

# Estaciones de **gravedad absoluta** en México



Instituto Nacional de Estadística y Geografía

## **Estaciones de gravedad absoluta en México**



**Obras complementarias publicadas por el INEGI sobre el tema:**

El Geoide Gravimétrico Mexicano, 2010; Aspectos Metodológicos de las Cartas y Modelos Gravimétricos, 2010.

**Catalogación en la fuente INEGI:**

521.142 Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México).  
Estaciones de gravedad absoluta en México / Instituto Nacional de Estadística y Geografía.-- México : INEGI, c2021.

viii, 27 p.

1. Gravedad - México.

**Conociendo México**

**800 111 4634**

**[www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)**

**[atencion.usuarios@inegi.org.mx](mailto:atencion.usuarios@inegi.org.mx)**

 **INEGI Informa**  **@INEGI\_INFORMA**

DR © 2021, **Instituto Nacional de Estadística y Geografía**

Edificio Sede

Avenida Héroe de Nacozari Sur 2301

Fraccionamiento Jardines del Parque, 20276 Aguascalientes,

Aguascalientes, Aguascalientes, entre la calle INEGI,

Avenida del Lago y Avenida Paseo de las Garzas.

## **Presentación**

---

El presente reporte es parte del programa de información *Marco de Referencia Geodésico* del **Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)**. La información presentada describe actividades que corresponden a las fases de detección de necesidades, diseño, captación, procesamiento y análisis en el marco del modelo de producción estadística y geográfica (MPEG).

Actualmente los datos proporcionados representan un desarrollo tecnológico que puede ser tomado como referencia para estudios científicos como insumo para la fase de evaluación del programa; sin embargo, se advierte que por el momento no representan un lineamiento o norma institucional.

# Índice

---

<b>Introducción</b>	VII
<b>1. Contexto y utilidad de la gravimetría absoluta</b>	1
1.1 Objetivos alcanzados	1
1.2 La Red Gravimétrica Básica Nacional	2
1.3 El estándar IGSN71 y su desactualización	3
<b>2. Fundamento científico</b>	5
2.1 Pertinencia y precisión de los levantamientos	5
2.2 Criterios para la selección de sitios	6
2.3 Gravimetría con el dispositivo A-10	7
<b>3. Las estaciones de gravedad absoluta establecidas en 2018</b>	9
3.1 Resultados definitivos	9
3.2 Procedimientos y parámetros del levantamiento en 2018	10
3.3 Procesamiento	11
<b>4. Gradiente vertical de gravedad</b>	13
4.1 Magnitudes del gradiente observado	13
4.2 Metodología aplicada para calcular el gradiente vertical	14
<b>5. Estimación previa de gravimetría absoluta en México</b>	17
5.1 Análisis de comparabilidad sobre los sitios reobservados en 2018	18
<b>6. Conclusión y notas finales</b>	19
<b>Anexo</b>	21
<b>Bibliografía</b>	27

## Introducción

---

En este documento se describe el resultado del levantamiento realizado con un dispositivo llamado gravímetro absoluto sobre 19 puntos de observación en México que recibieron el nombre de Estaciones Gravimétricas Absolutas. Las actividades de campo se llevaron a cabo en el marco de un convenio de colaboración entre el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI) y el National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) de los EE.UU.

Una estación gravimétrica es un punto de referencia fijo sobre el piso, generalmente marcado con una placa metálica que permite identificarlo fácilmente, así como asegurar su permanencia a lo largo del tiempo. Desde una estación gravimétrica se puede propagar el valor de fuerza o de atracción de gravedad de la Tierra con gran exactitud hacia otros puntos de interés.

A lo largo de este documento se hace referencia al término de aceleración de la gravedad con el símbolo  $g$ .

Toda estación gravimétrica cuenta con un registro de datos en los cuales se indica el valor preciso de  $g$ . Cuando el valor  $g$  proviene de un levantamiento especial, realizado con un dispositivo llamado gravímetro absoluto, entonces a ese sitio se le denomina Estación Gravimétrica Absoluta (EGA).



Las EGA ayudan a unificar los levantamientos gravimétricos locales en un sistema de medición congruente, lo cual permite mantener la homogeneidad de datos al momento de incorporarlos en mapas de la intensidad del campo de gravedad con cobertura nacional.

En los meses de octubre y noviembre de 2018 se llevó a cabo una serie de levantamientos que permitió establecer un total de 19 estaciones como la que se muestra ejemplificada en la figura. Para el INEGI, el uso principal de esta serie de estaciones es el de materializar los puntos de contacto del marco de referencia gravimétrico con los que se transitará hacia un estándar internacional moderno.

## 1. Contexto y utilidad de la gravimetría absoluta

---

Las nuevas EGA son puntos de acceso al estándar de referencia mundial moderno, llamado en algunos documentos como Red Internacional de Estaciones Base Absolutas (IAGBN por sus siglas en inglés) (e.g. IAG, 2019). Dicho estándar debe ser considerado como una referencia independiente del estándar normativo actual, que data de 1971. Cuantitativamente la diferencia en valores de gravedad expresados de un estándar a otro es menor de 1 mGal. Las estimaciones más recientes confirman que la diferencia es variable por regiones al interior de México, con magnitudes que van de 0.050 a 0.200 mGal para la mayoría de los casos. En diversas aplicaciones dicha diferencia es tolerable, no implica un cambio sensible; sin embargo, para propósitos de alta precisión como es el control geodésico, estas cifras ya rebasan algunas especificaciones técnicas.

### 1.1 Objetivos alcanzados

La obtención de 19 vértices de gravimetría absoluta distribuidos en México aporta lo siguiente:

- Captación completa de los datos necesarios para avanzar hacia la redefinición de la red gravimétrica básica nacional.
- Se regularizó la exactitud a un nivel apropiado en los puntos de referencia del control gravimétrico nacional.
- Establecimiento de 5 líneas de calibración para gravímetros relativos con características suficientes para cumplir con normativa de levantamientos del INEGI.
- Avance en el cumplimiento de requisitos para el futuro establecimiento de estaciones de liga con el Sistema de Referencia de Alturas Internacional (IHR).
- Acceso al estándar internacional moderno desde cada región de México.

Cabe recalcar que el objetivo principal del INEGI, fue el de obtener puntos de referencia fundamental para redefinir la Red Geodésica Básica Nacional (RGBN).

La estimación de un valor  $g$  es considerada una fuente básica para el estudio del campo de gravedad de la Tierra, puesto que se utiliza como punto de calibración para redes y modelos gravimétricos de escala mundial, a partir de los cuales se han beneficiado los avances tecnológicos de ciencias como geodesia, geofísica, navegación espacial, y geología. Algunos ejemplos de estudios científicos basados en datos del campo de gravedad son: la estructura del interior de la Tierra, los movimientos del centro de masas, intensidad de la gravedad hacia el espacio exterior, efectos de cambio climático, determinación de la altura del terreno sobre el nivel del mar, entre otros.

Como se explica en las secciones 1.3, 1.4 y 2.1 los nuevos valores  $g$  obtenidos con gravímetro absoluto representan la vía de acceso para hacer transitar la red gravimétrica básica existente hacia el nuevo estándar.

