



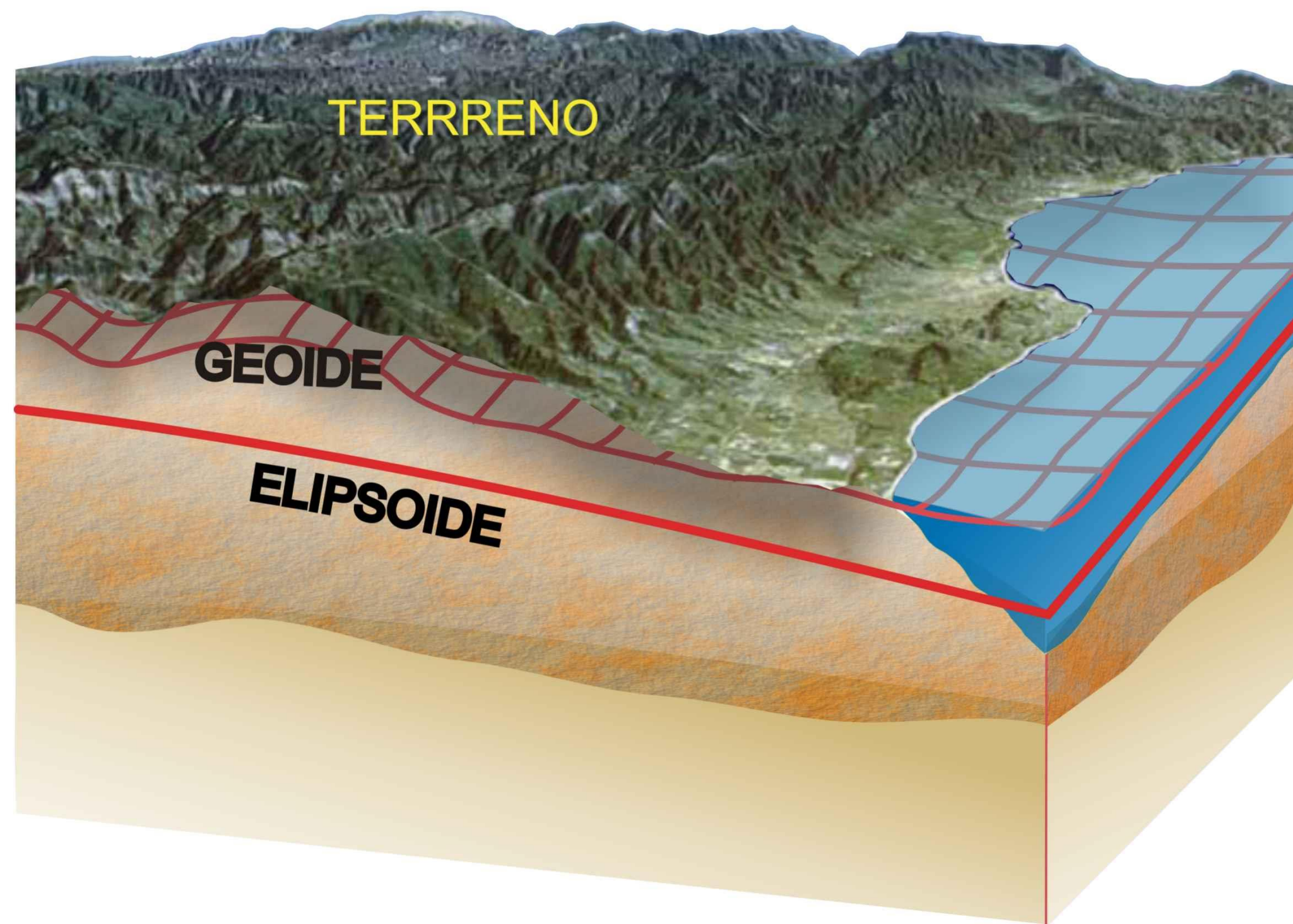
**Simposio
SIRGAS2020**

| Experiencias del geoide en México

Por David Avalos-Naranjo
Desde Aguascalientes, México, 30 de Octubre de 2020

Contenido

- 1** Conceptos generales
- 2** Ciclos de procesamiento geoidal
- 3** La técnica de cálculo
- 4** Situación actual y metas
- 5** Conclusiones

