

Preguntas realizadas en el evento:

Avances en el **geoide gravimétrico**

1. **¿Cómo convive la navegación cuántica con la gravimétrica?**

Actualmente, la navegación GNSS es utilizada en aplicaciones comunes, como lo es la generación de información geográfica. Por lo que se conoce, la navegación cuántica es una tecnología en desarrollo, que debe ser complementaria o sustituto de la navegación GNSS bajo escenarios donde la señal GNSS es obstruida.

2. **Para incrementar la precisión ¿es necesario ampliar la cobertura de puntos en el territorio nacional?**

El modelo geoidal depende, en gran medida, de la calidad y cantidad de puntos donde se ha medido la aceleración de gravedad. Se estima que la técnica de cálculo está lo suficientemente depurada para alcanzar una precisión mayor, pero sin los datos suficientes para modelar a más detalle los altibajos del campo de gravedad entonces no hay mucho que ganar en precisión, aunque se sigan aplicando depuraciones de procesamiento.

3. **¿Es el INEGI la única institución en México que emite información sobre el geoide gravimétrico? De ser así, ¿cómo se difunde esta información con los usuarios que la necesitan? ¿Cuáles son estos usuarios?**

En universidades como la de Sinaloa y la UNAM, se han llegado a generar modelos geoidales de cobertura local y con alta resolución. El INEGI es la única institución que genera modelos de cobertura nacional.

Dado que los usuarios principales del modelo geoidal son ingenieros topógrafos, geomáticos y geodestas, la difusión se realiza mediante las publicaciones institucionales y participando en eventos de actualización de conocimientos como los congresos de asociaciones científicas y profesionales.

4. **¿Cómo afecta la subsidencia que presenta la Ciudad de México?**

La subsidencia afecta al valor de altura sobre el nivel del mar, que formalmente llamamos altura ortométrica (medida desde el geoide). Conforme pasa el tiempo, la altura de estas zonas disminuye gradualmente unos centímetros o decímetros al año. No obstante, los cambios en el modelo geoidal son nulos, puesto que el campo de gravedad se modifica muy poco ante la subsidencia común.

5. **¿En qué aspectos difieren nuestros vértices de nivelación, del de la nivelación de EE. UU.? Y estos aspectos ¿podemos emularlos en nuestra red de vértices nacional?**

Nuestra red de vértices nacional está diseñada para cumplir un estándar normativo específico. En los EE. UU. el servicio geodésico cuenta con una colección de vértices que han sido instalados por diversos productores para diversos fines. Dentro de ese cúmulo de datos geodésicos, el servicio geodésico realizó una selección de lo óptimo, que supera en calidad a los vértices comunes en México, porque cuentan con una metodología que implica mayor inversión de recursos.

Preguntas realizadas en el evento:

Adicionalmente, en la presentación se hace mención de dos líneas de calibración geodésicas, gsvs11 y gsvs17, las cuales fueron creadas especialmente para evaluar modelos geoidales de precisión milimétrica. La metodología aplicada en estas líneas es novedosa y supera en calidad y costo a cualquier levantamiento común. Es posible que en México se llegue a desarrollar algo similar en el futuro usando los recursos disponibles.

6. ¿El movimiento de las placas tectónicas que componen a la Tierra, afecta o influye en el cálculo de estos modelos geoidales y de la determinación de los sistemas de coordenadas de referencia?

Para México, estos movimientos carecen de un efecto significativo en el modelo geoidal. Esto se debe a que, principalmente, el movimiento tectónico se expresa en desplazamientos horizontales que poco afectan al campo de gravedad en el tiempo. En algunas ocasiones llegan a desplazar el terreno en sentido vertical, pero el impacto es de pocos centímetros.

En coordenadas horizontales el efecto sí es permanente y significativo; no obstante, el sistema geodésico oficial de México está adaptado a esta situación con la generación de modelos detallados del movimiento del terreno.

7. Considerando los avances vistos, ¿la gravimetría qué tendría que cambiar (estrategias, métodos, normas etc.) para lograr llegar a la precisión de 1 cm en el Geoide? y/o ¿esa meta depende de otros insumos que no proporciona la gravimetría? Hasta ahora, seguimos midiendo y acumulando información, ¿existe alguna área de mejora en nuestros procesos de campo y gabinete?