## 1.2 La Red Gravimétrica Básica Nacional

La RGBN se define por una tabla de valores de aceleración de la gravedad, mismos que están asociados a un conjunto de vértices geodésicos (puntos identificables, normalmente establecidos en localidades) a partir de los cuales esta información sirve como un estándar de referencia. Cada vértice de la RGBN es conocido como Estación Base Gravimétrica (EBG) y fue establecido para fungir como punto de partida de todos los levantamientos locales emprendidos por instituciones o por particulares. Así pues, la RGBN permite estandarizar la toma de mediciones aportando uno o varios puntos de acceso en cada zona del Territorio Nacional.

En la actualidad el INEGI cuenta con un registro completo de información para cada estación de la RGBN, en el cual se incluye la descripción física del vértice, su localización y valor de gravedad asociado al estándar llamado IGSN71 (International Gravity Standardization Network 1971). La Figura 1 muestra la distribución actual de estaciones base relacionadas en la RGBN.

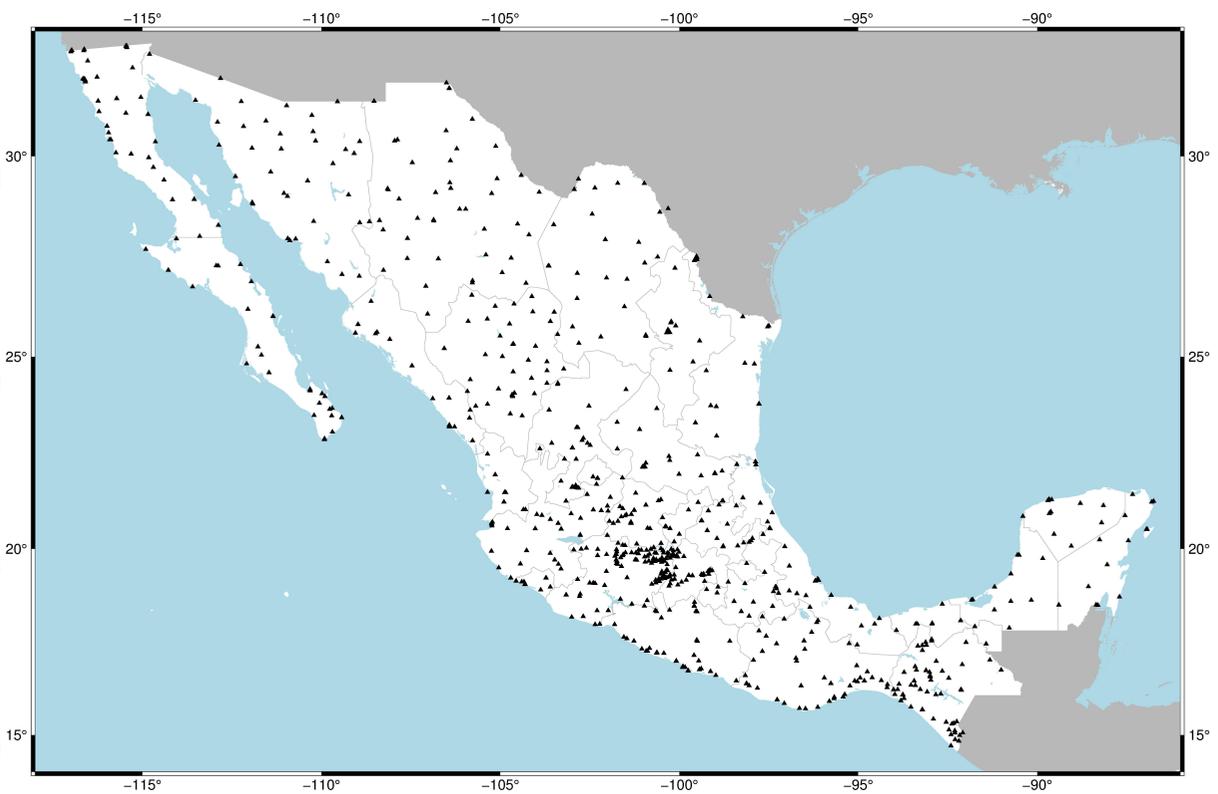


Figura 1. Mapa general de distribución de estaciones base de gravedad. Cada marca de color negro indica la ubicación de una EBG.

Debido al mantenimiento y modernización de vías de comunicación, infraestructura y, en general, por el paso del tiempo, se ha perdido la instalación o el acceso en algunas estaciones marcadas en el mapa de la Figura 1. No obstante, la mayoría de los puntos marcados permanecen funcionales y han sido verificados en años recientes. La permanencia de las estaciones en condiciones físicas inalteradas es una característica prioritaria, dado que eso produce ahorro de recursos.

### **1.3 El estándar IGSN71 y su desactualización**

La información básica con la que se construyó el estándar IGSN71 fue colectada durante la primera mitad del siglo XX. En esa época los gravímetros ya aprovechaban la combinación de tecnología óptica y mecánica, pero fue hasta la década de los años 1990 cuando la electrónica brindó un impulso a la resolución de las lecturas de hasta dos órdenes de magnitud mayor. Junto con este avance, vinieron otras mejoras sorprendentes como las de los sistemas de posicionamiento global por técnicas satelitales. Tomando esto en cuenta, se tiene claro que las necesidades de precisión y exactitud en todas las referencias geodésicas deben avanzar al mismo ritmo para lograr la misión de contar con infraestructura de soporte a las nuevas aplicaciones.

En los datos gravimétricos recientes se hace evidente un aumento de precisión y exactitud que es consecuencia de la aplicación de tecnología electrónica junto al análisis y adaptación de metodologías. Los estudios realizados desde el INEGI han permitido constatar que la técnica utilizada de gravimetría entrega datos con cualidades superiores a los levantamientos de décadas pasadas; sin embargo, dicho aumento en calidad no puede aún ser transferido a los datos de gravedad que se publican mientras se sigue implementando el estándar IGSN71.

Considerando que desde diversos foros la comunidad científica internacional recomienda de manera concreta que se adopte a las EGA como sustituto del IGSN71, puede verse con mayor claridad que las nuevas EGA establecidas en México conforman un paso necesario para redefinir a la RGBN.

## 2. Fundamento científico

---

### 2.1 Pertinencia y precisión de los levantamientos

Nominalmente el gravímetro de modelo A-10 tiene una capacidad de determinar la aceleración de gravedad con una precisión típica de 0.010 mGal. De acuerdo con varios estudios científicos independientes, la metodología y condiciones de medición pueden extenderse para lograr una exactitud general de 0.005 mGal (e.g. Kryński y Sękowski 2010; Fukuda *et al.*, 2010). Este orden de exactitud es apropiado para funcionar como referencia en el control gravimétrico nacional de México, cuya red de estaciones base es establecida con incertidumbre de 5 a 10 veces mayor (ver normativa del INEGI, 1985).

Analizando las cifras de exactitud reales en las redes gravimétricas nacionales, las EGA establecidas en 2018 aportan puntos de referencia con una exactitud de  $\sigma_1 = 0.010$  mGal o mejor (en términos de desviación estándar). Los detalles de esta afirmación se muestran en la sección 3. Por otra parte, la propagación por el método relativo hacia las estaciones de la RGBN cuenta con una precisión estimada de  $\sigma_2 = 0.034$  mGal. Esta cifra se obtuvo como parte del último procesamiento de prueba realizado sobre la red de observaciones relativas en cobertura nacional. De lo anterior se deduce que la incertidumbre total para una estación de la RGBN ( $\sigma_2^T$ ) podrá llegar a ser del orden de:  $\sigma_2^T = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 0.036$  mGal.

