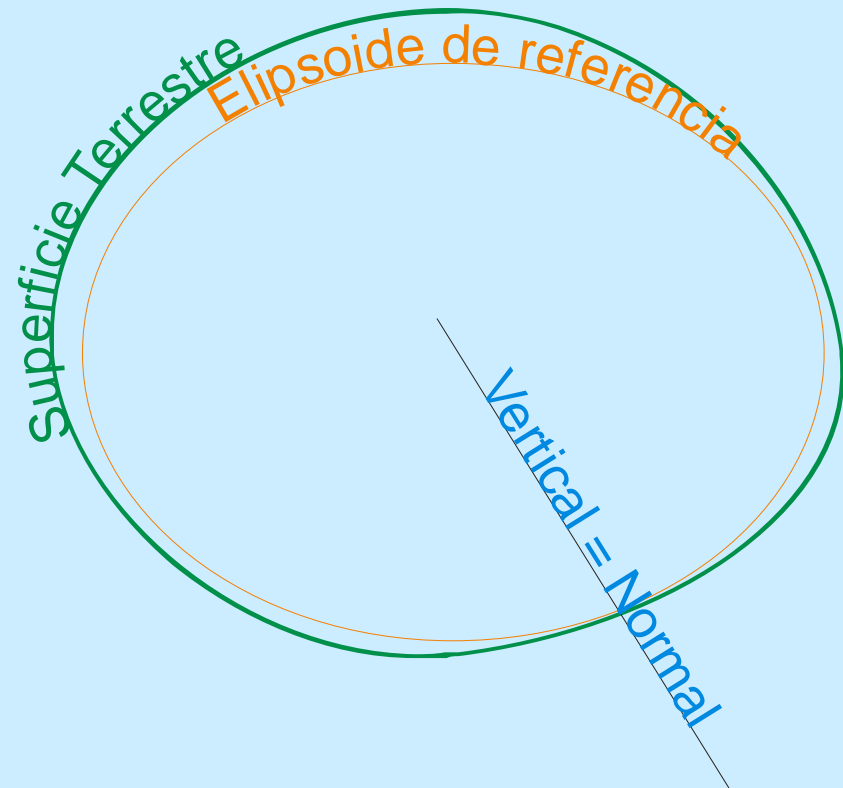
# **Sistemas y Marcos de Referencia Geodésicos**

# Sistema de Referencia

- Es un soporte matemático para asignar coordenadas a puntos medidos sobre la superficie terrestre. Parte de definiciones teóricas y convencionales basadas en mediciones.
- Es necesario definirlos para establecer la posición de puntos que respondan a un Sistema de Coordenadas con un **origen**, una **orientación** y una **escala** que sea accesible para todos los usuarios.
  - Sistema Local
    - Un punto **Datum** y un elipsoide de revolución.
  - Sistema Global
    - Terna de ejes cartesianos ortogonales, cuyo origen coincide prácticamente con el centro de masas terrestre.

# Sistema de Referencia Local

- Se define un punto **Datum** donde coinciden la normal al elipsoide y al geoide (**Origen**), definición de Latitud y Longitud.
- Esta definición es **local** ya que cambia con la **posición geográfica** del punto Datum.
- Es un sistema **planimétrico**, sin alturas asociadas.



# Sistema de Referencia Local

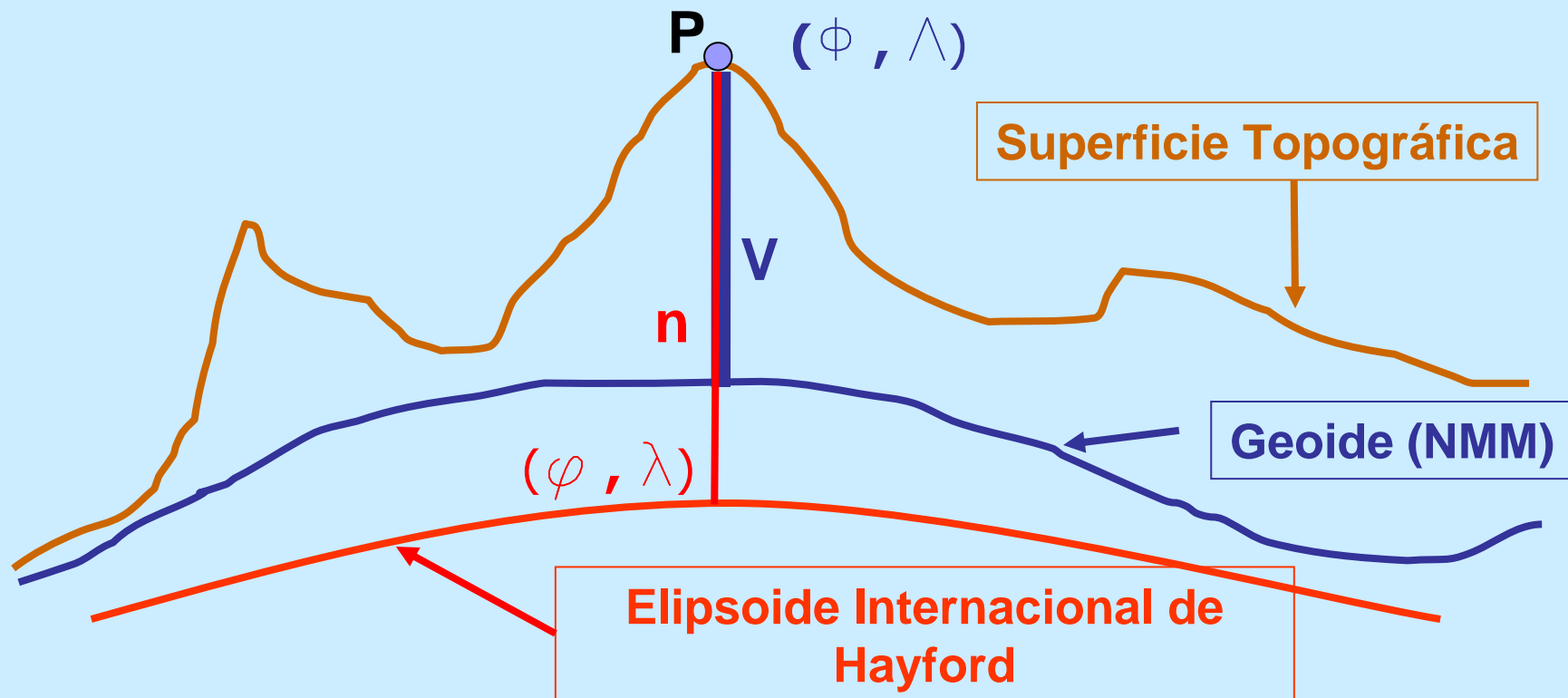
$V$  = Vertical del lugar (normal al geoide)

$(\phi, \Lambda)$  = Coordenadas astronómicas (Latitud y Longitud)

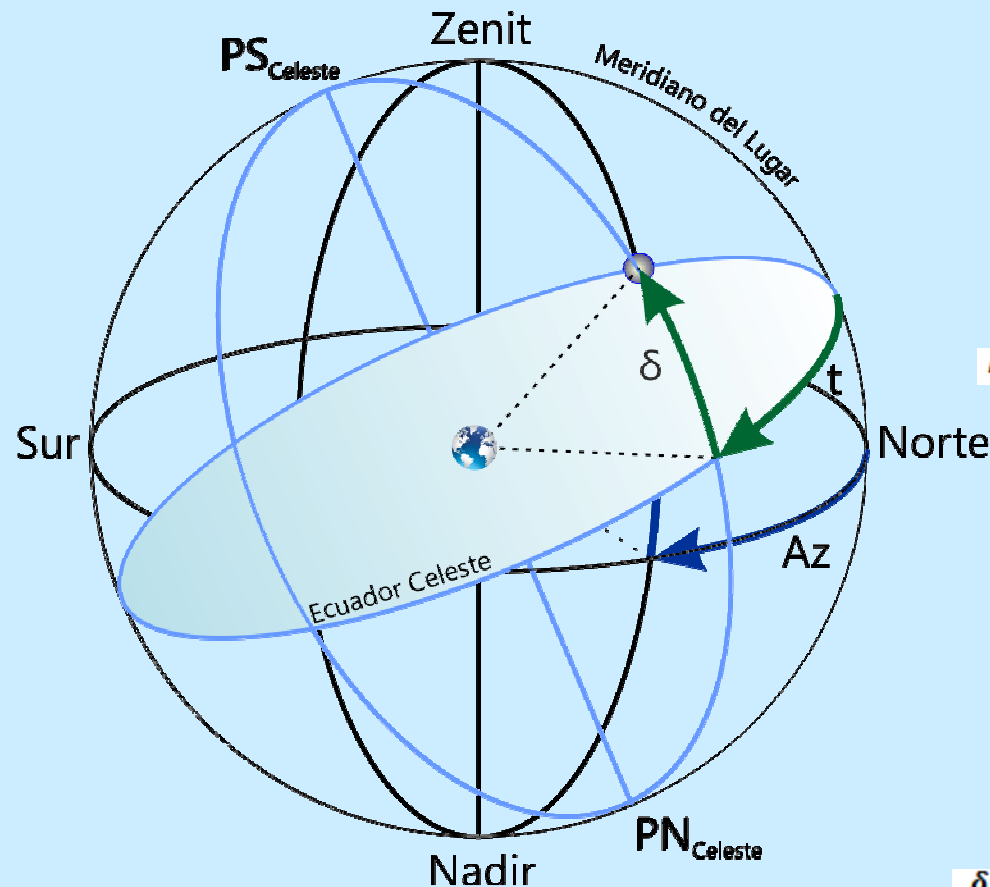
$n$  = Normal a la superficie del elipsoide

$(\varphi, \lambda)$  = Coordenadas geodésicas (Latitud y Longitud)

$P$  = Punto DATUM ( $V$  coincide con  $n$ )  $\Rightarrow$   $(\phi, \Lambda)$  coinciden con  $(\varphi, \lambda)$



# Sistemas de Coordenadas Celestes



## Horizontales

- Acimut (**Az**)
- Altura (**h**)

$$Az = \text{arcSen} \left[ \frac{\text{Sen}(t) \cdot \text{Cos}(\delta)}{\text{Cos}(h)} \right]$$

$$h = \text{arcSen}[\text{Sen}(\phi) \cdot \text{Sen}(\delta) + \text{Cos}(\phi) \cdot \text{Cos}(\delta) \cdot \text{Cos}(t)]$$