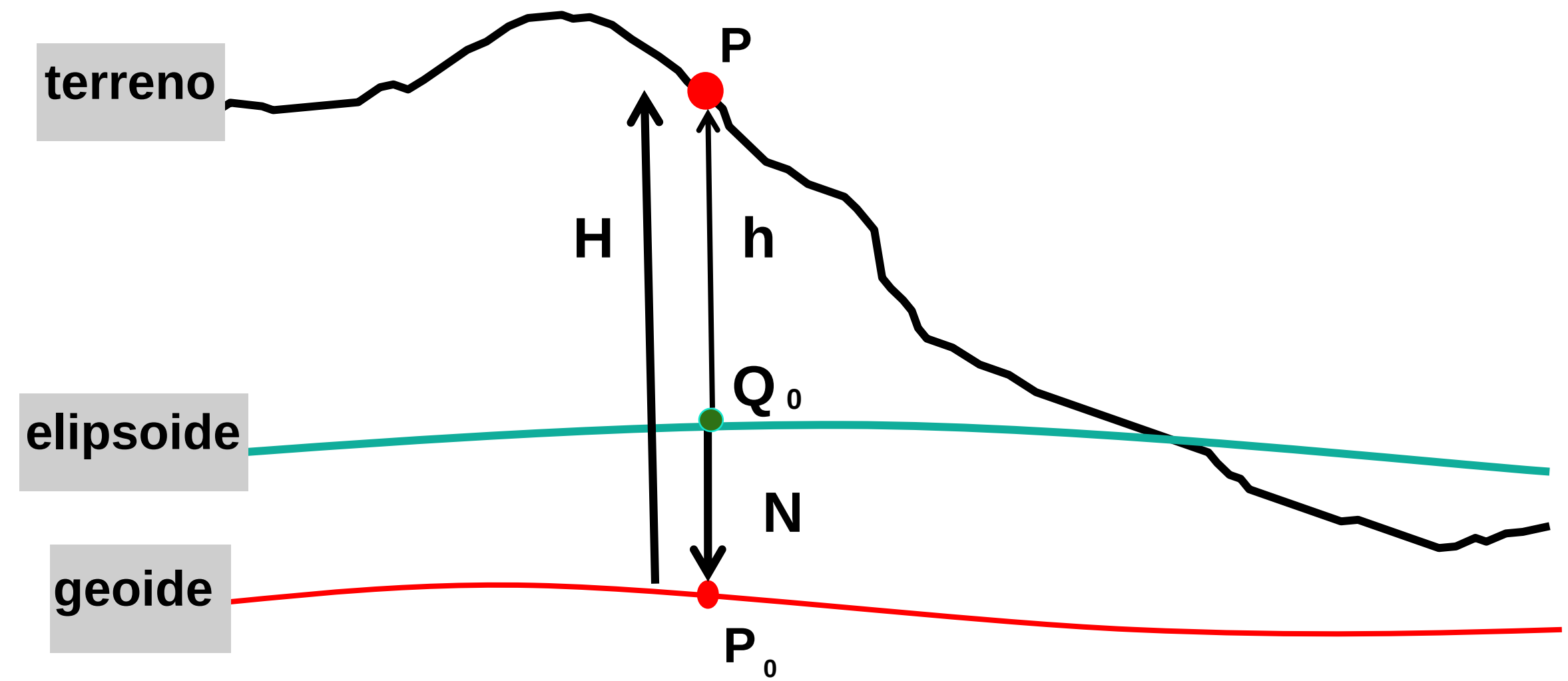


El geoide es la superficie equipotencial del campo de gravedad que mejor se ajusta al nivel medio del mar global en el sentido de mínimos cuadrados.

(F. Gauss, 1835)

El sistema de alturas oficial en México:

- Alturas ortométricas (**H**)
- Dátum: NAVD88
(procesamiento de nivelación 2015
de restricción mínima)



Formas de acceder al dátum oficial

Opción 1

Contacto físico con un banco de nivel del INEGI

precisión relativa: milímetros
precisión absoluta: centímetros

Opción 2

Posicionamiento GNSS + Geoide

precisión relativa: centímetros
precisión absoluta: decímetros

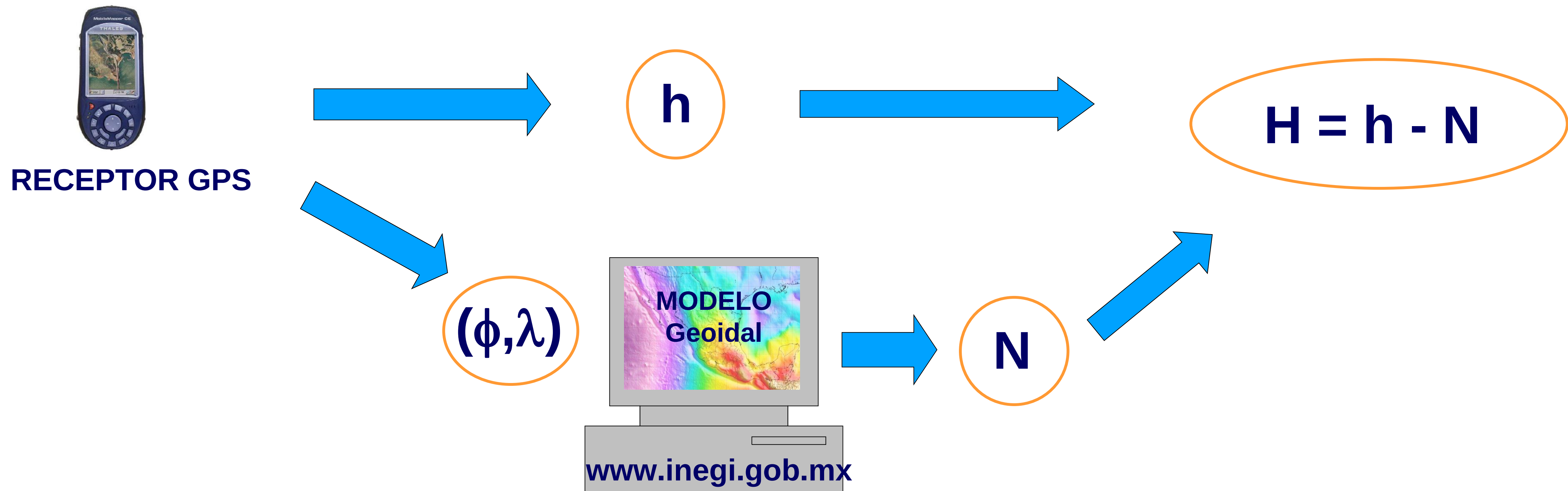
Opción 2

El Geoide Gravimétrico Mexicano (GGM) es el modelo nacional de alturas geoidales.

Funge como la herramienta que **habilita** a los sistemas GNSS para determinar la altura ortométrica de puntos de observación. Indicado en la norma técnica del Sistema Geodésico Nacional.