Cabe recalcar que  $\sigma_2^T$  es una cifra preliminar, la cual podrá ser actualizada con información definitiva del ajuste que se lleve a cabo para propagar valores de EGA sobre la RGBN.

El control de calidad métrica para el uso del gravímetro A-10 en México se planificó primeramente con un comparativo internacional, donde el instrumento propiedad del National Geodetic Survey (NGS) fue sometido a verificación de resultados antes y al final del levantamiento. El sitio de comparación certificado fue el laboratorio llamado Table Mountain, en los EE.UU. (Schmerge *et al.*, 2012). Adicionalmente, durante el levantamiento se consideró incluir mediciones sobre el laboratorio de gravimetría del Centro Nacional de Metrología (CENAM, en el Estado de Querétaro). Todas las comparaciones efectuadas para control de calidad resultaron en variaciones menores a 0.005 mGal.

Traduciendo lo anterior en sensibilidad de movimientos verticales, puede asegurarse que el gravímetro utilizado aporta una resolución cercana a 3 cm. De este modo, las aplicaciones de las nuevas estaciones pueden ir más allá del control gravimétrico nacional, abarcando estudios locales del campo de gravedad y monitoreo geológico de escala mundial.

Con motivo de asegurar la pertinencia y utilidad de las nuevas EGA fue necesario planificar en forma estratégica la cantidad óptima de estaciones y su ubicación. Entre una gran cantidad de factores que intervinieron en la determinación de esta planificación, uno de los más relevantes fue la opinión de científicos, especialistas reconocidos en esta materia.

## **2.2 Criterios para la selección de sitios**

La selección de ciudades propicias para establecer las EGA en el levantamiento de 2018 se basó primordialmente en un criterio de distribución espacial uniforme sobre el territorio de México, procurando evitar zonas de actividad sísmica intensa como la región costera del sur. De esta manera se consideraron 14 ciudades inicialmente: Ensenada, Hermosillo, Chihuahua, Los Mochis, Durango, Monterrey, Aguascalientes, Tepic, Guadalajara, Querétaro, Taxco, Veracruz, Campeche y Mérida. De esta lista de ciudades, 5 fueron adoptadas como puntos fijos con base en la existencia previa de estaciones de gravedad absoluta. La sección 6 aporta mayores detalles sobre las estaciones preexistentes y su relación con el levantamiento de 2018.

Por otra parte, atendiendo a la necesidad independiente de contar con líneas de calibración para gravímetros relativos en algunas regiones de México, se agregaron 6 estaciones al diseño de la red fundamental. Tal es el caso de las estaciones en la Sierra de San Pedro Mártir en Baja California, Chipinque en Nuevo León, Jalpa en Zacatecas y el Volcán Tliltépetl (observatorio del Gran Telescopio Milimétrico) en Puebla.

De lo anterior resultó un total de 19 estaciones proyectadas con la capacidad de atender a diversos propósitos geodésicos. La Figura 2 muestra la distribución espacial de los vértices programados, mientras que otros detalles de la ubicación específica de cada EGA se informan en el Anexo.

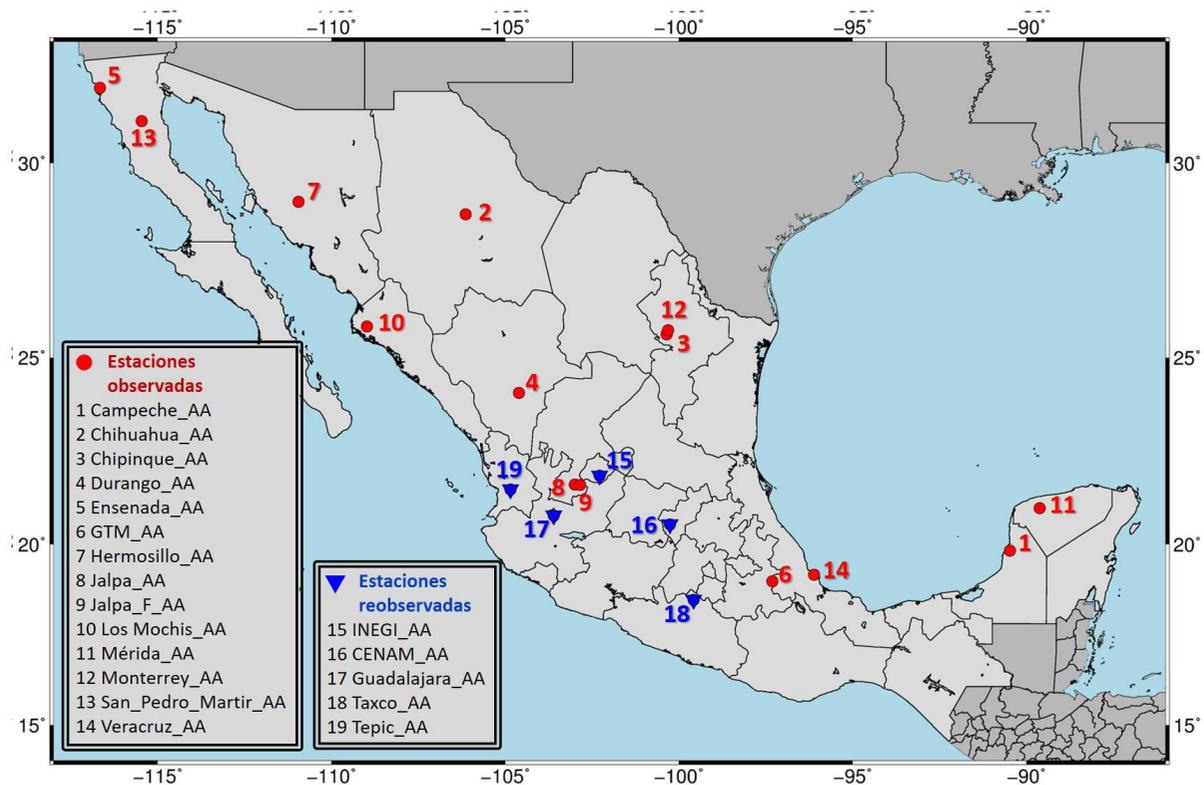


Figura 2. Mapa de localización de las estaciones observadas durante el levantamiento de 2018.

Del mapa anterior cabe resaltar que los sitios marcados en color azul distinguen a los lugares donde alguna institución ajena al INEGI había establecido una EGA, cuyos resultados pudieron ser tomados como referencia para verificar la calidad de las nuevas observaciones.

### 2.3 Gravimetría con el dispositivo A-10

El fundamento usado para medir  $g$  con el gravímetro de modelo A-10 es el de dejar caer un objeto en un ambiente de vacío, sin moléculas de aire obstruyendo su trayecto, al tiempo que se toman lecturas de alta precisión sobre el tiempo que tarda en caer y la distancia que logra recorrer a cada instante. En general, esta técnica es conocida como *observación de caída libre*.

Con el fin de conseguir estimaciones de  $g$  con una resolución de  $1 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2}$ , o sea de 1 micro-Gal, la observación de caída libre se realiza con instrumentación electrónica avanzada como un distanciómetro láser (configurado como interferómetro Michelson), un reloj atómico de rubidio, un sistema de cámara de vacío, un sistema de autonivelación electrónico y un sistema de eliminación de vibraciones para medir el movimiento de caída libre en su forma más pura.