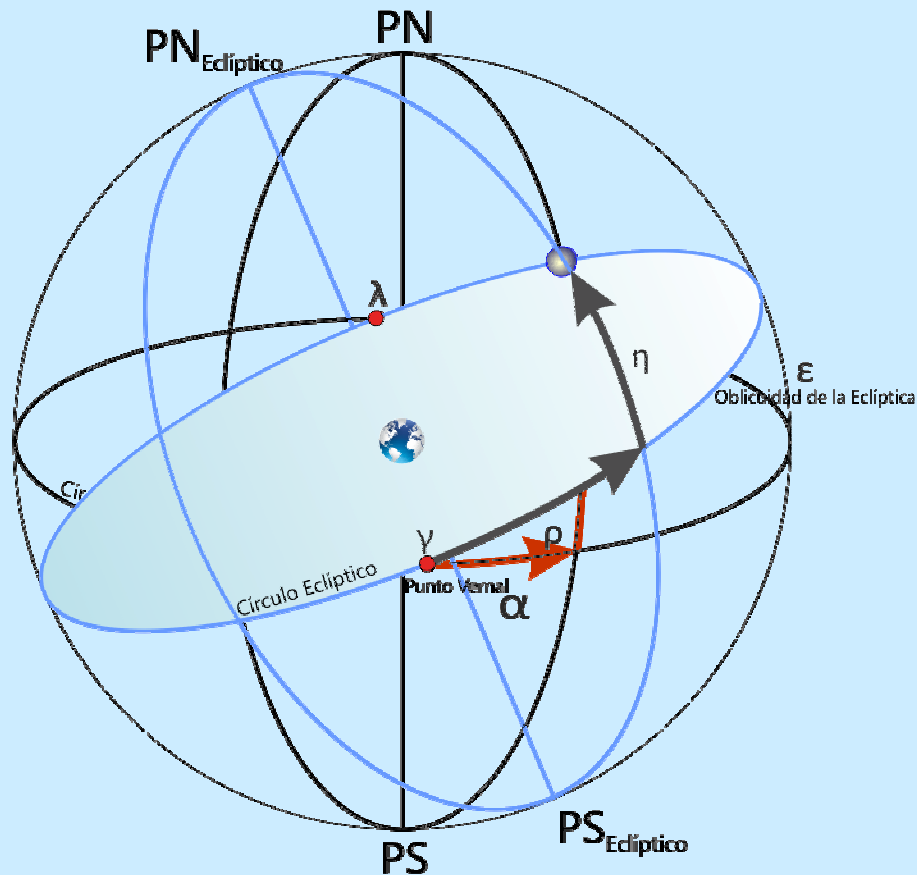
## Ecuatoriales Horarias

- Ángulo Horario (**t**)
- Declinación (**δ**)

$$t = \text{arcSen} \left[ \frac{\text{Sen}(Az) \cdot \text{Cos}(h)}{\text{Cos}(\delta)} \right]$$

$$\delta = \text{arcSen}[\text{Sen}(\phi) \cdot \text{Sen}(h) - \text{Cos}(\phi) \cdot \text{Cos}(h) \cdot \text{Cos}(Az)]$$

# Sistemas de Coordenadas Celestes



## Ecuatoriales Absolutas

- Ascensión Recta ( $\alpha$ )
- Declinación ( $\delta$ )

$$\alpha = \arccos \left[ \frac{\cos(\eta) \cdot \cos(\rho)}{\cos(\delta)} \right]$$

$$\delta = \arcsen[\cos(\epsilon) \cdot \text{Sen}(\eta) + \text{Sen}(\epsilon) \cdot \cos(\eta) \cdot \cos(\rho)]$$

## Eclípticas

- Latitud Eclíptica ( $\eta$ )
- Longitud Eclíptica ( $\rho$ )

$$\rho = \arccos \left[ \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\eta)} \right]$$

$$\eta = \arcsen[\cos(\epsilon) \cdot \text{Sen}(\delta) - \text{Sen}(\epsilon) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\alpha)]$$

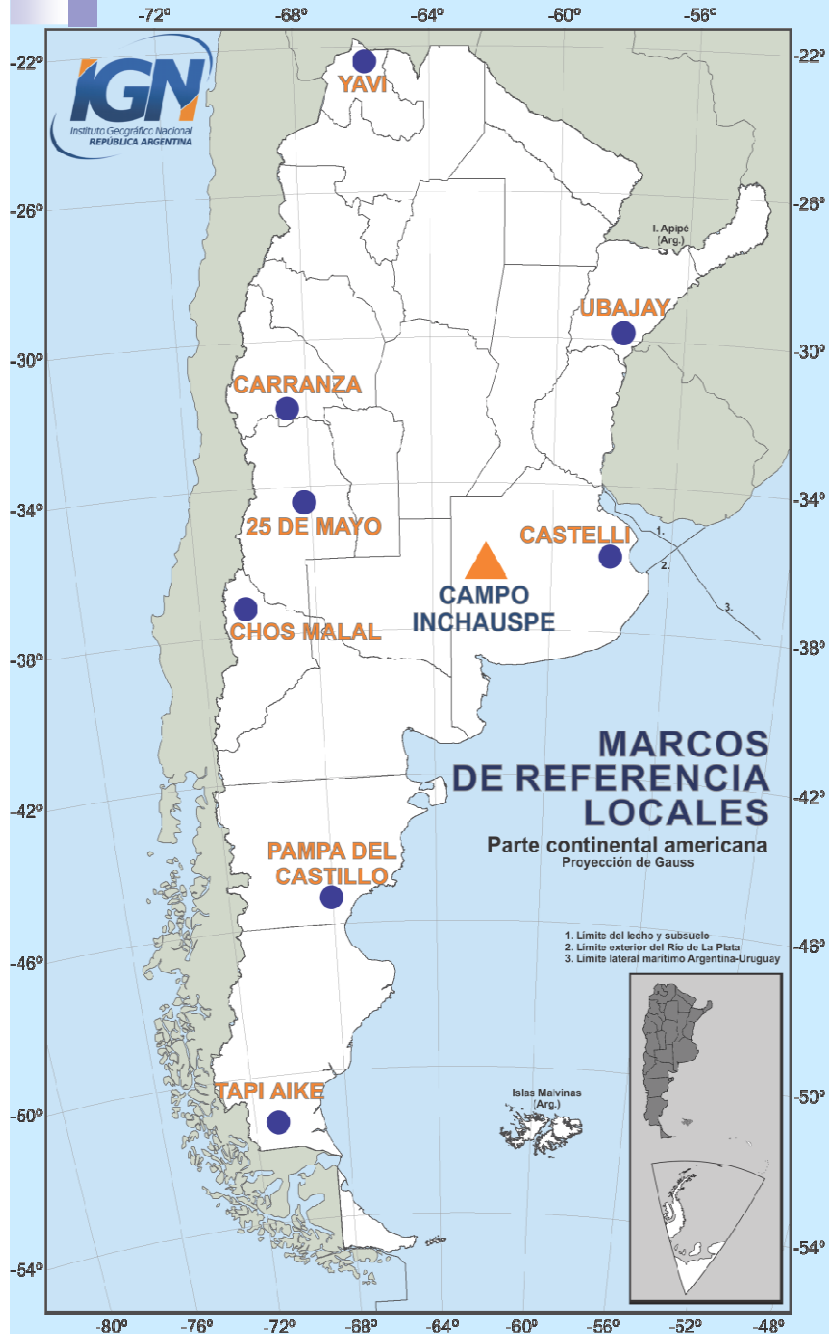
# Marcos de Referencia

- **Materialización** de un Sistema de Referencia mediante mediciones.
- Está constituido por las **coordenadas** de una red de puntos que lo definen.
- Las coordenadas de los mismos son consistentes entre sí para una **época** en particular



*Pto. Datum Campo Inchauspe*



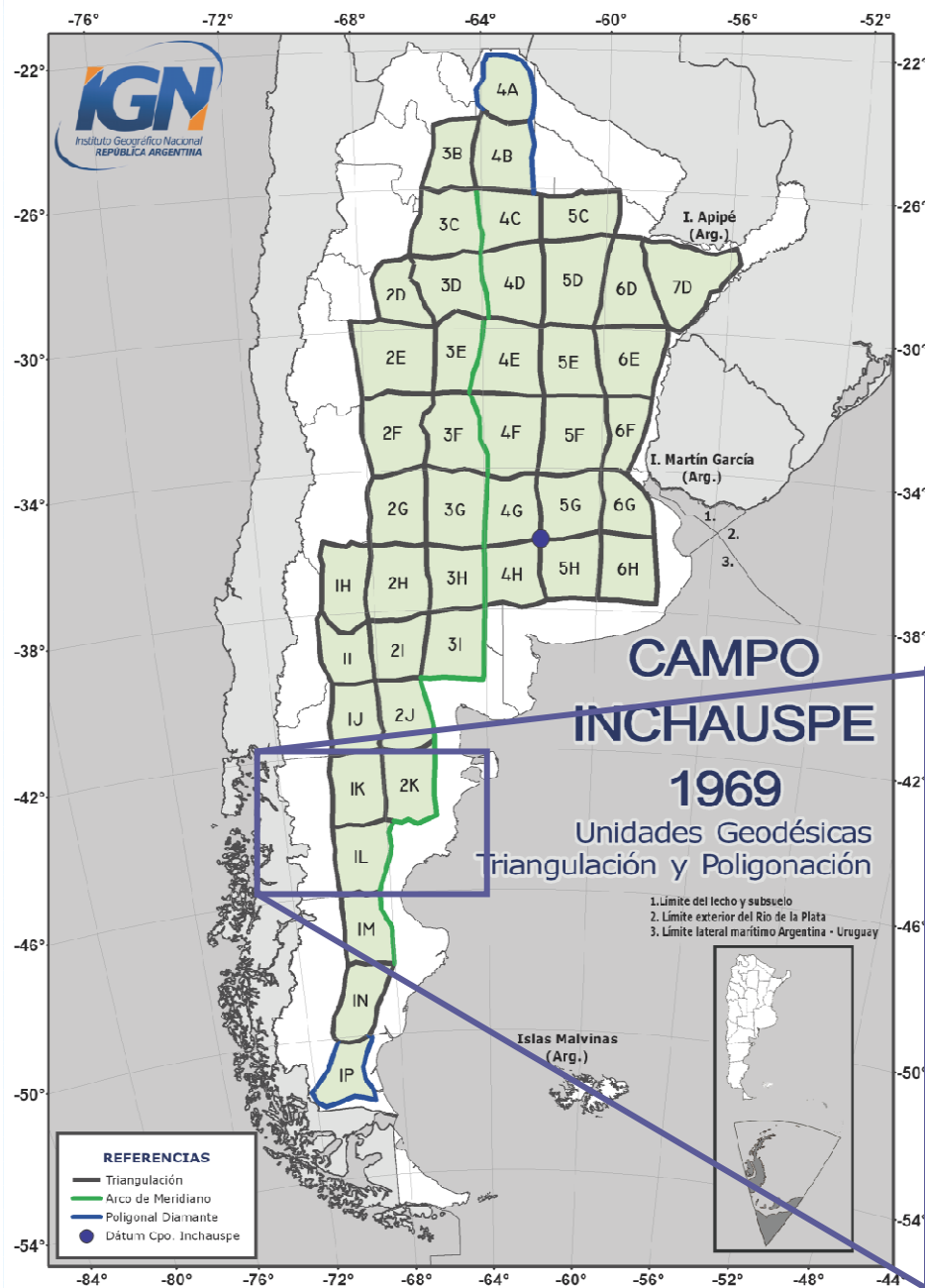


# Marcos de Referencia Locales

Marcos históricos de Argentina.