La precisión del modelo geoidal cambia en forma significativa al contar con mayor densidad y calidad de los datos gravimétricos. Hasta ahora es indeterminada la cantidad necesaria de levantamientos adicionales que se requieren para disminuir la incertidumbre del geoide hasta 1 cm; sin embargo, se cuenta con algunas recomendaciones internacionales que apuntan hacia el cambio del método que se usa para asignar coordenadas a cada punto donde se mide la gravedad. La tendencia es a utilizar posicionamiento GNSS con precisión de 10 cm, al tiempo que están surgiendo nuevas herramientas para lograrlo sin que los costos del levantamiento suban demasiado.

Deberemos dar seguimiento a estos avances y generar las pruebas operativas necesarias para plantear nuevas metas y documentar una mejoría en los procesos de campo y gabinete.

8. ¿Qué Unidades del Estado se podrían beneficiar de conocer el modelo gravimétrico 2025?

Todas aquellas Unidades que utilizan tecnología de posicionamiento GNSS en sus procesos de producción de objetos geográficos.

9. ¿Existe un único modelo geoidal mundial estandarizado? y si es así ¿quién lo realiza?

Existen grupos de investigación académicos y gubernamentales que han producido modelos geoidales de cobertura mundial. Ninguno de ellos ha sido considerado como un estándar recomendado, pero los modelos producidos por la agencia espacial de EE. UU. y la agencia espacial europea son los más citados.

Comparados con los modelos geoidales del INEGI, los modelos existentes de cobertura mundial cuentan con menor resolución y precisión.

Preguntas realizadas en el evento:

10. ¿Qué precisión tendrán las alturas ortométricas obtenidas a partir de este modelo geoidal?

La precisión de alturas ortométricas dependerá de la técnica de posicionamiento GNSS que se implementa en cada caso. Para ejemplo, en los vértices geodésicos del INEGI, donde se aplica procesamiento riguroso y un tiempo de observación de 3 horas, se espera que la precisión vertical ronde los 10 o 15 cm. Si se requiere una precisión mayor en algún proyecto, tendría que aplicarse un procedimiento diferente, que es factible, pero puede implicar un mayor costo.

11. En el campo de las ciencias de la Tierra, el uso de modelos gravimétricos aporta para el mejor entendimiento de la composición y estructura de la Tierra, sin embargo, es muy común que las personas descarguen diferentes modelos y los usen indiscriminadamente para realizar interpretaciones y que, por obvias razones, son erróneas. Un ejemplo común es el uso de anomalía de aire libre como si fuera anomalía de Bouguer completa. Aprovechando el espacio y expertise, ¿Podrías comentar un poco sobre estas diferencias entre modelos gravimétricos?

Efectivamente, las anomalías de gravedad pueden modelarse bajo diferentes conceptos o suposiciones sobre la composición de la masa terrestre. Cada concepto implica diferencias importantes en el valor de anomalía. Por ejemplo, la anomalía de aire libre es un cálculo donde se compara la gravedad real contra un modelo de gravedad elipsoidal, sin incorporar efectos de la masa topográfica sobre el elipsoide. La anomalía de Bouguer completa resulta de comparar la gravedad real con un modelo de gravedad elipsoidal al que se agrega el efecto de una masa topográfica circundante con densidad constante. La diferencia entre estas dos es, comúnmente, de varias decenas de mGal o hasta algunos cientos de mGal. Aprovecho para indicar que ahora se le llama anomalía de Bouguer refinada a lo que antes llamábamos Bouguer completa, y adicionalmente, ahora generamos un cálculo riguroso de anomalía de Bouguer completa esférica, que incluye los efectos de la topografía mundial entera, más el efecto indirecto secundario. Esto se aclara en la descripción técnica del GGM25 que está próxima a publicar ese.

12. Comentó que nuestro modelo geoidal compite con los mejores. ¿Cuáles serían los mejores modelos a nivel mundial y qué nivel de error tienen en comparación con el nuestro?

La zona de prueba de Colorado es un área donde los mejores grupos de investigación han efectuado cálculos de altura geoidal, y todos han sido evaluados con respecto a una línea de calibración geodésica llamada GSVs17. En esta zona, el modelo geoidal del INEGI cuenta con precisión de 3.3 cm, que es una precisión común para la mayoría de los geoides generados, y solamente un par de ellos han logrado reducir hasta 2 cm este parámetro. Por esta razón decimos que el modelo GGM25 compite en calidad con los mejores desarrollos.

13. ¿Cómo se está utilizando inteligencia artificial o Machine Learning en la mejora de modelos gravimétricos? y ¿qué retos técnicos existen para el levantamiento gravimétrico en regiones montañosas o con acceso limitado?