Bajo condiciones de estabilidad del suelo en el que se hacen los levantamientos, más condiciones meteorológicas normales, los datos colectados por el gravímetro A-10 son suficientemente confiables para que un programa computacional traduzca esa información en un valor de

aceleración de gravedad calculado por cada segundo de operación. Esto significa que el gravímetro logra generar 60 observaciones de caída libre por cada minuto del tiempo que permanece en funcionamiento.

Durante los instantes en los que el gravímetro realiza una liberación del objeto de prueba y éste avanza en caída por 10 cm, el distanciómetro láser y el reloj de rubidio logran captar cerca de 300,000 lecturas de posición del objeto y el tiempo con alta precisión.

Denominando  $x_i$  a cada registro de posición y el tiempo correspondiente  $t_i$ , entonces el conjunto de datos puede graficarse como puntos en un plano cartesiano. La Figura 3 contiene un ejemplo de esta gráfica mostrando con círculos en color rojo las lecturas  $(t_i, x_i)$  (Kanney, 2019). Puede notarse que la naturaleza del movimiento es aproximadamente de forma parabólica donde el parámetro principal es la aceleración de gravedad y sus posibles variaciones durante el trayecto.

$$x_i = x_0 + v_0 \tilde{t}_i + \frac{g_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{\gamma x_0 \tilde{t}_i^2}{2} + \frac{1}{6} \gamma v_0 \tilde{t}_i^3 + \frac{1}{24} \gamma g_0 \tilde{t}_i^4$$

donde:

$x_0$  es la posición inicial,

$v_0$  es velocidad inicial,

$c$  es velocidad de la luz,

$\gamma$  es el gradiente de gravedad,

$g_0$  es aceleración inicial,

$$\tilde{t} = t_i - \frac{(x_i - x_0)}{c}$$

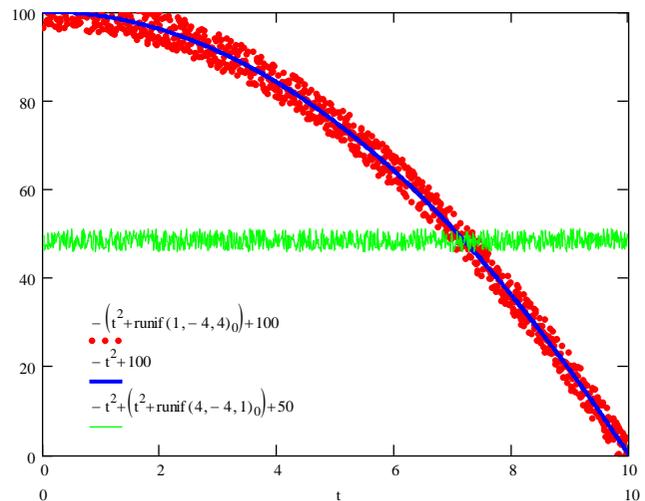


Figura 3. Modelo descriptivo del movimiento de caída libre y una gráfica de lecturas de posición-tiempo tomadas de una masa de prueba.

Los levantamientos de 2018 fueron efectuados con el gravímetro A-10 de número de serie 025. Para este dispositivo, el valor  $g$  medido queda asociado a un punto específico que se encuentra al interior de la cámara de vacío, exactamente ubicado a 72.20 cm encima del nivel del suelo en el que está colocado el aparato. Este dato es relevante para la interpretación de los resultados que se presentan a continuación en las secciones 3 y 4.

### 3. Las estaciones de gravedad absoluta establecidas en 2018

En esta sección se incluye información sobre los criterios de operación que se adoptaron para la toma de lecturas del gravímetro absoluto A10, el procedimiento general, la técnica de procesamiento y los resultados definitivos.

#### 3.1 Resultados definitivos

El producto primario del gravímetro absoluto es un valor de aceleración de la gravedad medido a una altura de 72.2 cm sobre el piso, asociado con un parámetro de incertidumbre en términos de desviación estándar. A partir de este dato es posible calcular la magnitud  $g$  para otros puntos de interés de la estación gravimétrica, como la gravedad a nivel del piso, o al nivel de 25 cm en donde se localiza el sensor de muchos gravímetros relativos. Dicho cálculo fue realizado de manera rigurosa, contando con apoyo de los resultados de un gravímetro relativo, los cuales se detallan en la Sección 4. La Tabla 1 presenta los resultados definitivos del valor  $g$  medido en la elevación de 72.2 cm, más sus respectivas estimaciones en elevación de 25.0 y al nivel del piso (0.0 cm).

Aceleración de la gravedad medida sobre 19 sitios de observación en México.

Tabla 1

Unidades en microGal e incertidumbre expresada en términos de desviación estándar.

Estación	Altura [ m ]	gravedad a 0.0 cm	gravedad a 25.0 cm	gravedad a 72.2 cm
Campeche_AA	25	978626502 ±8.7	978626417 ±8.2	978626256 ±7.7
CENAM_AA	1940	978081765 ±8.6	978081697 ±8.2	978081570 ±7.7
Chihuahua_AA	1525	978732630 ±9.6	978732553 ±8.8	978732404 ±7.7
Chipinque_AA	1300	978615234 ±8.8	978615156 ±8.3	978615009 ±7.7
Durango_AA	1880	978317111 ±8.4	978317039 ±8.1	978316896 ±7.7
Ensenada_AA	40	979446867 ±9.0	979446791 ±8.4	979446652 ±7.7
GTM_AA	4580	977438098 ±10.3	977438005 ±9.2	977437810 ±7.7

(Continúa)

Estación	Altura [ m ]	gravedad a 0.0 cm	gravedad a 25.0 cm	gravedad a 72.2 cm
Guadalajara_AA	1575	978223160 ±8.8	978223084 ±8.3	978222945 ±7.7
Hermosillo_AA	260	979157859 ±8.6	979157768 ±8.2	979157602 ±7.7
INEGI_AA	1885	978175377 ±9.1	978175299 ±8.5	978175157 ±7.7
Jalpa_AA	1396	978251589 ±8.3	978251515 ±8.0	978251376 ±7.7
Jalpa_F_AA	2545	978033448 ±8.8	978033349 ±8.3	978033159 ±7.7
Los_Mochis_AA	16	979007111 ±10.1	979007034 ±9.1	979006889 ±7.9
Mérida_AA	25	978689959 ±8.6	978689876 ±8.2	978689726 ±7.7
Monterrey_AA	530	978801966 ±8.2	978801893 ±8.0	978801757 ±7.7
San_Pedro_Mártir_AA	2805	978740461 ±9.0	978740337 ±8.4	978740109 ±7.8
Taxco_AA	1220	978147420 ±8.7	978147353 ±8.2	978147223 ±7.7
Tepic_AA	920	978461014 ±8.5	978460942 ±8.3	978460801 ±7.9
Veracruz_AA	12	978564746 ±8.5	978564667 ±8.2	978564520 ±7.9

En la Tabla 1 puede notarse que la mayor atracción de gravedad registrada corresponde a la estación Ensenada\_AA en el Estado de Baja California, mientras que la menor de ellas se dio en la estación GTM\_AA, ubicada en la cima del volcán Tliltépetl, Estado de Puebla. Este comportamiento del campo de gravedad se explica, en primer lugar, por el efecto de incremento de  $g$  por la ubicación latitudinal que asocia una mayor magnitud a los sitios con mayor cercanía hacia el polo norte. En segundo lugar, por regla general la intensidad de la gravedad disminuye conforme se incrementa la altura del punto de observación sobre el nivel del mar. Esto explica cómo es que el sitio ubicado en Puebla adquiere una magnitud tan significativamente reducida al ser el punto de observación más elevado que se ha logrado incluir en un levantamiento gravimétrico dentro de México.