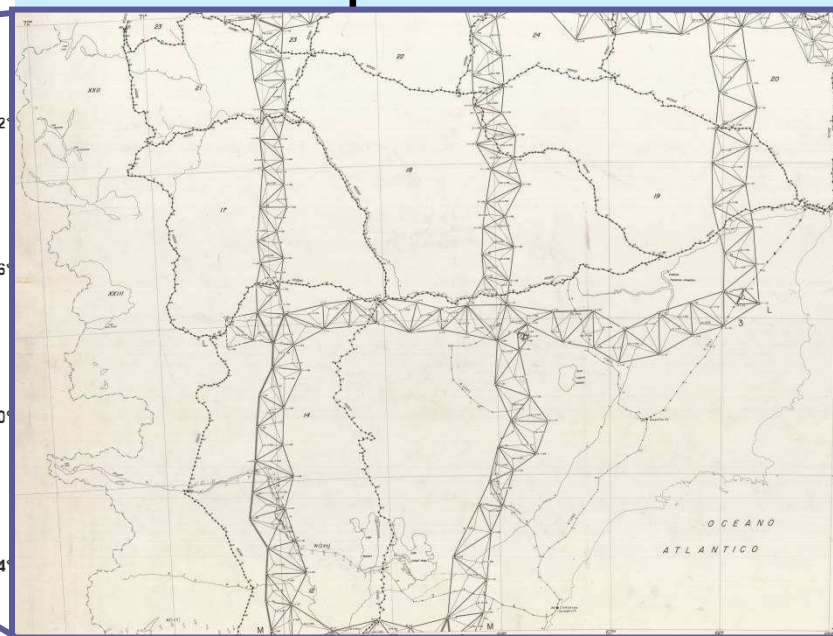
- Yavi
- Aguaray
- Carranza
- 25 de Mayo
- Castelli
- Campo Inchauspe**
- Chos Malal
- Pampa del Castillo
- Tapi Aike

■ Fueron materializados en función de las necesidades de generación de cartografía en las distintas regiones del país



# Marco de Referencia Local Campo Inchauspe

- Origen en el Punto astronómico denominado Campo Inchauspe



# Marcos de Referencia

- El Marco de Referencia Geodésico es el soporte para la confección de cartografía. Sin Marco de Referencia Geodésico no hay cartografía posible.
- Un Marco de Referencia Geodésico Nacional debe ser **ÚNICO**.

# Marcos de Referencia

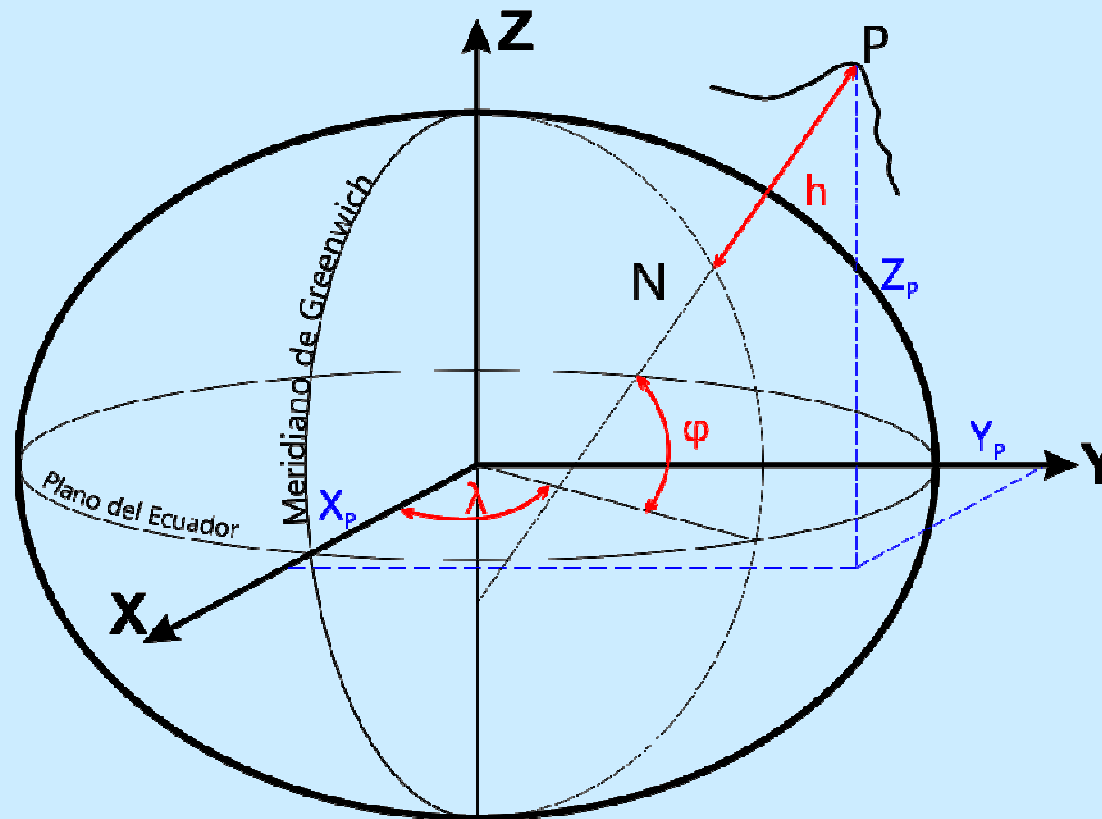
¿Qué ocurriría si no se utilizara un Marco de Referencia Único?





# Sistema de Referencia Global

- Para mejor interpretación de la ubicación se aplica transformación  $(X, Y, Z) \rightarrow (\varphi, \lambda, h)$





# Parámetros de elipsoides

## Elipsoide Hayford:

Semieje mayor (a) = 6.378.388 m

Achatamiento (f) = 1 / 297

## Elipsoide WGS 84 :

Semieje mayor (a) = 6.378.137 m

Achatamiento (f) = 1 / 298,257223563

## Elipsoide GRS 80 :

Semieje mayor (a) = 6.378.137 m

Achatamiento (f) = 1 / 298,257222101

# Relación entre Sistemas de Coordenadas

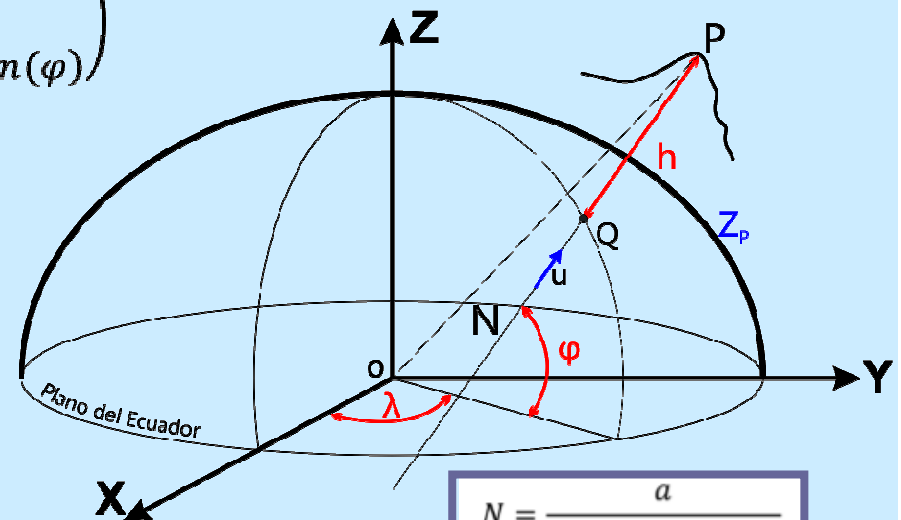
$$(X, Y, Z) \longrightarrow (\varphi, \lambda, h)$$

$$\overline{OQ} = \begin{pmatrix} XQ \\ YQ \\ ZQ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\lambda) \\ N \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Sen}(\lambda) \\ N \cdot (1 - e^2) \cdot \text{Sen}(\varphi) \end{pmatrix} = N \cdot \bar{u} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ N \cdot e^2 \cdot \text{Sen}(\varphi) \end{pmatrix}$$

$$\bar{h} = \overline{QP} = \begin{pmatrix} N \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\lambda) \\ N \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Sen}(\lambda) \\ h \cdot \text{Sen}(\varphi) \end{pmatrix} = h \cdot \bar{u}$$

$$\overline{OP} = \overline{OQ} + \overline{QP}, \quad \text{Con lo que:}$$

$$\overline{OP} = \begin{pmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h) \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\lambda) \\ (N + h) \cdot \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Sen}(\lambda) \\ [N \cdot (1 - e^2) + h] \cdot \text{Sen}(\varphi) \end{pmatrix} = (N + h) \begin{pmatrix} \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Cos}(\lambda) \\ \text{Cos}(\varphi) \cdot \text{Sen}(\lambda) \\ \text{Sen}(\varphi) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ N \cdot e^2 \cdot \text{Sen}(\varphi) \end{pmatrix}$$



$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \text{Sen}^2(\varphi)}}$$



# Relación entre Sistemas de Coordenadas

$$(\varphi, \lambda, h) \longrightarrow (X, Y, Z)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{Z \frac{b}{a} + e^2 a \cdot \operatorname{sen}^3(u)}{\frac{b}{a}(\rho - e^2 a \cdot \operatorname{cos}^3(u))} \quad -90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$$

$$\operatorname{tg}(\lambda) = \frac{Y}{X} \quad -180^\circ \leq \lambda \leq 180^\circ$$

$$h = \rho \cdot \operatorname{cos}(\varphi) + Z \cdot \operatorname{sen}(\varphi) - a(1 - e^2 \cdot \operatorname{sen}^2(\varphi))^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

- $r = (\rho^2 + Z^2)^{\frac{1}{2}}$
- $\rho = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}$
- $\operatorname{tg}(u) = \frac{Z}{\rho} \cdot \left( \frac{b}{a} + e^2 \frac{a}{r} \right)$   
 $-90^\circ \leq u \leq 90^\circ$

# Relación entre Sistemas de Coordenadas

X: 2921443 m

Y: -4854359 m

Z: -2919683 m

Latitud:  $-27^{\circ}25'13.58379''$

Longitud:  $-58^{\circ}57'34.89520''$

Altura Elipsoidal: 77.959 m



# Sistemas de Referencia Espacial y Terrestre

- En base a las precisiones alcanzadas en las técnicas de medición, para la astronomía, geodesia y geodinámica es necesario contar con dos Sistemas de Referencia: uno fijo en el Espacio y otro fijo en la Tierra.
- Al Sistema fijo en el Espacio se lo denomina **International Celestial Reference System (ICRS – Sistema de Referencia Internacional Celeste)**.
- Al Sistema Fijo a la Tierra se lo denomina **International Terrestrial Reference System (ITRS – Sistema de Referencia Internacional Terrestre)**.