La altura geoidal (**N**) en conjunción con la altura geodésica (**h**) determinada por equipos GNSS es utilizada para determinar la altura ortométrica (**H**) de puntos sobre el terreno.



www.inegi.org.mx

- Usuario experto: descarga el modelo geoidal completo y lo instala en su software GNSS
- Usuario casual: en línea transforma la altura para una coordenada



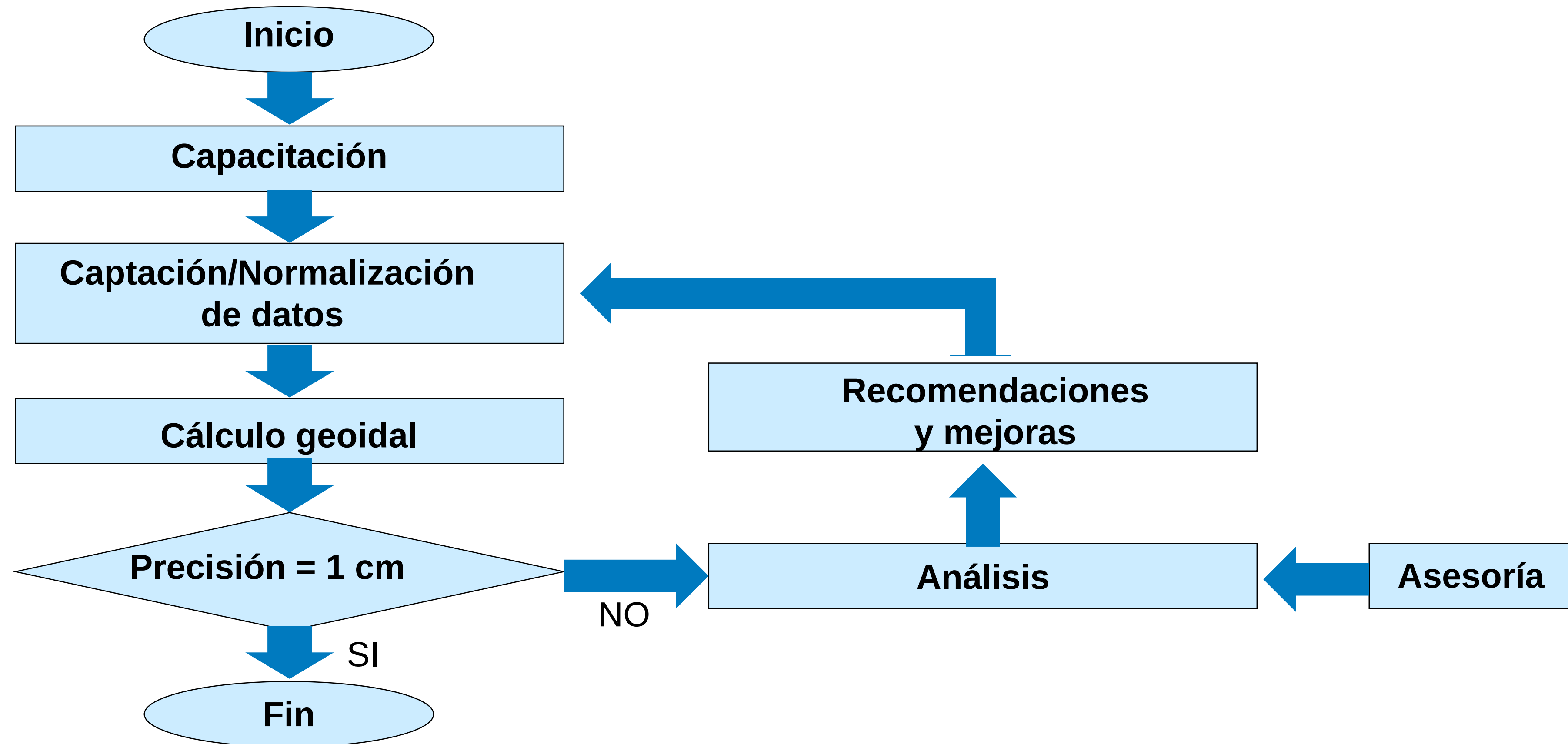
Antecedente

Los modelos implementados en México fueron de producción extranjera desde la década de los 80's

Modelo	Instituto	Precisión
OSU91	Universidad de Ohio	7 a 10 m
EGM96	National Geospatial Agency	4 m
MEX97	National Geodetic Survey	3 m

Ciclos de procesamiento

- Año 2000: El proceceso de modelado geoidal fue planteado con un esquema cíclico.



Ciclos y la cercanía con el datum oficial (rms)

- De 2000 a 2004: Capacitación / Preparación de insumos
- 2004: modelo GGM04, precisión **60 cm**.
- 2005: modelo GGM05, precisión **35 cm**
- 2006: modelo GGM06, precisión **30 cm** homogéneo.
- 2010: modelo GGM10, precisión **20 cm**
- **2021 ?** : precisión mejor a 10 cm

Ciclos y la cercanía con el dátum oficial (rms)

Principales causas de la mejora en cada ciclo:

Año	Precisión lograda	Cambios relevantes	
2004	de 300 a 60 cm	• Cambio en técnica de cálculo, • mejor MDE, • aumento en gravedad terrestre	Calidad de insumos
2005	de 60 a 35 cm	• Depuración de datos gravimétricos	
2006	de 35 a 30 cm	• Eliminación de gravimetría no-IGSN71	
2010	de 30 a 20 cm	• Mejor MDE • aumento en gravedad terrestre, • nuevo modelo geopotencial, • software mejorado	Técnica aplicada con mayor limpieza
2021 ?	de 20 a 10 cm	• Depuración automatizada de datos gravimétricos, • aumento en gravedad terrestre, • software mejorado	