El Anexo muestra información y coordenadas de los 19 sitios de observación.

### 3.2 Procedimientos y parámetros del levantamiento en 2018

La puesta en operación del gravímetro absoluto permitió verificar el nivel de intensidad de las vibraciones del suelo, que idealmente deben ser nulas para favorecer un aumento en la precisión de las mediciones de gravedad. Gracias a esta verificación se tomaron en sitio las medidas necesarias para configurar los ciclos de lecturas del gravímetro A10 a modo de que los indicadores estadísticos finales fueran compatibles con la exactitud requerida. Esta y otras medidas de aseguramiento de la calidad se detallan a continuación.

En cada sitio de medición la configuración típica del *software* de control del gravímetro A10 indicó coleccionar 2 *observaciones de gravedad*. Una *observación* consta de un conjunto de 6 ciclos de medición y cada ciclo representa un promedio resultante de 120 lecturas directas de  $g$ . Esto quiere decir que cada observación representa el promedio de 720 lecturas.

Al terminar la primera observación, se procedió a desmontar la cámara de vacío y se aplicó una rotación de  $90^\circ$  a la base del amortiguador de vibraciones llamado "superspring" para dar comienzo a la segunda observación. Solo tras la verificación de que ambas observaciones arrojaron resultados congruentes, con discrepancia de uno o dos micro Gal, se dio por concluido el levantamiento absoluto.

Tras verificar la repetibilidad de las observaciones, el análisis estadístico indicó que los puntos de mayor estabilidad, libres de cualquier vibración significativa fueron las estaciones siguientes: Monterrey\_AA, Chipinque\_AA, Durango\_AA, Jalpa\_AA, Jalpa\_F\_AA, GTM\_AA, Campeche\_AA, Mérida\_AA, Taxco\_AA, Guadalajara\_AA, Hermosillo\_AA, y Ensenada\_AA.



En los mismos términos de estabilidad, cabe indicar que algunos sitios mostraron influencia de vibraciones moderadas, como fue el caso de Chihuahua\_AA, INEGI\_AA, CENAM\_AA, Los\_Mochis\_AA, San\_Pedro\_Martir\_AA y Tepic\_AA. Solamente para el caso de la estación Veracruz\_AA fue necesario programar ciclos adicionales por falta de repetibilidad en el primer par de observaciones. Este comportamiento está asociado con la inestabilidad del terreno, aparentemente blando, con niveles del manto freático muy superficial y fuentes de vibración externas a la zona de medición. Una condición de suelo similar a la de Veracruz pudo notarse en las estaciones de Tepic y Los Mochis.

### 3.3 Procesamiento

De acuerdo con el reporte de J. Kanney, 2019, el procesamiento de los datos coleccionados fue realizado con el *software g* de Micro-G Lacoste, versión 9.12.04.23, el cual ejecuta un cálculo de promedio ponderado entre las mediciones registradas. La función de ponderación normalizada es  $(1/\sigma)^2$ . Esto significa que cada resultado tiende a parecerse más a aquellas mediciones tomadas en ciclos menos afectados por ruido de vibraciones o por ciclos de mayor duración que hayan sido programados.

El *software* fue configurado para incluir correcciones por los efectos de marea, carga oceánica, movimiento polar, presión barométrica y gradiente vertical de gravedad. Los efectos de marea y carga oceánica fueron tomados del modelo *Schwiderski*. Los parámetros de orientación

del polo de rotación de la Tierra fueron actualizados una vez por semana, en apego a los estándares de procesamiento recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1992). El efecto de presión atmosférica se calculó usando el estándar de Alemania DIN #5450. Los datos de gradiente vertical de gravedad local fueron tomados de los resultados mostrados en la Sección 5.

## 4. Gradiente vertical de gravedad

---

La tasa de cambio de  $g$  con respecto a la altura sobre el piso es un parámetro que varía localmente y es un insumo necesario para obtener valores de gravedad absoluta referidos al nivel del piso con exactitud de 10 microGal. A esta tasa de cambio se le conoce como gradiente vertical de gravedad. Dado que la medición de dicho gradiente implica el procesamiento de mediciones de gravedad relativa en diferentes alturas sobre el nivel del piso, el levantamiento especial de 2018 incluyó la toma de lecturas con un gravímetro CG-5 sobre un trípode especial. A continuación, se presentan los resultados y la metodología empleada para los cálculos del gradiente vertical.

### 4.1 Magnitudes del gradiente observado

Denotando por  $g^h$  el valor de gravedad a una elevación  $h$  medida en centímetros desde el piso, y siendo  $g^0$  el valor precalculado al nivel del piso ( $h=0$ ), se recomienda utilizar la siguiente fórmula para obtener estimaciones en el nivel deseado  $h$  (ver por ejemplo: Csapó y Volgyesi, 2002):

$$g^h = g^0 + [f_1 * h + f_2 * h^2]$$

donde  $f_1$  y  $f_2$  son factores del gradiente cuadrático, cuyos valores para cada estación absoluta se muestran en la tabla 2. Esta fórmula es válida para obtener resultados con exactitud de 10 microGal en cualquier elevación entre cero y un metro.

Adicional al modelo de corrección cuadrático de 2 factores, la Tabla 2 proporciona una aproximación lineal del gradiente vertical de gravedad. Este dato puede ser utilizado para los mismos fines (usando  $g^h = g^0 + f * h$ ), mientras se tenga en cuenta que el resultado puede llegar a superar los 10 microGal de incertidumbre.

Estación	Gradiente lineal [ $\mu\text{Gal}/\text{cm}$ ]	Gradiente cuadrático	
		factor 1	factor 2
Campeche AA	-3.433 $\pm$ 0.008	-3.378 $\pm$ 0.008	-0.00035 $\pm$ 0.00007
CENAM AA	-2.713 $\pm$ 0.008	-2.702 $\pm$ 0.008	-0.00006 $\pm$ 0.00007
Chihuahua AA	-3.171 $\pm$ 0.015	-3.108 $\pm$ 0.015	-0.00039 $\pm$ 0.00015
Chipinque AA	-3.125 $\pm$ 0.009	-3.114 $\pm$ 0.009	-0.00007 $\pm$ 0.00008
Durango AA	-3.128 $\pm$ 0.005	-2.844 $\pm$ 0.005	-0.00186 $\pm$ 0.00005
Ensenada AA	-2.911 $\pm$ 0.010	-3.035 $\pm$ 0.010	0.00079 $\pm$ 0.00010
GTM AA	-4.455 $\pm$ 0.021	-3.588 $\pm$ 0.021	-0.00556 $\pm$ 0.00021
Guadalajara AA	-2.984 $\pm$ 0.009	-2.894 $\pm$ 0.009	-0.00057 $\pm$ 0.00008
Hermosillo AA	-3.452 $\pm$ 0.007	-3.676 $\pm$ 0.007	0.00149 $\pm$ 0.00007
INEGI_AA	-2.930 $\pm$ 0.011	-3.119 $\pm$ 0.011	0.00113 $\pm$ 0.00010
Jalpa AA	-2.973 $\pm$ 0.005	-2.951 $\pm$ 0.005	-0.00013 $\pm$ 0.00004
Jalpa F AA	-4.031 $\pm$ 0.009	-3.978 $\pm$ 0.009	-0.00034 $\pm$ 0.00008
Los Mochis AA	-3.028 $\pm$ 0.018	-3.111 $\pm$ 0.018	0.00053 $\pm$ 0.00017
Mérida AA	-3.057 $\pm$ 0.007	-3.368 $\pm$ 0.007	0.00200 $\pm$ 0.00007
Monterrey AA	-2.853 $\pm$ 0.004	-2.917 $\pm$ 0.004	0.00039 $\pm$ 0.00003
San Pedro Mártir AA	-4.756 $\pm$ 0.010	-4.999 $\pm$ 0.010	0.00122 $\pm$ 0.00009
Taxco AA	-2.786 $\pm$ 0.008	-2.681 $\pm$ 0.008	-0.00066 $\pm$ 0.00007
Tepic AA	-3.075 $\pm$ 0.005	-2.844 $\pm$ 0.005	-0.00143 $\pm$ 0.00004
Veracruz AA	-3.127 $\pm$ 0.005	-3.125 $\pm$ 0.005	-0.00001 $\pm$ 0.00005