## **ICRS / ICRF**

### **International Celestial Reference System**

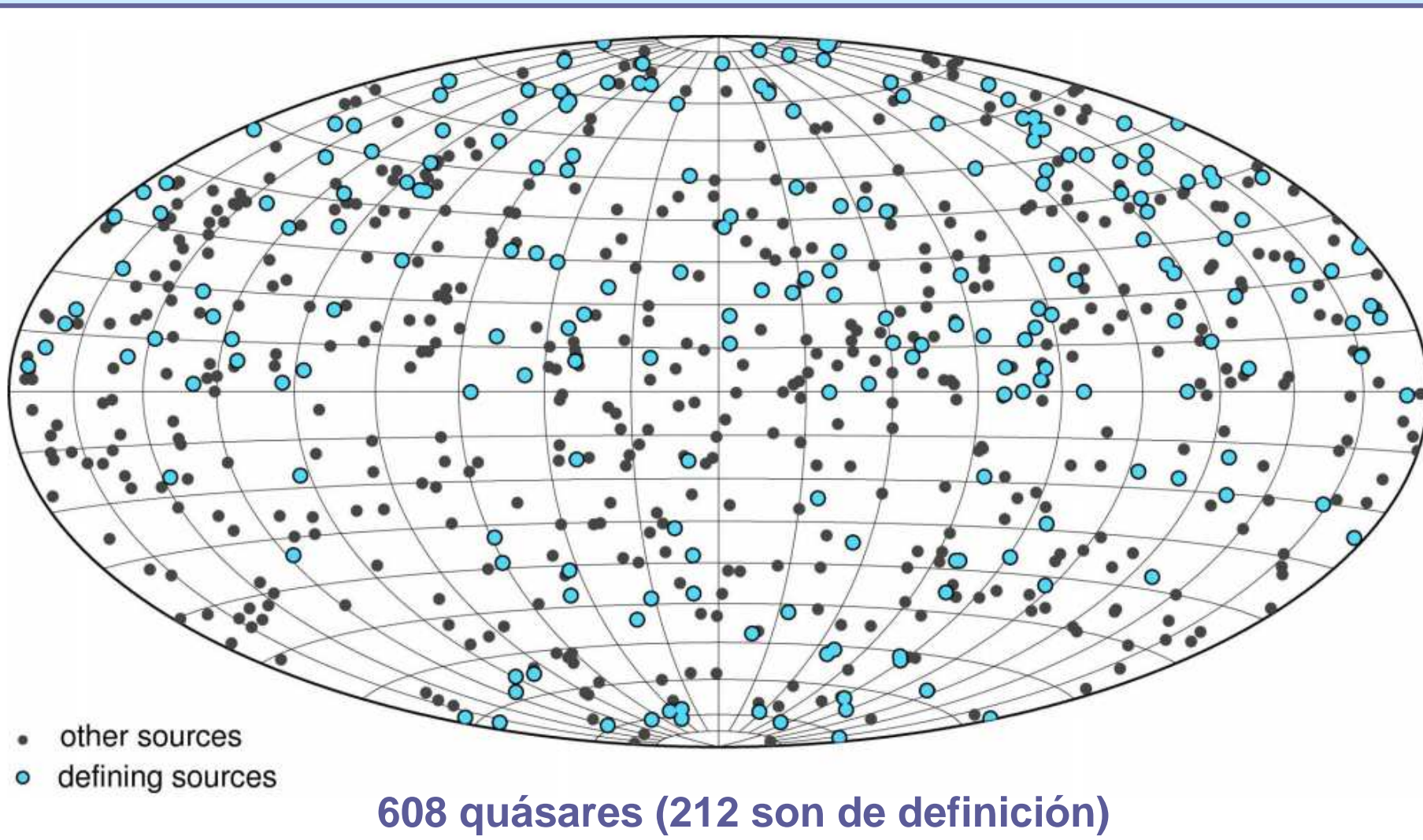
### **International Celestial Reference Frame**

El ICRS es un Sistema de Referencia inercial ubicado en el Baricentro del Sistema Solar con los ejes en direcciones fijas apuntando a quásares.

El eje X se ubica fijo en una posición cercana al punto Vernal, el eje Z cercano al polo norte celeste y el plano XY está ubicado cercano al plano medio definido para la época J2000.

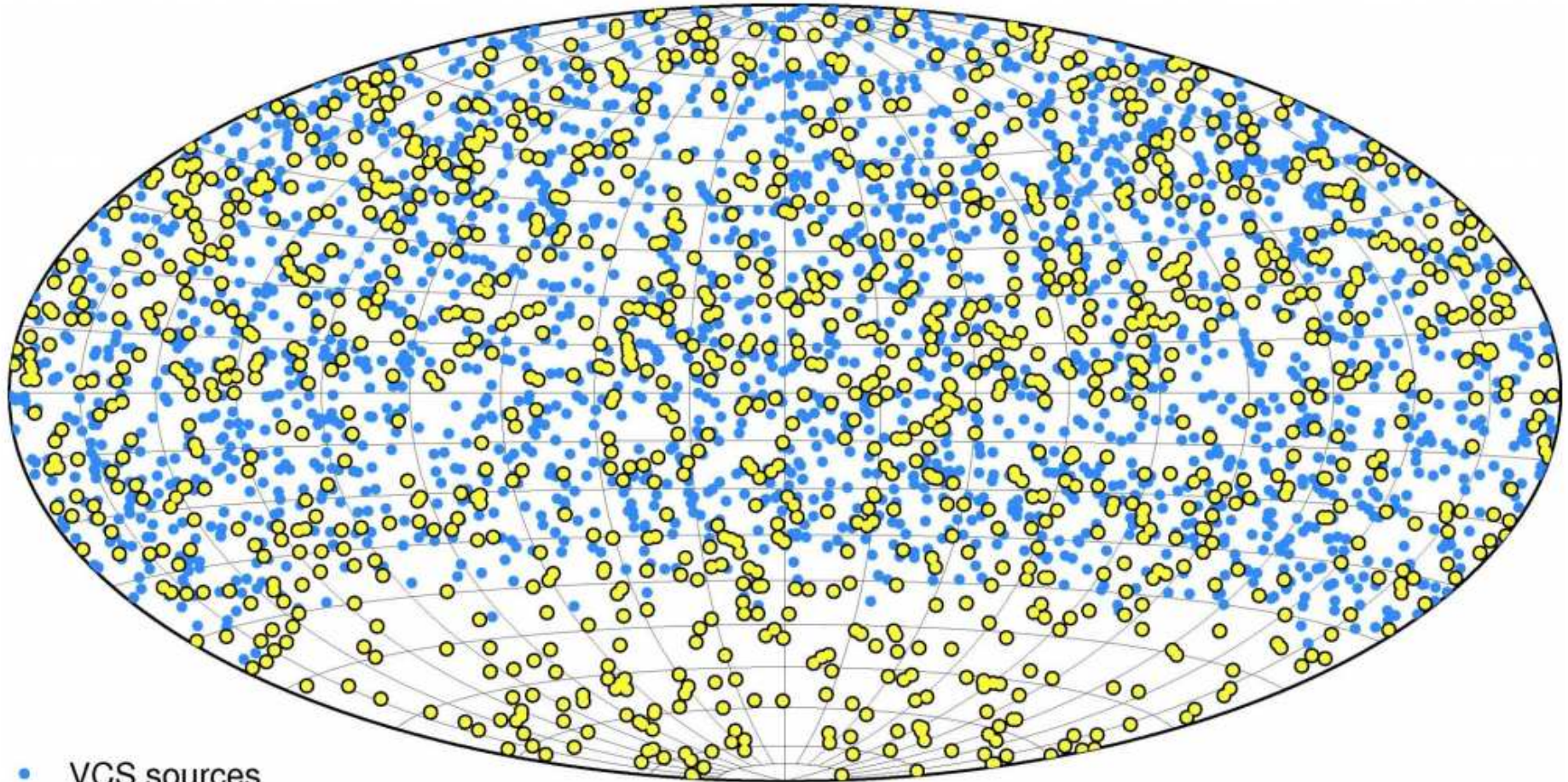
El ICRF (Marco de Referencia Celeste Internacional), queda materializado por 608 quásares seleccionados por la Unión Astronómica Internacional.

# ICRF1 (1997)





# ICRF2 (2009)



- VCS sources
- non-VCS sources

**3414 quásares (295 son de definición)**

## ICRF1 vs ICRF2

	ICRF1	ICRF2
Observaciones VLBI	1.6 Millones	6.5 Millones
Fuentes de Definición	212	295
Cantidad Total de fuentes	608	3414
Estabilidad de los ejes	~30 $\mu$ as	~10 $\mu$ as



## **ITRS / ITRF**

### **International Terrestrial Reference System**

### **International Terrestrial Reference Frame**

El ITRS es un Sistema de Referencia Fijo a la Tierra, con el origen ubicado en el centro de masas terrestre con los ejes en direcciones fijas establecidas por convención.

El eje X se ubica fijo en la dirección del Meridiano de Greenwich, el eje Z coincidente con el eje de rotación terrestre, el eje Y completa la terna y el plano XY está ubicado coincidente con el plano del ecuador. Todas estas direcciones están definidas para una época en particular que forma parte de la definición.

El ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional), queda materializado por puntos fijos del terreno que posean técnicas permanentes de medición astronómica.



# Sistema de Referencia Convencional Terrestre

Movimiento de oscilación del eje de rotación de la tierra:

Respecto al sistema Espacio Fijo (Precesión y nutación)

Respecto al sistema Tierra Fija (movimiento polar)

Definición del Sistema Convencional:

ICRS: Sistema de Referencia Celeste Internacional (inercial)

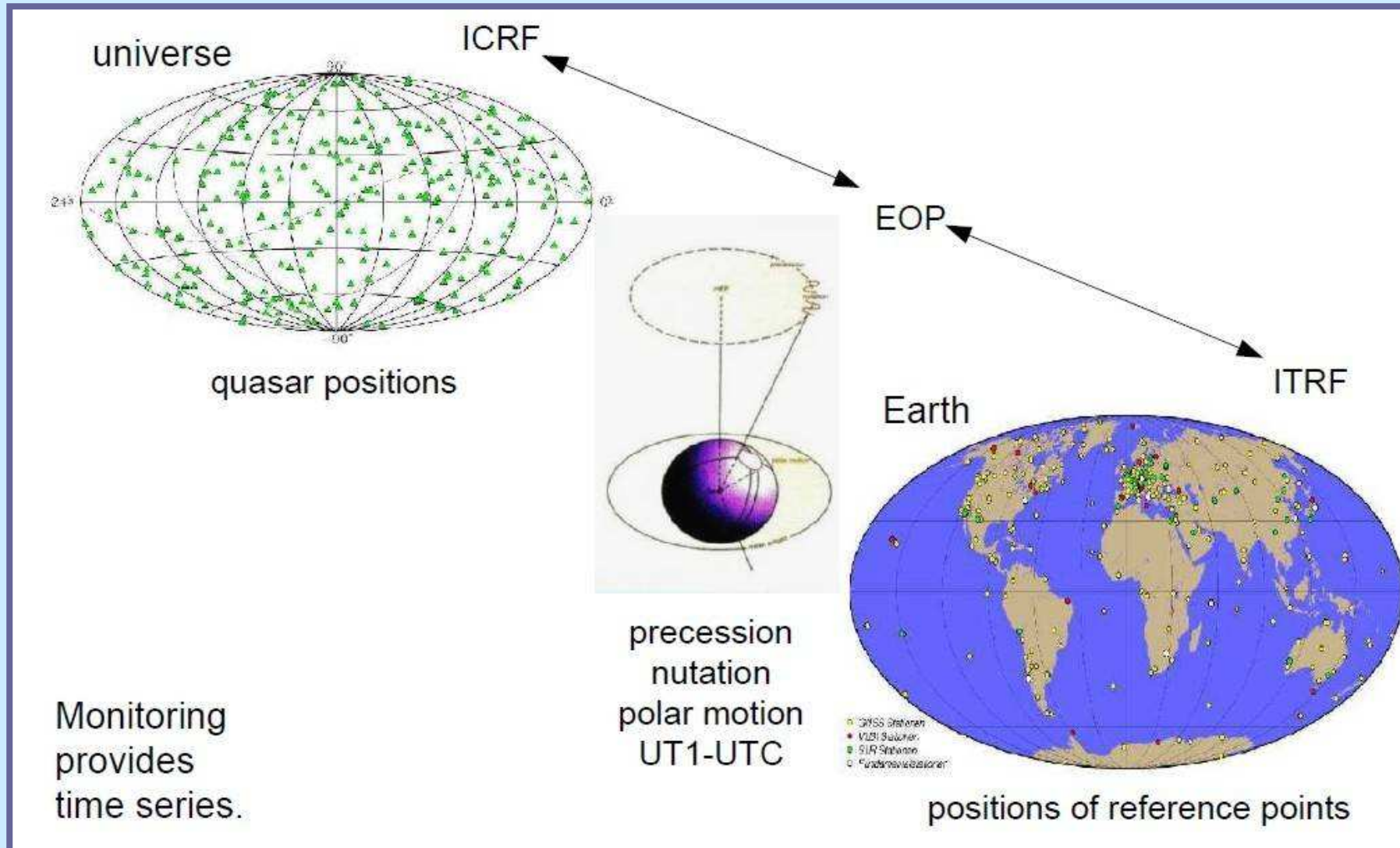
ITRS: Sistema de Referencia Terrestre Internacional (convencional)