Hasta el momento, en el INEGI no se ha incursionado en el potencial uso de inteligencia artificial para modelar el campo gravimétrico. Se sabe que la Asociación Internacional de Geodesia promueve la investigación en este sentido al más alto nivel para los diversos campos de estudio dentro de geodesia. Esperamos que estos grupos de

Preguntas realizadas en el evento:

trabajo logren, eventualmente, brindar recomendaciones específicas sobre la manera correcta de explotar la inteligencia artificial, ya sea para lograr buenos resultados ahorrando recursos o aumentando la calidad de resultados usando los mismos recursos.

Con relación a los retos que implica efectuar levantamientos en las zonas montañosas, se sabe que la escasez de rutas de acceso provoca lentitud, más aumento de riesgo en los traslados, y que la cobertura de los puntos levantados se ve reducida. Para contrarrestar esta desventaja podemos aprovechar el talento de los brigadistas, que han desarrollado una pericia y compromiso tales que nos permiten confiar que sus decisiones en campo son óptimas.

14. ¿Con este GGM25 podríamos ahorrarle al Instituto actividades en campo, como son las actividades de levantamiento que hacemos con las brigadas de nivelación?

Como parte de la visión a futuro, el modelo geoidal puede llegar a fungir como marco de referencia vertical en sustitución del actual NAVD88, que está basado en nivelación. Esa es la tendencia de cambio internacional que habilitará a la técnica de posicionamiento GNSS para atender aplicaciones de alta precisión vertical que, hasta hoy, solo son satisfechas con líneas de nivelación.

En el pasado el INEGI usó nivelación para evitar que las cartas topográficas llegaran a presentar distorsiones importantes en la representación de alturas del terreno. Hoy en día, esa función ya está siendo atendida con el geoide y levantamientos GNSS. La nivelación es actualmente la fuente básica de acceso al marco de referencia geodésico, pero esa función, en el futuro, podrá ser asistida por levantamientos GNSS para reducir el costo y la dependencia de la nivelación.

Existen otras aplicaciones que seguirán requiriendo la nivelación, pero que hasta hoy ha sido difícil de cubrirlas con los recursos actuales. De modo que, cuando el geoide llegue a generar ahorros en nivelación, se podrá evaluar si estos recursos pueden aprovecharse para atender esas otras aplicaciones, como lo es el monitoreo de deformaciones del terreno derivadas de la actividad tectónica en la región Sur de México.

15. ¿Hay una fecha tentativa para la publicación oficial del GGM25? ¿La nivelación geodésica (empleando nivel) se cambiará a nivelación geodésica por GNSS, en el futuro próximo?

Esperamos que en diciembre de este mismo año quede publicado el nuevo modelo GGM25.

Las técnicas de nivelación GNSS ofrecerán resultados directamente ligados al marco de referencia vertical oficial (sin necesidad de correcciones o transformaciones) cuando el modelo geoidal llegue a convertirse en la superficie de referencia oficial. Hoy en día, estas técnicas pueden utilizarse con la salvedad de que su liga al marco NAVD88 tiene una precisión limitada.

16. ¿De qué manera se utilizan las alturas geoidales en la cobertura marina?

Por el sentido físico que tiene el modelo geoidal, este puede usarse en el mar para determinar la diferencia entre el nivel medio del mar observable y la superficie equipotencial del geoide. En oceanografía, esta información permite observar los efectos de diversos fenómenos físicos, como es la corriente oceánica o la intensidad de "El Niño". También puede llegar a ser usado para referir la profundidad de estructuras bajo el nivel medio del mar.

Preguntas realizadas en el evento:

17. ¿Qué precisión existe en regiones con topografía abrupta y qué variación existe entre estas y zonas más llanas?

El cálculo de alturas geoidales es más retador en regiones de topografía elevada o abrupta, puesto que el modelado del campo de gravedad tiene que ser extendido hacia mayor distancia en dirección descendente. Esto aumenta las posibilidades de incrementar el error total. Por regla empírica, hemos visto que el error del geoide en zonas montañosas es el doble que el de zonas llanas, cuando ambas zonas están abastecidas con un cubrimiento gravimétrico similar. En términos generales, se ha logrado una precisión de pocos centímetros en zonas llanas y de varios centímetros en zonas montañosas, haciendo que solo en lugares remotos el error pueda superar los 15 centímetros.

18. ¿Cuál es el beneficio real para la población mexicana, o bien, quiénes se benefician de la medición y cálculo del modelo gravimétrico mexicano?