| La técnica de cálculo geoidal

Sobre la técnica Stokes - Helmert

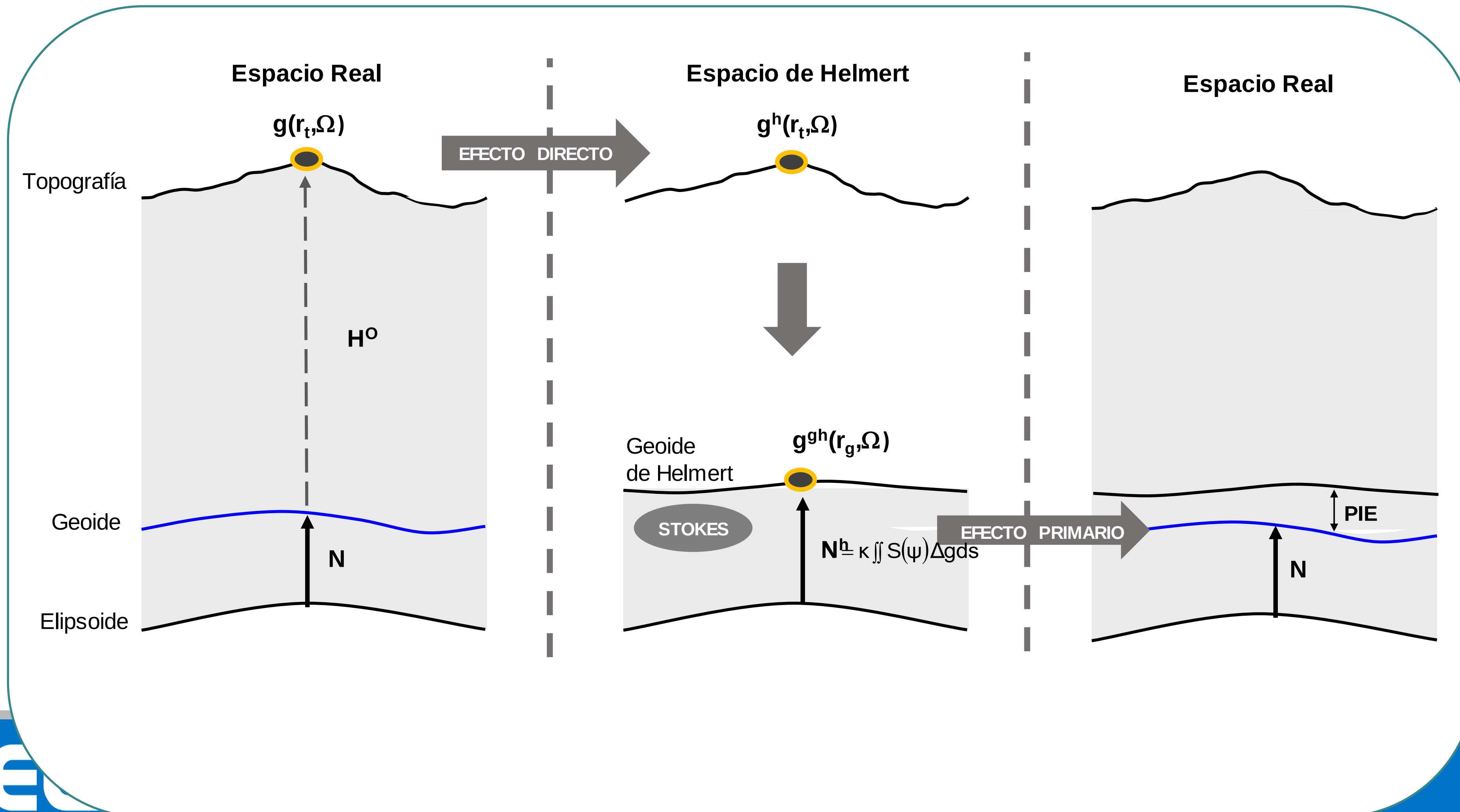
La fórmula de cálculo de N propuesta por **Stokes**

$$N = \kappa \iint S(\psi) \Delta g ds$$

Donde Δg es el campo de gravedad estimado al nivel del geoide.

Esta fórmula se aplica bajo una condición favorable que minimiza el efecto de los errores existentes en los datos o modelos de gravedad: el espacio de **Helmert**.