CTP: Polo Terrestre Convencional (Eje Z)

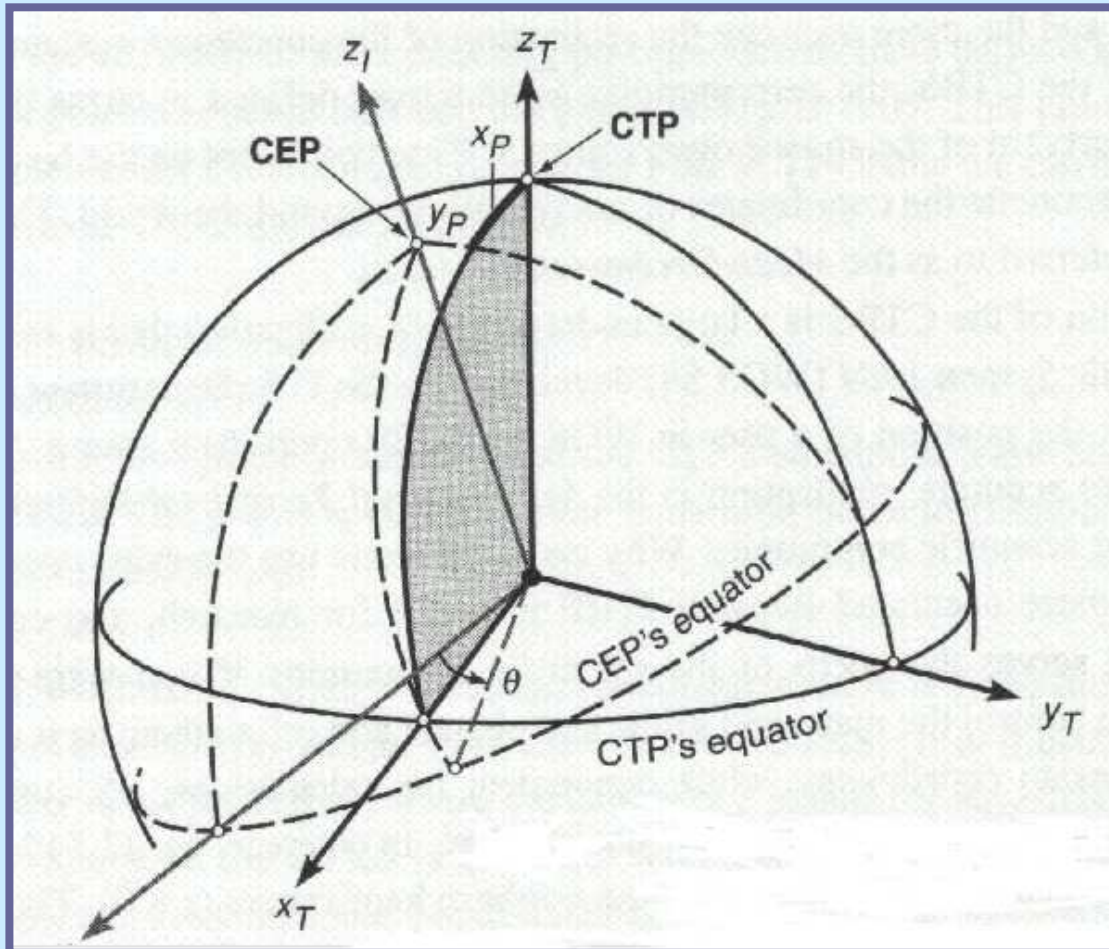
Meridiano de Greenwich: (Eje X)

Los ejes X, Y, Z, corresponden al Sistema de Referencia Terrestre Convencional (CTRS), definidos para una época en particular.

# Sistemas de Referencia Espacial y Terrestre



# Relación entre Espacio Fijo y Tierra Fija



CTP: Polo Terrestre  
Convencional

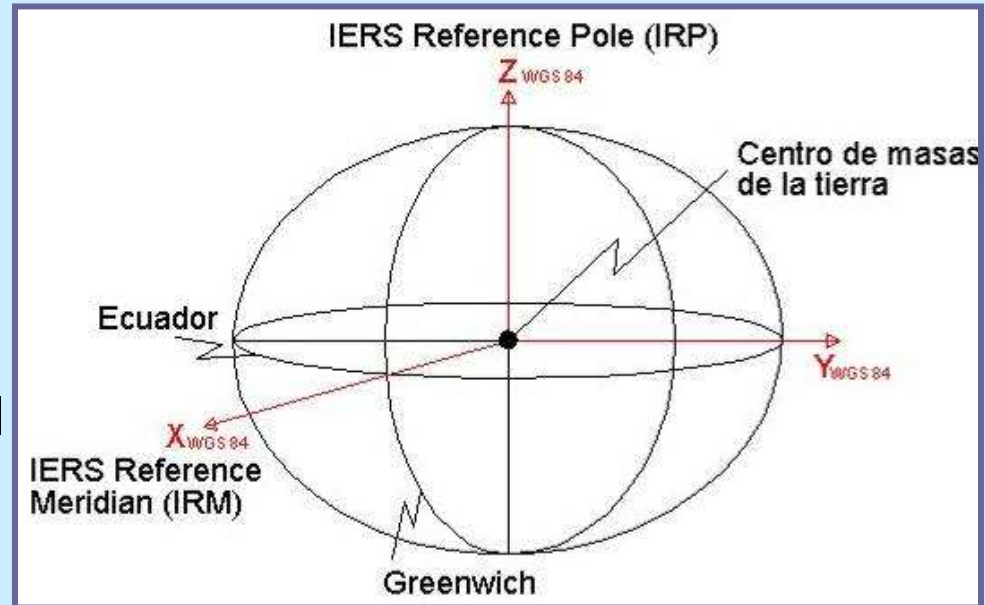
CEP: Polo de efemérides  
celeste

$\Theta$ : Tiempo Sidéreo en  
Greenwich

EOP: Parámetros de  
Orientación Terrestre.

# Marco de Referencia Global WGS84

- Origen: centro de masas de la tierra
- Eje Z: Corresponde a la dirección del Polo Convencional Terrestre (CTP en su sigla en inglés) (época 1984.0) definida por el BIPM.
- Eje X: Intersección del Meridiano de Referencia Internacional (IRM en su sigla en inglés) y el plano que pasa por el origen, normal al eje Z. El IRM es cercano al Meridiano Cero definido por el BIPM (época 1984.0).
- Eje Y: Completa el sistema de coordenadas ortogonal, Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF).
- Establecido por el **Departamento de Defensa de los EEUU**.





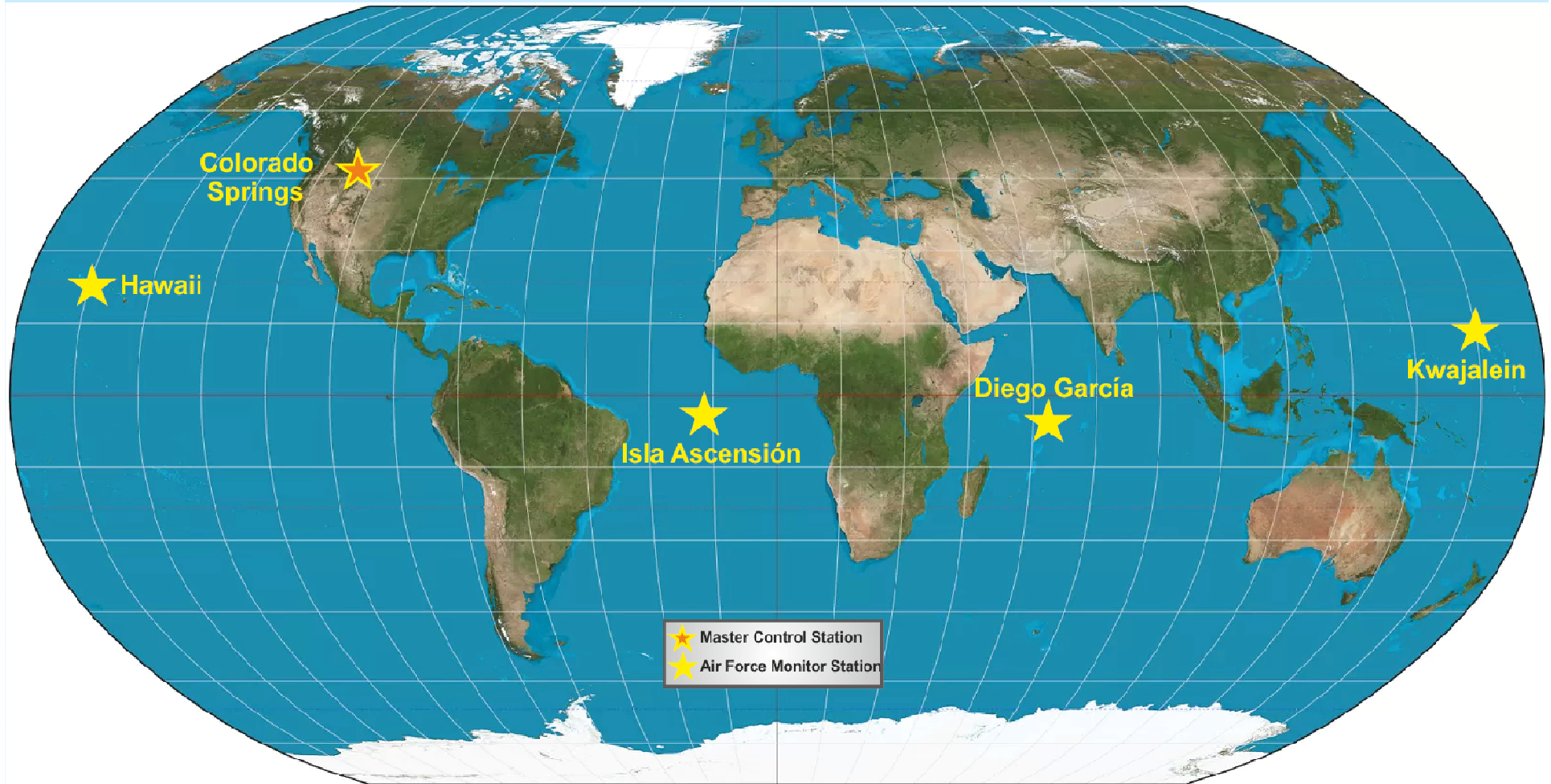
# Estaciones GPS - Definición WGS 84

WGS 84 Station Set G873: Cartesian Coordinates\*, 1997.0 Epoch

Station Location	NIMA Station Number	X (km)	Y (km)	Z (km)
<b><u>Air Force Stations</u></b>				
Colorado Springs	85128	-1248.597221	-4819.433246	3976.500193
Ascension	85129	6118.524214	-1572.350829	-876.464089
Diego Garcia(<2 Mar 97)	85130	1917.032190	6029.782349	-801.376113
Diego Garcia(>2 Mar 97)	85130	1916.197323	6029.998996	-801.737517
Kwajalein	85131	-6160.884561	1339.851686	960.842977
Hawaii	85132	-5511.982282	-2200.248096	2329.481654
<b><u>NIMA Stations</u></b>				
Australia	85402	-3939.181976	3467.075383	-3613.221035
Argentina	85403	2745.499094	-4483.636553	-3599.054668
England	85404	3981.776718	-89.239153	4965.284609
Bahrain	85405	3633.910911	4425.277706	2799.862677
Ecuador	85406	1272.867278	-6252.772267	-23.801890
US Naval Observatory	85407	1112.168441	-4842.861714	3985.487203
China	85409	-2148.743914	4426.641465	4044.656101

\*Coordinates are at the antenna electrical center.