De los resultados anteriores puede notarse que el gradiente más pronunciado se encontró en los sitios de San Pedro Mártir, el Gran Telescopio Milimétrico (GTM) y la Sierra de Nochistlán (Jalpa\_F\_AA). Estos sitios se caracterizan por estar localizados en una cima montañosa, donde comúnmente se espera este tipo de comportamiento. Por el contrario, las magnitudes de gradiente mínimo están generalmente asociadas a sitios cercanos a la base de las montañas. De entre los sitios observados, destacan los ubicados en Taxco y CENAM por contar con magnitudes menores al resto.

## 4.2 Metodología aplicada para calcular el gradiente vertical

Los gravímetros relativos son el instrumento idóneo para medir la diferencia de gravedad de un nivel a otro sobre el piso. Al tomar lecturas en elevaciones conocidas se logra coleccionar información suficiente para modelar matemáticamente la tasa de cambio de  $g$  con respecto a la elevación (ver la Figura 4).



Figura 4. Levantamiento de gradiente vertical en 3 niveles con gravímetro relativo.

El equipo básico empleado fue el siguiente:

- Gravímetro relativo. Se utilizó el gravímetro modelo CG-5, con número de serie 150841384 de la marca Scintrex. Previo al levantamiento, el equipo fue sometido a una calibración de escala, una calibración de deriva y una prueba del efecto de inclinación que arrojó los mejores resultados con respecto a otros aparatos similares en propiedad del INEGI.
- Trípode de gravímetro. Se utilizó un trípode especializado de marca Scintrex, propiedad del NGS.

El procedimiento de medición consistió en ubicar y nivelar el trípode directamente sobre el mismo sitio donde el gravímetro absoluto tomó las observaciones, o en su defecto, sobre un sitio estable dentro de un radio máximo de 2 m. Con un flexómetro milimétrico se tomó lectura de la altura del trípode nivelado y se comenzó el ciclo de lecturas gravimétricas sobre cada nivel del trípode en el orden A-B-C-A-B-C-A-B-C (ver la Figura 4). Sobre aspectos de configuración del gravímetro CG-5, cabe resaltar que cada medición fue programada como el promedio de 60 observaciones con filtro sísmico activado y corrección de marea automática.

El procesamiento de los datos colectados se realizó con *software* científico desarrollado por el NGS, que aplica un ajuste ponderado de mínimos cuadrados para obtener tanto un modelo cuadrático como un modelo lineal del gradiente (NGS, 2019).

## 5. Estimación previa de gravimetría absoluta en México

La historia registra una lista breve de levantamientos de gravimetría absoluta en México. Desde los inicios, donde se utilizó un diseño de gravímetro pendular rudimentario en el año 1866 en la Escuela de Minas de la Ciudad de México, y varios otros realizados con péndulos precisos entre 1879 y 1960 (e. g. Medina, 1951; Monges *et al.*, 1973; Hurtado, 1997). De estos últimos se generó la red fundamental del IGSN71, con incertidumbre estimada de 0.3 mGal (Hurtado C. M., 1997).

Fue a partir de la década de los años 1970 cuando la gravimetría dio un salto en precisión al contar con sensores electrónicos, entrando en un auge pleno de los gravímetros comercializados en la década de 1980. Desde entonces la incertidumbre en las mediciones bajó a 0.005 mGal. Durante esta generación de gravímetros electrónicos se cuentan 3 levantamientos en México:

- 1996: El National Geodetic Survey de los EE.UU. utilizó un gravímetro de modelo FG5 para establecer 10 sitios de observación en 9 ciudades.
- 2014-2016: El Centro Nacional de Metrología estableció 3 nuevos sitios de observación en el Estado de Querétaro y realizó otra observación en 5 de los sitios establecidos en 1996.
- 2016: La Universidad de Hannover, Alemania, estableció 2 nuevos sitios de observación y midió nuevamente sobre 8 de los puntos ya existentes.

A continuación, la Figura 5 presenta un mapa de distribución de los sitios de gravimetría absoluta que preceden al levantamiento de 2018.

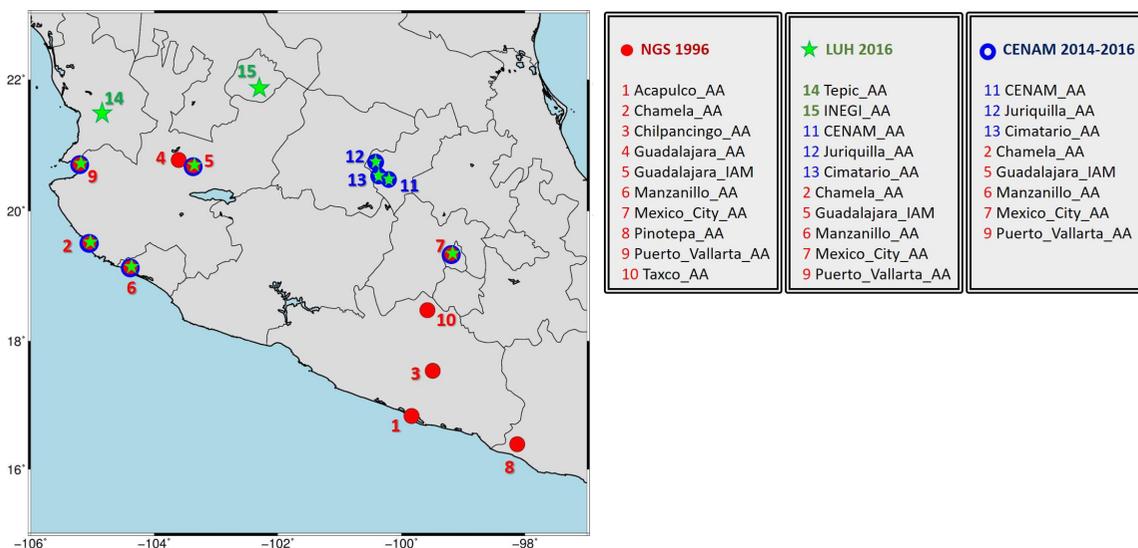


Figura 5: Mapa de distribución de los sitios de gravimetría absoluta que preceden al levantamiento de 2018.