El modelo geoidal está dirigido a los productores de información geográfica, que pueden ser instituciones, empresas y academia. La ciudadanía en general es invitada a explotar esta herramienta en aplicaciones más cotidianas, con la posibilidad de acceder a precisiones centimétricas; aunque entendemos que los modelos geoidales preexistentes muy probablemente satisfacen sus requerimientos.

19. En USA cambiarán del NAVD88 al North American-Pacific Geopotential Datum of 2022 (NAPGD2022), ¿para México podría ser posible este tipo de cambio en los próximos 10 años o menos?

En el INEGI se analiza la posibilidad de avanzar hacia un cambio normativo en ese mismo sentido. En EE. UU. los problemas con NAVD88 son más apremiantes que los que actualmente tenemos en México con ese mismo datum. Por lo pronto, el modelo GGM25 ya es compatible con el NAPGD2022 y cuenta con las mismas ventajas. Esperamos que los usuarios expertos, y el mismo INEGI, generen pruebas de efectividad, eficiencia y calidad del GGM25 para validar un cambio de ese tipo.

20. Respecto a Red Geodésica Nacional Activa de las estaciones de operación permanente que registran los datos del GNSS que se encuentran distribuidas en el territorio nacional por el INEGI, ¿la corrección con este modelo geoidal aplica de manera automatizado dentro de esta Red del INEGI?

No. Los sistemas de procesamiento GNSS esperan que la Red Geodésica Nacional Activa opere con coordenadas de altura geodésica (altura elipsoidal). Esto es indispensable para generar una solución ligada al ITRF. Por separado, estos sistemas de procesamiento pueden cargar al modelo geoidal como un complemento que les permitirá reportar su solución en coordenadas de latitud, longitud y altura ortométrica.

21. El catastro de la Ciudad de México tiene su propio sistema de coordenadas y quiere transformarlas al sistema del INEGI, ¿cuál es el mejor camino para lograrlo?, ¿ustedes nos pueden asesorar?

En el INEGI contamos con asesores de alto nivel de conocimiento en estos temas. Se sugiere generar un primer acercamiento dirigiéndose a la Dirección del Marco Geodésico.

Preguntas realizadas en el evento:

22. ¿Cada cuánto tiempo se realizan mediciones con gravímetro en la red geodésica nacional pasiva?

Las mediciones de gravimetría sobre puntos de la red pasiva se realizan una sola vez. Solo en ocasiones especiales estos vértices llegan a ser revisitados con el propósito de verificar un resultado previo o para comprobar la calibración de los aparatos de medición.

23. La presentación también pudo titularse "Todo aquello que quería saber sobre la Geodesia, y nunca me había atrevido a preguntar". Con base en tu razonamiento inicial —México y Japón— ¿en qué medida se ve afectada la calidad del posicionamiento horizontal de las representaciones cartográficas del INEGI, debido a la mejora de la calidad de las métricas geodésicas?

Actualmente se tiene confianza de que las referencias geodésicas son confiables al nivel de menos de 10 cm en posición horizontal. Dado que las nuevas representaciones cartográficas pueden estar basadas en imágenes cuyo tamaño de pixel es de medio metro, esperamos que la distorsión típica corresponda a una magnitud similar. Esta situación mejora cuando los proyectos apuntan a coberturas pequeñas, donde el tamaño de pixel disminuye hasta los mismos 10 cm. Aún en estos casos se puede incurrir en distorsiones de mucho mayor tamaño cuando el apoyo geodésico resulte insuficiente.

24. ¿Cómo influyen las placas tectónicas que componen a la Tierra en el modelado del geoide y de los sistemas de coordenadas de referencia?

Para México, estos movimientos carecen de un efecto significativo en el modelo geoidal. Esto se debe a que, principalmente, el movimiento tectónico se expresa en desplazamientos horizontales que poco afectan al campo de gravedad en el tiempo. En algunas ocasiones llegan a desplazar el terreno en sentido vertical, pero el impacto es de pocos centímetros.

En coordenadas horizontales el efecto sí es permanente y significativo; no obstante, el sistema geodésico oficial de México está adaptado a esta situación con la generación de modelos detallados del movimiento del terreno.

25. ¿Cuál será la periodicidad de actualización del modelo geoidal?

No se tiene una periodicidad determinada. Estamos convencidos de que los usuarios prefieren mantener continuidad de uso en un modelo geoidal, mientras que la actualización no represente un avance significativo. Dichos avances son difíciles de lograr al paso de pocos años.