# Estaciones GPS (USAF-NGA) Determinación WGS84



# Definición WGS 84 - Parámetros

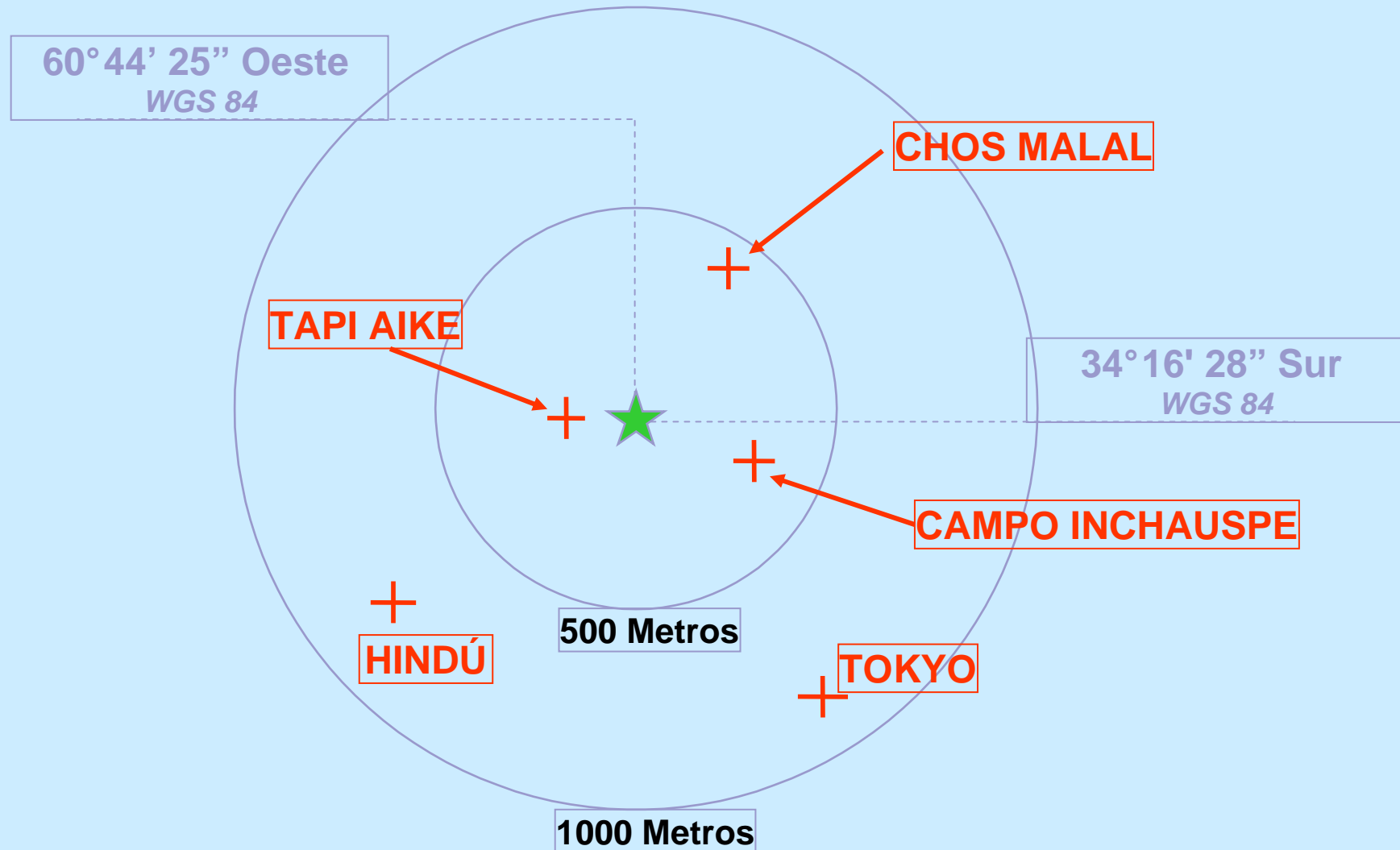
WGS 84 Four Defining Parameters

Parameter	Notation	Value
Semi-major Axis	$a$	6378137.0 meters
Reciprocal of Flattening	$1/f$	298.257223563
Angular Velocity of the Earth	$\omega$	$7292115.0 \times 10^{-11}$ rad/s
Earth's Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Included)	$GM$	$3986004.418 \times 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$

WGS 84 Parameter Values for Special Applications

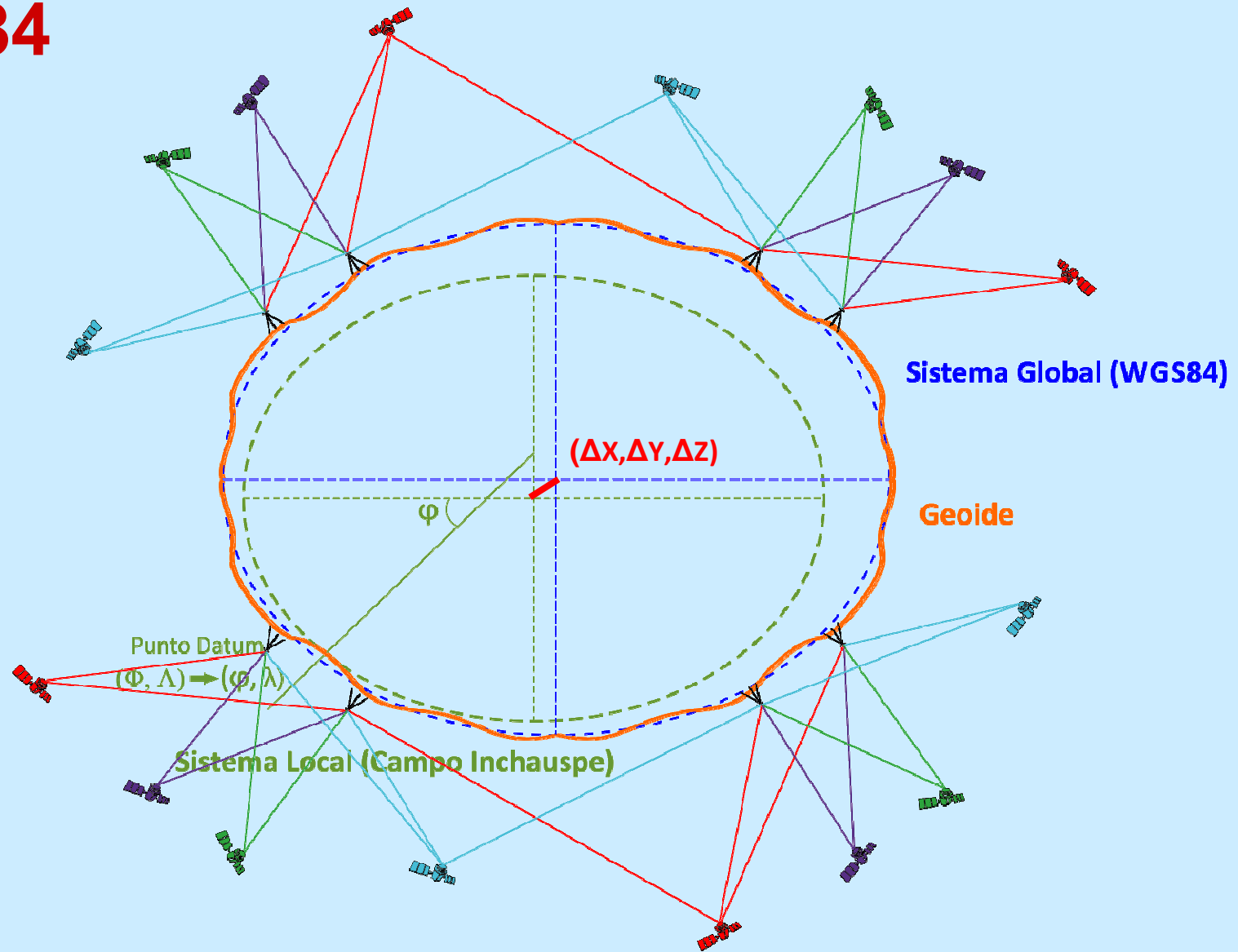
Parameter	Notation	Value	Accuracy ( $1\sigma$ )
Gravitational Constant (Mass of Earth's Atmosphere Not Included)	$GM'$	$3986000.9 \times 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$	$\pm 0.1 \times 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$
$GM$ of the Earth's Atmosphere	$GM_A$	$3.5 \times 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$	$\pm 0.1 \times 10^8 \text{m}^3/\text{s}^2$
Angular Velocity of the Earth (In a Precessing Reference frame)	$\omega^*$	$(7292115.8553 \times 10^{-11} +$ $4.3 \times 10^{-15} T_U)$ rad/s	$\pm 0.15 \times 10^{-11}$ rad/s

# Diferencia entre Marcos de Referencia Locales y WGS84





# Diferencia entre **Campo Inchauspe** y **WGS84**



# Transformación de Molodensky

$$\varphi_1, \lambda_1, h_1 \rightarrow \varphi_2, \lambda_2, h_2$$

$$\Delta\varphi = \rho'' / M \cdot ( -\Delta X \cdot \text{SEN } \varphi \cdot \text{COS } \lambda - \Delta Y \cdot \text{SEN } \varphi \cdot \text{SEN } \lambda + \Delta Z \cdot \text{COS } \varphi + ( a \cdot \Delta f + f \cdot \Delta a ) \cdot \text{SEN } 2 \varphi )$$

$$\Delta\lambda = \rho'' / N \cdot \text{COS } \varphi \cdot ( -\Delta X \cdot \text{SEN } \lambda + \Delta Y \cdot \text{COS } \lambda )$$

$$\Delta h = \Delta X \cdot \text{COS } \varphi \cdot \text{COS } \lambda + \Delta Y \cdot \text{COS } \varphi \cdot \text{SEN } \lambda + \Delta Z \cdot \text{SEN } \varphi + ( a \cdot \Delta f + f \cdot \Delta a ) \cdot \text{SEN}^2 \varphi - \Delta a$$