## 5.1 Análisis de comparabilidad sobre los sitios reobservados en 2018

El levantamiento de 2018 incluyó la reobservación 5 sitios previamente determinados con gravimetría de un nivel de precisión comparable; estos son los indicados en la Tabla 3. Con la finalidad de hacer comparable el resultado en términos del punto de observación, los valores de gravedad medidos originalmente fueron transferidos al nivel de observación del gravímetro A10 (h=72.2 cm) haciendo uso del gradiente cuadrático presentado en la Tabla 2.

Los resultados de 2018 en contraste con levantamientos previos. Unidades en microGal.

Tabla 3

Sitio	Observador	gravedad (h=72.2)	Diferencia	
			μGal	años
Aguascalientes	2016 - LUH	978175115 derivada	42	3
	2018 - NGS	978175157 medida		
Querétaro	2016 - LUH	978081566 derivada	4	3
	2018 - NGS	978081570 medida		
Guadalajara	1996 - NGS	978222964 derivada	-19	22
	2018 - NGS	978222945 medida		
Taxco	1996 - NGS	978147227 derivada	-4	22
	2018 - NGS	978147223 medida		
Tepic	2016 - LUH	978460799 derivada	2	3
	2018 - NGS	978460801 medida		

De las 2 columnas finales en la Tabla 3 puede notarse que los sitios de Querétaro, Taxco y Tepic muestran diferencias de medición que caen dentro del rango de incertidumbre declarado en la Tabla 1. En el caso de Aguascalientes, la diferencia de 42 microGal se explica por el bien conocido fenómeno de subsidencia del terreno que experimenta la zona metropolitana donde se localiza la EGA (Esquivel, 2016). Según datos de posicionamiento preciso de la estación GNSS ubicada en el mismo edificio de la EGA, la altura ha disminuido exactamente 0.180 m de la fecha de observación en febrero de 2016 hasta el levantamiento de octubre de 2018. A esta magnitud de subsidencia le corresponde teóricamente un aumento de gravedad de 35 microGal. De modo que agregando esos 35 microGal al valor medido en 2016, la diferencia neta entre las dos observaciones se reduce a 7 microGal; lo cual también cae dentro de la incertidumbre declarada.

Solo resta dar explicación a la diferencia de -19 microGal del sitio observado en Guadalajara. Para este caso se carece de información sobre posibles cambios de elevación del terreno; aunque se sabe que esta zona es cercana a un fallamiento tectónico activo (e. g. Rosas *et al.*, 1996; Johnson y Harrison, 1990). Se trata del área limítrofe entre el Bloque de Jalisco y la Placa Tectónica Norteamericana. A pesar de que se desconoce la magnitud del efecto en gravedad producido por la actividad de estos fallamientos, los estudios independientes de gravimetría absoluta llevado a cabo por el Centro Nacional de Metrología (CENAM) coinciden en que la zona de Guadalajara muestra una aparente disminución del valor  $g$ , debido posiblemente a cambios físicos del subsuelo (Esparza *et al.*, 2019).

## 6. Conclusión y notas finales

---

A partir de noviembre de 2018 el INEGI cuenta con un nuevo conjunto de 19 estaciones geodésicas con valores precisos de aceleración de la gravedad. Se les llama estaciones gravedad absoluta y son sitios elegidos estratégicamente para conocer a detalle las características del campo de gravedad de la Tierra. Entre sus posibles aplicaciones, este documento destacó el papel que jugarán en una redefinición del estándar oficial de México. Actualmente las EGA han sido ligadas a la red gravimétrica nacional existente para luego contar con un banco de datos gravimétricos renovado y asociado a la Red Internacional de Estaciones Base Absolutas (IAGBN por sus siglas en inglés).

El levantamiento de las EGA fue llevado a cabo con el gravímetro absoluto A10-025 gracias a la colaboración del National Geodetic Survey de los EE.UU. Los resultados definitivos incluyen estimaciones precisas del gradiente vertical local, derivadas con ayuda de un gravímetro relativo. La atención de recomendaciones nacionales de metrología y experiencias internacionales fueron tomadas como guía para el control de calidad.

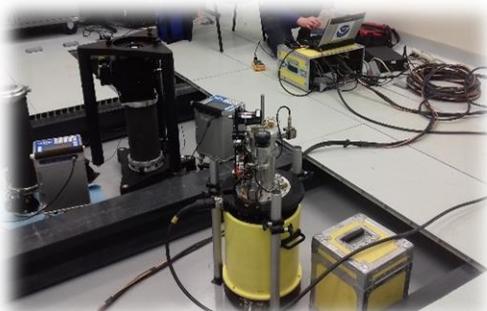
De los objetivos secundarios de este trabajo, resalta la creación de 4 líneas de calibración para gravímetros relativos con las que se asegura un cubrimiento completo del espectro de valores de gravedad que existen en México. De los 19 sitios observados el valor de gravedad mínima se obtuvo en la cima del volcán Tliltépetl (Estado de Puebla), con  $9.77438098 \text{ m/s}^2$ , mientras que el valor máximo se registró en Ensenada, BC, con  $9.79446867 \text{ m/s}^2$ .

Para trabajo futuro en este tema se recomienda diseñar una red especial para medir y monitorear el campo de gravedad sobre las regiones sísmicas de México, así como efectuar reobservaciones eventuales sobre las 19 EGA instaladas en 2018 para validar su estabilidad en el tiempo.

# Anexo

## Localización de estaciones

Tabla de localización de las Estaciones Gravimétricas Absolutas. Unidades de gravedad en microGal ( $1 \times 10^{-8} \frac{m}{s^2}$ ).

DENOMINACIÓN EGA	VISTA DE LA ESTACIÓN	UBICACIÓN
<p>CAMPECHE_AA</p> <p>lat. 19.8473892 lon. -90.4764709 <math>g_0 = 978626502</math></p>		<p>Ciudad de San Francisco de Campeche. Universidad Autónoma de Campeche, laboratorio de hidrología y prueba de materiales.</p>
<p>CENAM_AA</p> <p>lat. 20.5379505 lon. -100.2598953 <math>g_0 = 978081765</math></p>		<p>El Zues, Querétaro. Centro Nacional de Metrología, Laboratorio de gravimetría.</p>
<p>CHIHUAHUA_AA</p> <p>lat. 28.7028561 lon. -106.1395798 <math>g_0 = 978732630</math></p>		<p>Ciudad de Chihuahua. Universidad Autónoma de Chihuahua, acceso del edificio de cubículos.</p>
<p>DURANGO_AA</p> <p>lat. 24.0674171 lon. -104.607193 <math>g_0 = 978317111</math></p>		<p>Ciudad de Victoria de Durango, Durango. Edificio Regional del INEGI, en la oficina de estación fija.</p>

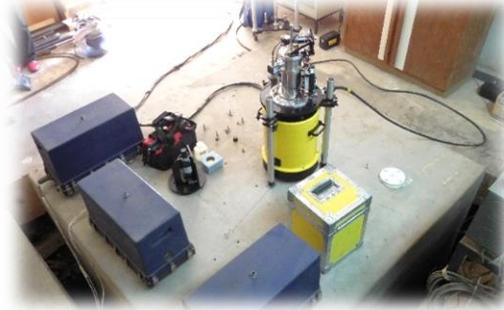
DENOMINACIÓN  
EGA

VISTA DE LA ESTACIÓN

UBICACIÓN

ENSENADA\_AA

lat. 31.867754  
lon. -116.6643524  
 $g_0 = 979446867$



Ciudad de Ensenada, Baja California.  
Centro de Investigación Científica y de  
Educación Superior de Ensenada,  
Laboratorio de la estación  
sismológica.