Esquema general del procesamiento



Sobre la técnica Stokes - Helmert

Las 3 etapas de procesamiento

1

Modelado del campo
de gravedad

2

Modelado de valores
de frontera

3

Cálculo de altura
geoidal

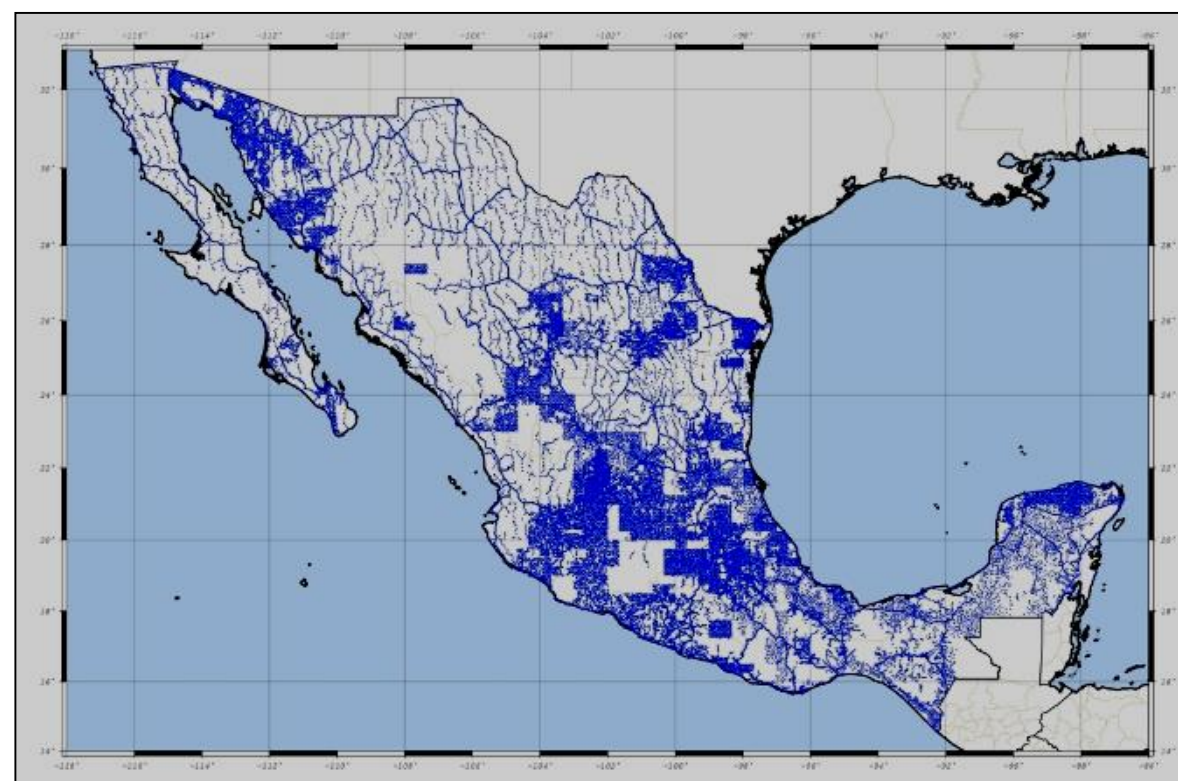
Pasos generales del procesamiento

1

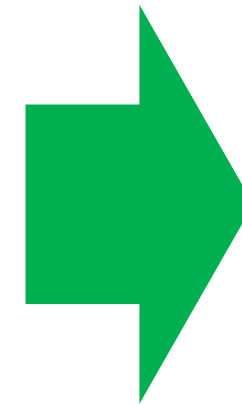
Modelar el campo de gravedad sobre el terreno

Pasar de datos puntuales a un mapa con error controlado

$$\overline{\Delta g}_{ij}^{FA} = \overline{\Delta g}_{ij}^{BC} + 2\pi G\rho H \times 10^4 - TC$$