Los valores  $\Delta\varphi$  y  $\Delta\lambda$  se obtienen en segundos de arco (") y  $\Delta h$  en metros (m)

# Parámetros de Transformación

Campo Inchauspe 69  $\Rightarrow$  WGS 84 (Posgar 94)

$$\Delta X = - 148 \text{ m}$$

$$\Delta Y = + 136 \text{ m}$$

$$\Delta Z = + 90 \text{ m}$$

$$\Delta a = - 251 \text{ m}$$

$$\Delta f = - 1,419270155 \cdot 10^{-5}$$

Las diferencias (  $\Delta$  ) se obtienen como :

Sistema Campo Inchauspe 69 - Sistema Posgar 94


# Parámetros de Transformación

Appendix B.7  
Transformation Parameters  
Local Geodetic Datums to WGS 84

Continent: SOUTH AMERICA										
Local Geodetic Datums		Reference Ellipsoids and Parameter Differences			No. of Satellite Stations Used	Transformation Parameters				
Name	Code	Name	$\Delta a(m)$	$\Delta f \times 10^4$		Cycle Number	Pub. Date	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta Z(m)$
<b>BOGOTA OBSERVATORY</b> Colombia	BOO	International 1924	-251	-0.14192702	7	0	1987	307 +6	304 +5	-318 +6
<b>CAMPO INCHAUSPE 1969</b> Argentina	CAI	International 1924	-251	-0.14192702	20	0	1987	-148 ±5	136 ±5	90 ±5
<b>CHUA ASTRO</b> Paraguay	CHU	International 1924	-251	-0.14192702	6	0	1987	-134 ±6	229 ±9	-29 ±5
<b>CORREGO ALEGRE</b> Brazil	COA	International 1924	-251	-0.14192702	17	0	1987	-206 ±5	172 ±3	-6 ±5

# Sistema de Referencia Global ITRS (Sistema de Referencia Internacional Terrestre)

- Sistema de Referencia fijo a la Tierra, con origen ubicado en el centro de masas terrestre con los ejes en direcciones fijas establecidas por convención.
- El eje X se ubica fijo en la dirección del Meridiano de Greenwich, el eje Z coincidente con el eje de rotación terrestre, el eje Y completa la terna y el plano XY está ubicado coincidente con el plano del ecuador. Todas estas direcciones están definidas para una época en particular que forma parte de la definición.
- Definido por el **IERS (Servicio Internacional de Rotación Terrestre)**.



# Marco de Referencia Global ITRF (Marco de Referencia Terrestre Internacional)

- Materialización del Sistema de Referencia Internacional Terrestre (ITRS).
- Lista de **coordenadas** y **velocidades** para una selección de estaciones permanentes
- El Servicio Internacional de Rotación Terrestre (IERS) calcula un ITRF periódicamente. La última publicación es el ITRF08, con datos de estaciones permanentes hasta el año 2008

# Marco de Referencia Global

## ITRF

- La posición de un punto situado sobre la superficie de la Tierra en una época “t” cuyas coordenadas “” son funciones del tiempo, se expresa como:

$$\bar{X}_{(t)} = \bar{X}_0 + \frac{d\bar{X}_0}{dt} \cdot (t - t_0) + \sum_i \Delta\bar{X}_{i(t)} \quad \bar{X}_{(t)} = (X_{(t)}; Y_{(t)}; Z_{(t)})$$

- Donde:

- $\Delta\bar{X}_{i(t)}$  son las correcciones debidas a diversos factores variables en el tiempo (desplazamientos ocasionados por mareas terrestres, incluidos los efectos permanentes, la carga oceánica, mareas polares, rebote postglacial, carga atmosférica, variaciones del geocentro, etc.)
- $\bar{X}_{(t)}$  y  $t_0$  las coordenadas y el tiempo de la época inicial



## Marcos de Referencia Globales

- La definición y densificación de los Marcos de Referencia actuales en los que se apoya el sistema **GPS** solo son posibles a través de las técnicas de medición espacial más precisas.
- Su precisión y realización es de fundamental importancia para estudiar fenómenos que suceden en la Tierra (rebote post-glacial, cambios de nivel medio del mar, estudios atmosféricos, etc).



# Marcos de Referencia Globales

- Las técnicas para la determinación de los Marcos de Referencia son:
  - VLBI
  - SLR
  - LLR
  - DORIS
  - GNSS

# VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

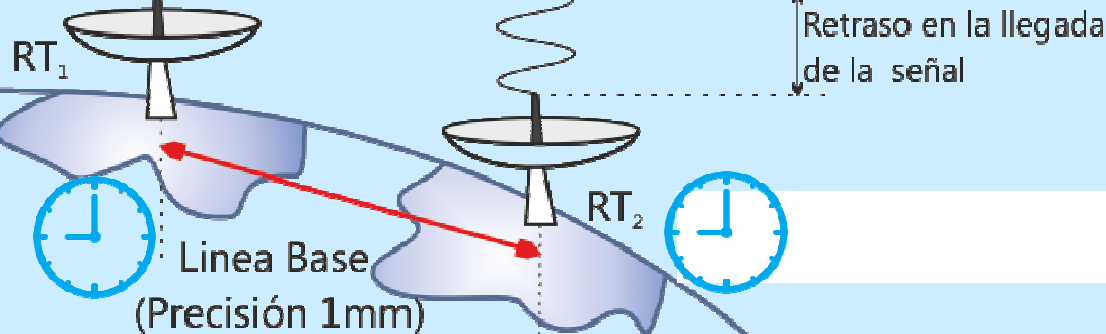
## Interferometría de base muy larga



Quásar

(>3 billones Años-Luz de distancia)

Registro simultáneo de la radiación electromagnética de los cuásares, digitalizada en un marco preciso de tiempo



Radiotelescopios (RT) equipados con un Reloj Atómico (máser de Hidrógeno) sincronizado con la red de estaciones VLBI

Realiza mediciones hacia quásares y por interferometría permite calcular la distancia entre centros de observación ubicados a muy larga distancia en forma muy precisa.

Esta técnica permite establecer el Marco Celeste de Referencia Internacional, como así también contribuye a la determinación de los parámetros de rotación terrestre.

# VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

## Interferometría de base muy larga



Antena VLBI – Observatorio TIGO, Concepción, Chile

# VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

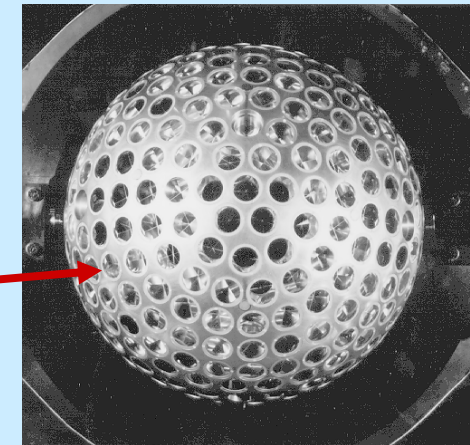
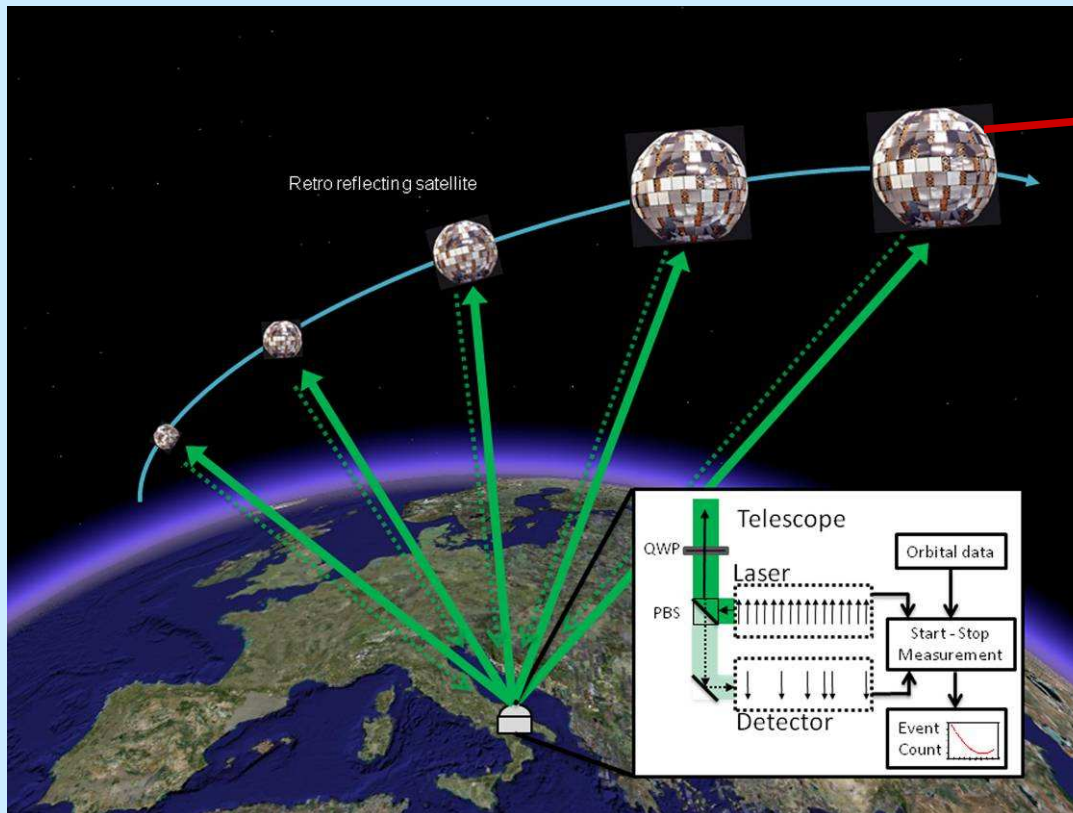


# SLR (Satellite Laser Ranging)

## Medición láser a satélites

Medición de distancias a satélites desde observatorios sobre la superficie de terrestre.