GTM\_AA

lat. 18.9865837  
lon. -97.3140869  
 $g_0 = 977438098$



Volcán Tliltépetl, Atzitzintla, Puebla.  
Instalaciones del Gran Telescopio  
Milimétrico del INAOE, en el edificio  
de visitantes.

GUADALAJARA\_AA

lat. 20.7793808  
lon. -103.6047211  
 $g_0 = 978223160$



Ciudad de Guadalajara, Jalisco.  
Unidad deportiva de la Universidad de  
Guadalajara, en el área de los baños  
del salón de reuniones Piña.

HERMOSILLO\_AA

lat. 29.0194435  
lon. -110.9488907  
 $g_0 = 979157859$



Ciudad de Hermosillo, Sonora.  
Centro Ecológico de Hermosillo, en  
la caseta de sismología.

DENOMINACIÓN  
EGA

VISTA DE LA ESTACIÓN

UBICACIÓN

INEGI\_AA

lat. 21.8571663  
lon. -102.2843323  
 $g_0 = 978175377$



Ciudad de Aguascalientes.  
Edificio Sede del INEGI, en la  
precámara de la fototeca.

JALPA\_AA

lat. 21.6170769  
lon. -102.9983749  
 $g_0 = 978251589$



Ciudad de Jalpa, Zacatecas.  
Universidad Autónoma de  
Zacatecas, campus Jalpa, parte  
posterior del auditorio.

JALPA\_F\_AA

lat. 21.6065006  
lon. -102.8479691  
 $g_0 = 978033448$



Sierra de Nochistlán, Carretera  
Jalpa – Tlachichila, Zacatecas,  
kilómetro 19, Ranchería del  
Chiquihuitillo.

LOS\_MOCHIS\_AA

lat. 25.8143101  
lon. -108.9802551  
 $g_0 = 979007111$



Ciudad de Los Mochis, Sinaloa.  
Universidad Autónoma de Sinaloa  
campus Los Mochis, en el  
laboratorio de topografía.

DENOMINACIÓN  
EGA

VISTA DE LA ESTACIÓN

UBICACIÓN

MERIDA\_AA

lat. 20.9800282  
lon. -89.6203079  
 $g_0 = 978689959$



Ciudad de Mérida, Yucatán.  
Edificio regional del INEGI, en el  
acceso principal.

CHIPINQUE\_AA

lat. 25.6076164  
lon. -100.3555527  
 $g_0 = 978615234$



Ciudad de Monterrey, Nuevo  
León.  
Parque Ecológico Chipinque,  
Cabaña de Enfermería.

MONTERREY\_AA

lat. 25.7154999  
lon. -100.3128891  
 $g_0 = 978801966$



Ciudad de Monterrey, Nuevo  
León.  
Biblioteca Magna de la  
Universidad Autónoma de Nuevo  
León, en el área de descanso junto  
a la oficina de estación fija del  
INEGI.

SAN\_PEDRO\_  
MARTIR\_AA

lat. 31.044136  
lon. -115.4637375  
 $g_0 = 978740461$



Parque Nacional Sierra San Pedro  
Mártir, Baja California.  
Observatorio Astronómico  
Nacional, sobre la entrada al  
telescopio de 2.12m.

DENOMINACIÓN  
EGA

VISTA DE LA ESTACIÓN

UBICACIÓN

TAXCO\_AA

lat. 18.4758053  
lon. -99.5805588  
 $g_0 = 978147420$



Taxco el Viejo, Guerrero.  
Universidad Autónoma de Guerrero campus Taxco el Viejo, en el Laboratorio de suelos.

TEPIC\_AA

lat. 21.4845009  
lon. -104.8488083  
 $g_0 = 978461014$



Ciudad de Tepic, Nayarit.  
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Unidad de Transferencia Tecnológica Tepic.

VERACRUZ\_AA

lat. 19.1654167  
lon. -96.1149445  
 $g_0 = 978564746$



Ciudad de Veracruz, Veracruz de Ignacio de la Llave.  
Universidad Autónoma de Veracruz, Laboratorio de monitoreo multiescalar de geosistemas.

## Bibliografía

---

- Avalos Naranjo, David, Marco A. Mendoza Martínez y Apolo Alvarado Cortés, 2018. "Ajuste de prueba de la red gravimétrica básica nacional considerando cambios en el tiempo". Reporte técnico interno del INEGI. Aguascalientes, México, Abril de 2018.
- Avalos Naranjo, David, Raúl Muñoz Abundes y Leticia García Santos, 2017. "Recomendaciones para establecer vértices de gravimetría absoluta en México con fines geodésicos". Reporte técnico interno del INEGI. Aguascalientes, México, Abril de 2017.
- Csapó, G y Lajos Volgyesi, 2002. "Determination and reliability estimation of vertical gradients based on test measurements". Congreso de "Gravity and Geoid 2002", Editor I.N. Tziavos, Thessaloniki, 2003, pp. 84-89.
- Esparza, Alfredo, Jorge Arzate, Ludger Timmen, Jason Silliker y Manuel Schilling, 2019. "High precision absolute gravimetry in Mexico; in and out laboratory measurements. The Jalisco Block changes in gravity from 1996 to 2018". Poster número 10031, presentado en la Asamblea general de la Unión Geofísica Europea 2019, Viena, Austria.
- Esquivel Ramírez, Rubén, 2016. "Estudio de los hundimientos por subsidencia en Aguascalientes con métodos satelitales". Reporte técnico del INEGI. Aguascalientes, México, Enero de 2016.
- Johnson, C.A. y Christopher Harrison, 1990. "Neotectonics in Central Mexico". *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 64. 187-210. 10.1016/0031-9201(90)90037-X.
- Rosas-Elguera, J., Luca Ferrari, Víctor Garduño Monroy y Jaime Fucugauchi, 1996. "Continental boundaries of the Jalisco Block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico". *Geology*. 24. 921-924.. 10.1130/0091-7613(1996)024<0921:CBOTJB>2.3.CO;2.
- WMO, 1992. "Manual on the global data-processing system". Anexo de las regulaciones técnicas de la Organización Meteorológica Mundial (WMO), Génova, Suiza.
- Kanney, J., 2019. "Mexico A10 absolute gravity survey, october-november 2018". Memorando técnico NOS-NGS-79 del National Geodetic Survey. Abril 2019.
- Krynski, Jan y Marcin Sekowski, 2010. "Surveying with the A10-20 Absolute Gravimeter for Geodesy and Geodynamics - first results". Reporte técnico del Institute of Geodesy and Cartography, Varsovia, Polonia.
- Fukuda, Yoichi, Jun Nishijima y Makoto Taniguchi, 2010. "Precision, Repeatability and Accuracy of A10 Absolute Gravimeter". Presentación de la AGU Fall Meeting, Diciembre 2010.
- Schmerge, D., O. Francis, J. Henton, D. Ingles, D. Jones, J. Kennedy, K. Krauterbluth, J. Liard, D. Newell, R. Sands, A. Schiel, J. Silliker y D. van Westrum, 2012. "Results of the first North American comparison of absolute gravimeters, NACAG-2010". *Journal of Geodesy*, Springer-Verlag 2012. DOI 10.1007/s00190-011-0539-y.