DATOS GRAVIMÉTRICOS
TERRESTRES Y MARINOS

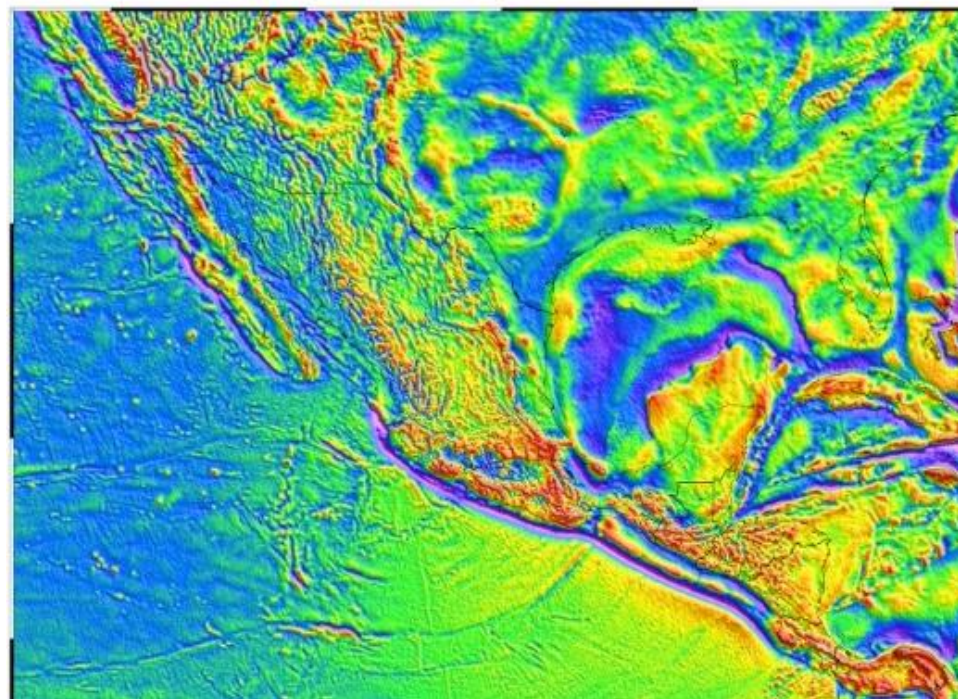


Anomalía de gravedad de aire libre
sobre el terreno

Pasos generales del procesamiento

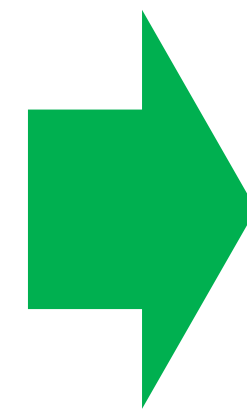
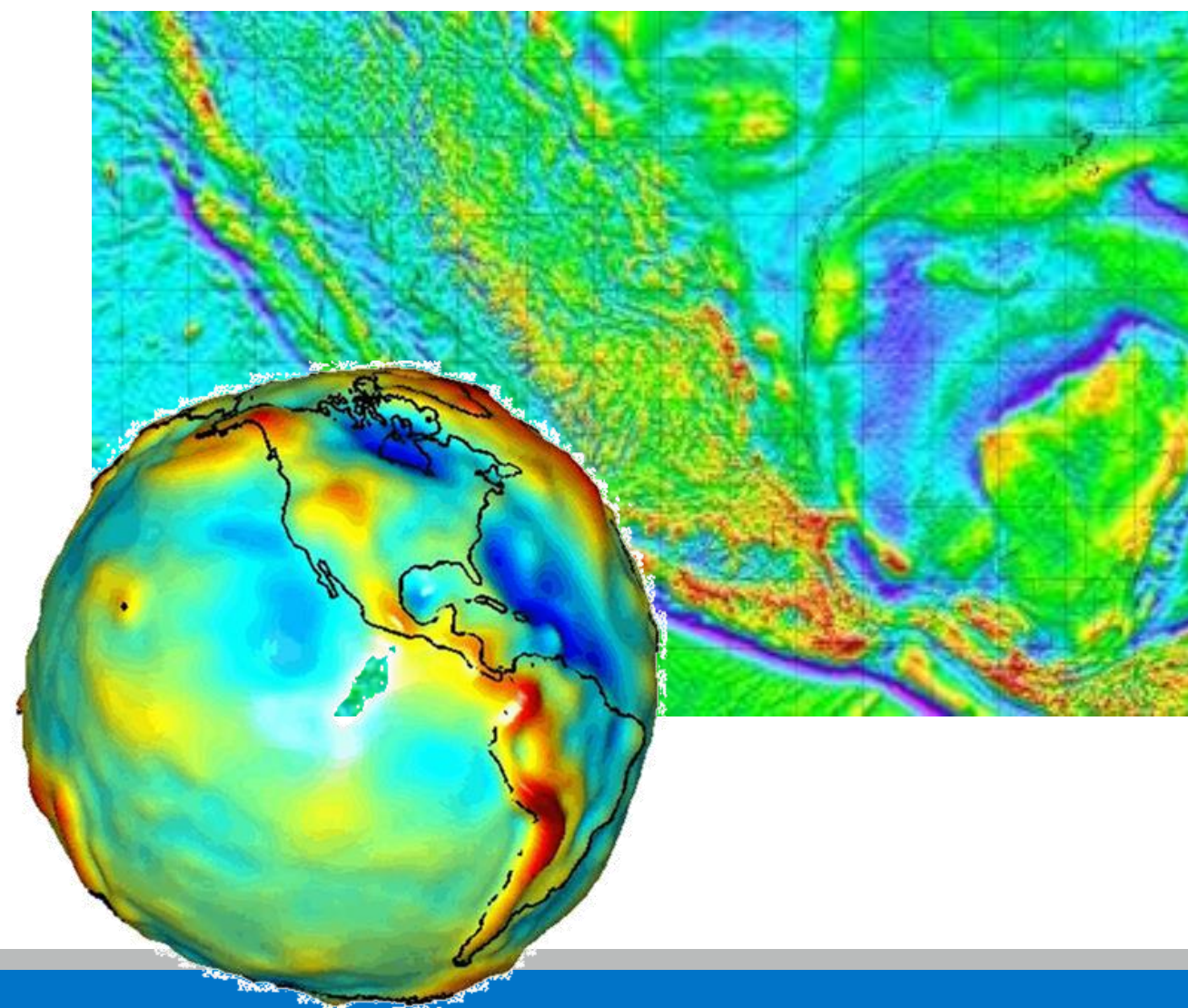
2

- **Helmertizar el campo de gravedad** $\overline{\Delta g}_{ij}^{Ht} = \overline{\Delta g}_{ij}^{FA} + DTE + DTE\rho + DAE + SITE + x$
- **Transferir valores de anomalía hacia el nivel del geoide:** $\overline{\Delta g}_{ij}^{Ht} = \frac{R}{4\pi r} \int_{\Omega'} \overline{\Delta g}_{ij}^{Hg} K(r, \psi, R) d\Omega'$