La medición se realiza con láser, teniendo en cuenta el tiempo que tarda la señal en llegar al satélite y regresar



**Satélite  
LAGEOS  
(LAsEr  
GEOdinamics  
Satellite)**



# SLR (Satellite Laser Ranging)

Medición láser a satélites



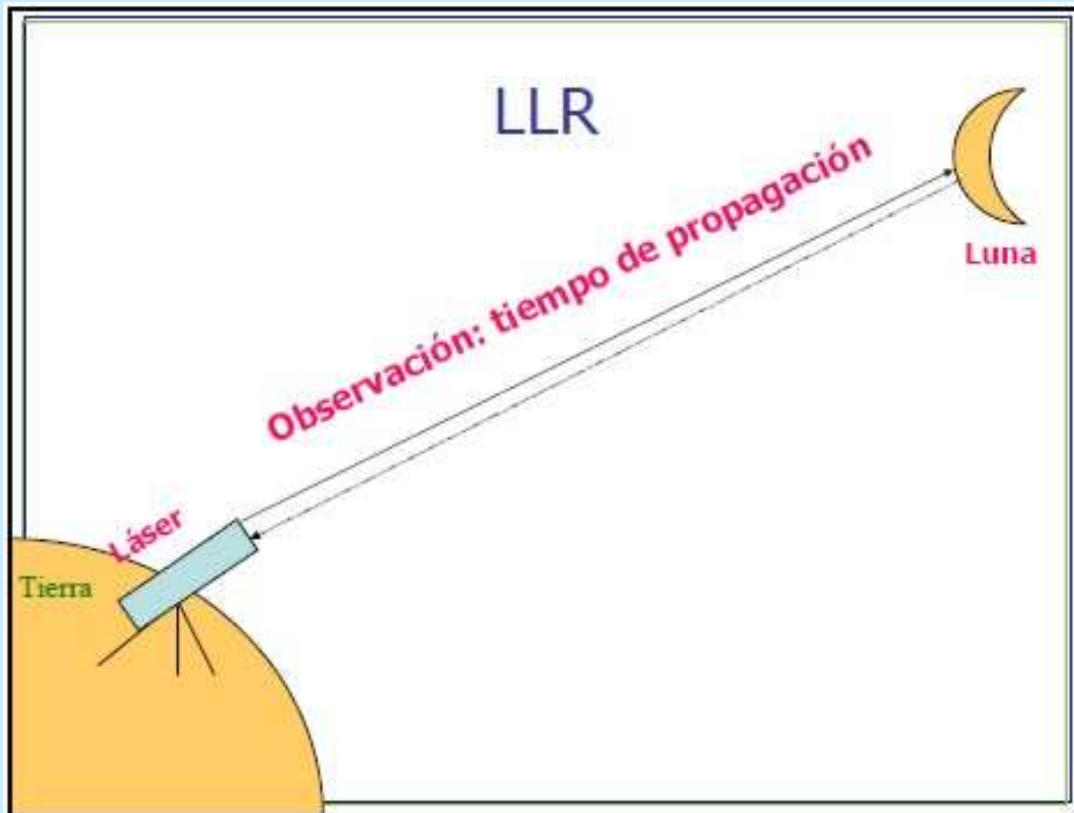
Sistema SLR – Observatorio TIGO, Concepción, Chile

# LLR (Lunar Laser Ranging)

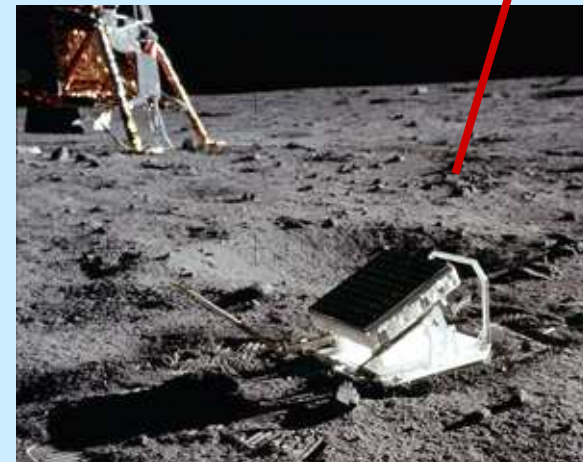
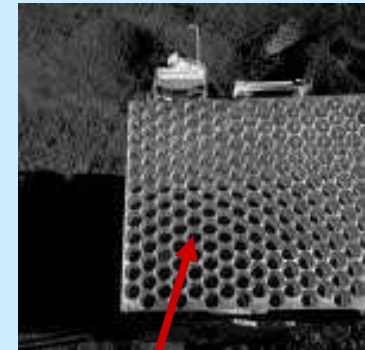
## Medición láser a la luna

Medición de distancias a la Luna desde observatorios sobre la superficie de terrestre hacia reflectores en la luna.

La medición se realiza con láser, teniendo en cuenta el tiempo que tarda la señal en llegar al satélite y regresar.

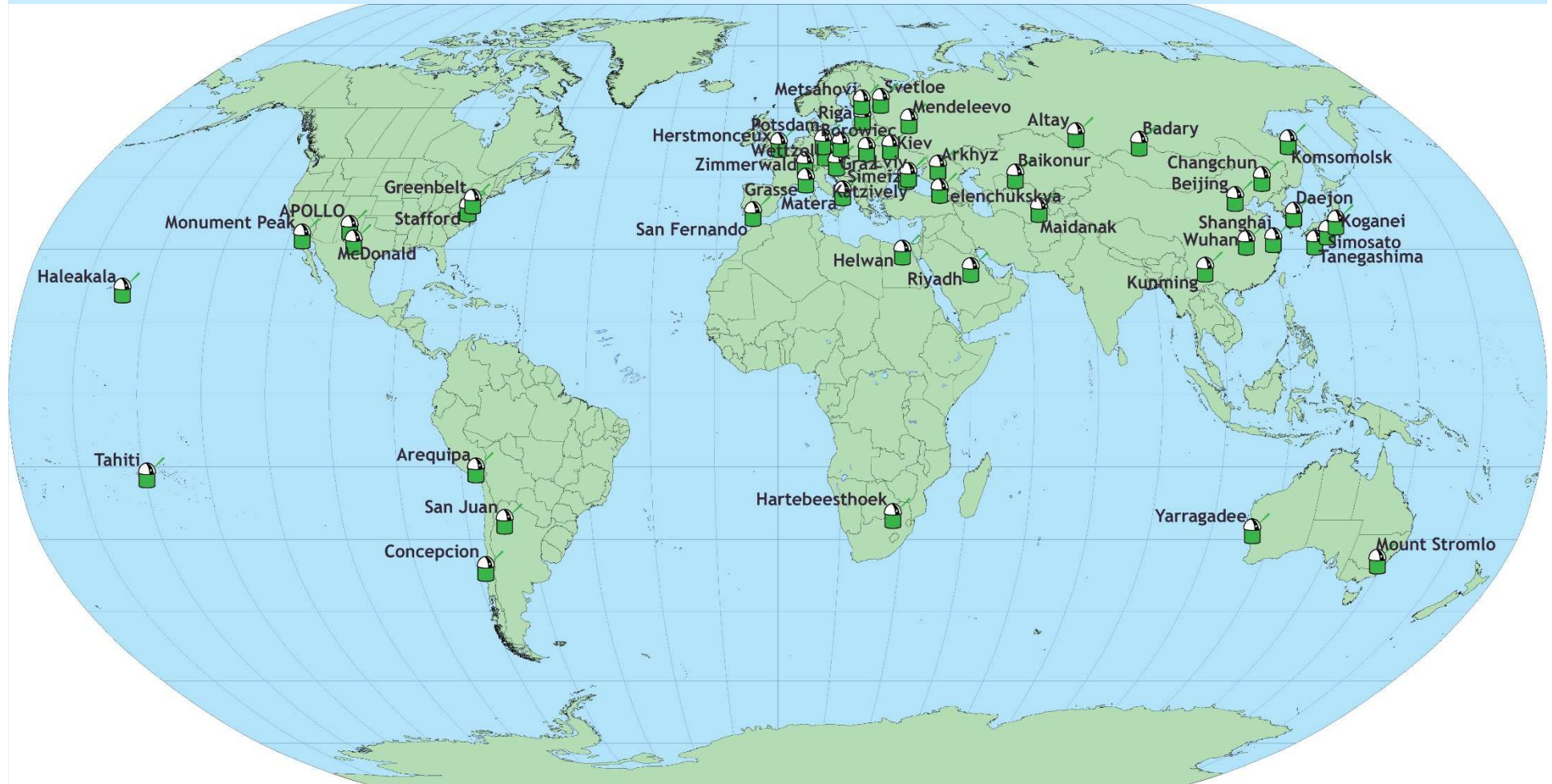


**Reflector  
colocado  
por la  
misión del  
Apolo XI**





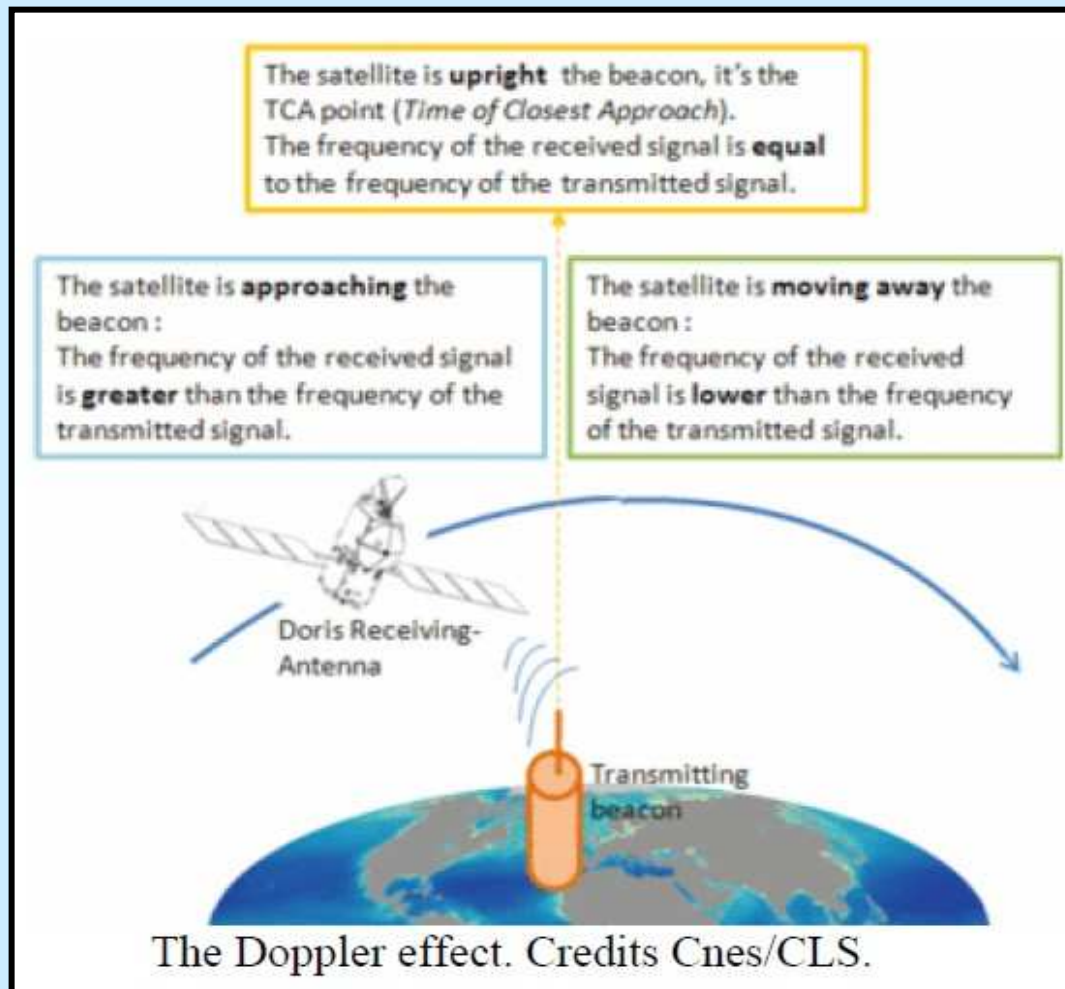
# Mapa de observatorios SLR/LLR



Estado actual de la red

# DORIS (Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite)

Orbitografía Doppler y Posicionamiento Radial Integrado por Satélite



Permite calcular la órbita de los satélites con gran precisión utilizando el efecto Doppler.

Tanto el satélite como el receptor (beacon), emiten y reciben las señales.

Utilizan los satélites SPOT, JASON y ENVISAT.