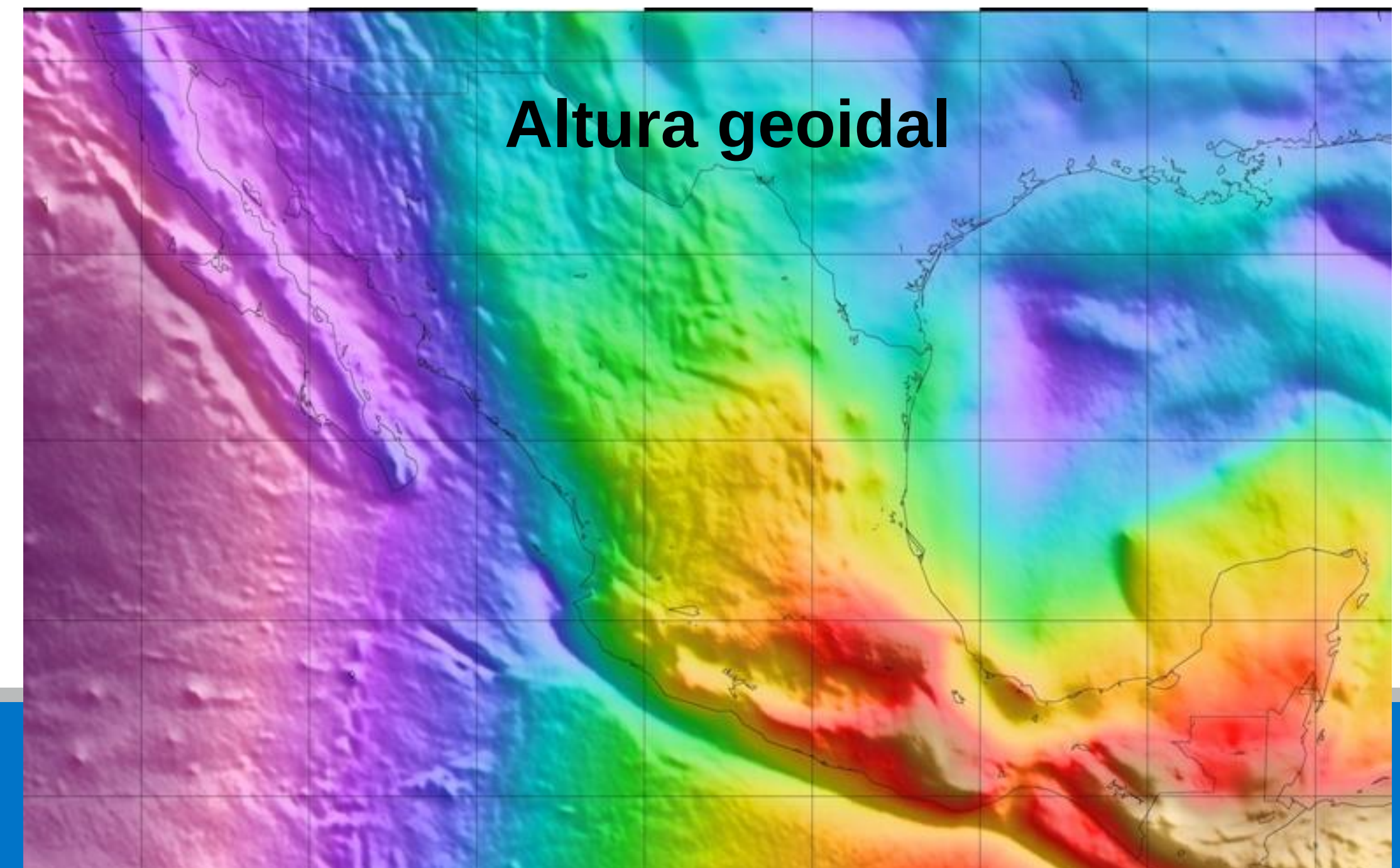


Pasos generales del procesamiento

- 3 Aplicar la integral de Stokes en el espacio de Helmert, combinando información satelital y terrestre (usando un kernel modificado al estilo Molodenskij).



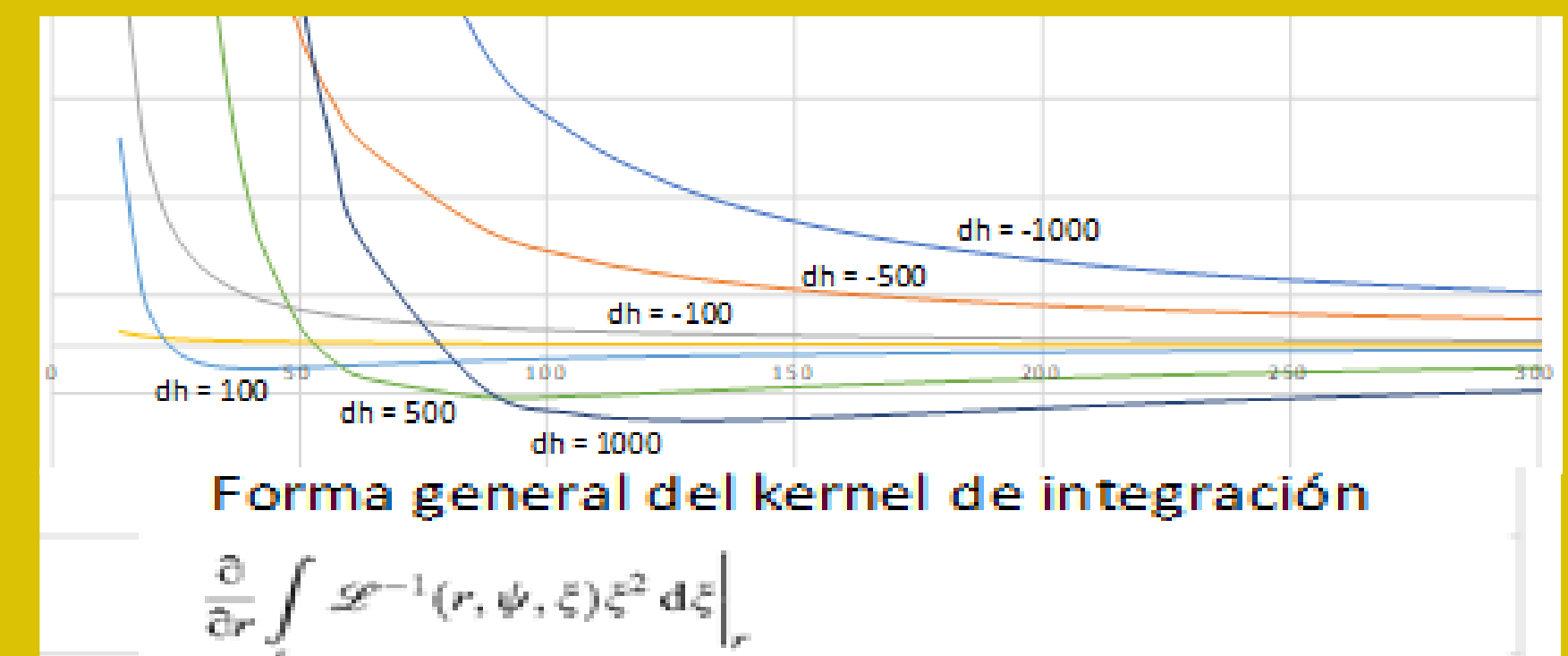
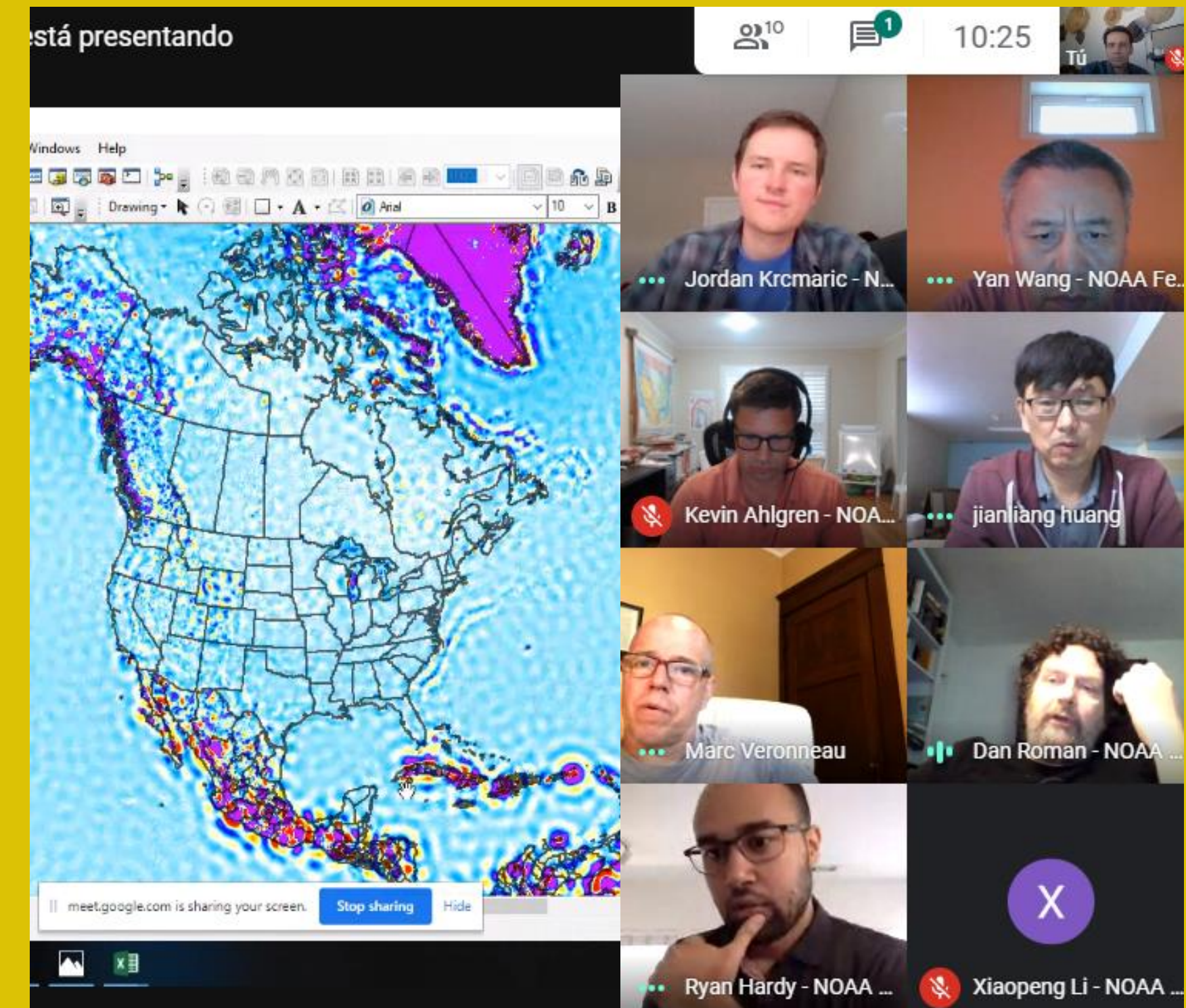
$$N = N_{satelital}^H + N_{terrestre}^H + PIE$$



Situación actual

- Colaboración desde 2007 con la Asociación Internacional de Geodesia:
 - Geoide regional de Norte y Centroamérica
 - Sistema internacional de referencia de alturas (IHRs)
- Avances:
 - Estudios de evaluación a nuevos insumos y variantes de procesamiento.
 - Geoides experimentales para comparativo internacional.

Reunión mensual de los lunes con EUA y Canadá



Sobre resultados recientes:

- El comparativo en la zona de prueba de Colorado arrojó un valor $\sigma = 7.5$ cm con respecto a soluciones geoidales independientes.

Puntos de mejora detectados y por aplicar en 2020- 2021

- Variar el grado/orden del modelo satelital,
- Técnica RTM de modelado gravimétrico,
- Analizar la técnica de transición satelital - terrestre.

Situación actual

Logros

- La normativa oficial incluye el uso del modelo nacional de alturas geoidales
- Se incrementó el ritmo de levantamientos gravimétricos terrestres
- Se mantiene la capacidad instalada

Retos que obstaculizan la mejora y un mayor aprovechamiento:

- Incorporar la técnica RTM al modelado de gravedad.

Perspectiva a futuro

Metas

- Modelar altura geoidal con error < 10 cm en áreas montañosas.
- IHR5: Adaptar software para probar las técnicas de combinación de datos satelitales y terrestres: $W_P = U_P + T_P$ $W_P = U_P + \gamma N_P + (W_0 - U_0)$
- Propagar las referencias de gravimetría absoluta a la red de estaciones base, habilitar el IAGBN o IGRF en México.
- Implementar un sistema de consulta amigable y robusto para transformar dátum.

En síntesis

- El proceso de solución geoidal en México es de ciclos en mejora permanente, con aspiraciones de mantener la independencia técnica.

De la experiencia en estos años:

- Los mayores avances se han logrado al enfocar esfuerzos en mejorar la calidad del modelo gravimétrico, incorporar solo fuentes recomendadas, colaborar con países vecinos y mantener contacto con investigadores.
- El ejercicio de cálculo geoidal favorece el abordaje de otros temas relevantes como el desarrollo de estaciones IHRF.

Conociendo México

01 800 111 46 34

www.inegi.org.mx

atencion.usuarios@inegi.org.mx



INEGI Informa

Saludos desde Aguascalientes



David
Avalos

Raúl
Muñoz

Leticia
García

Manuel
Sosa

Marco
Mendoza