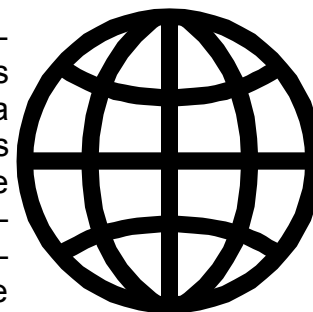


Aceleración de la Gravedad

La aceleración de la gravedad es la manifestación de la atracción universal que impulsa los cuerpos hacia el centro de la Tierra, es la fuerza que determina el peso de los cuerpos (Reader's Digest. 1981). La aceleración de la gravedad se denota por g y se define como el incremento constante de la velocidad por unidad de tiempo percibido por un cuerpo en caída libre, es directamente proporcional a la fuerza F en newtons (N) e inversamente proporcional a la masa m_o del cuerpo en kilogramos (kg), $g = F/m_o$.



Geodesia

De acuerdo con el SI (sistema internacional de unidades) la magnitud de aceleración de la gravedad se mide en unidades de m/s^2 , aunque también es común encontrarla expresada en gales, el gal es llamado así en honor a Galileo Galilei. $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 0,01 \text{ m/s}^2$. La unidad de aceleración gal de símbolo Gal no pertenece al SI pero puede utilizarse temporalmente dado su uso tan extendido (Nava, H. *et al.* 1997).

El valor de la aceleración de la gravedad local es de suma importancia al realizar correcciones en mediciones de alta exactitud, con instrumentos basados en método primario, que hacen uso del método gravimétrico y en general en instrumentos en los que se utiliza la corrección por aceleración de la gravedad como en: manómetros de columna de líquido, balanzas de presión de tipo pesos muertos, medición y calibración de fuerza mediante masas suspendidas, durómetros de masas suspendidas, determinación de densidad, viscosidad, hidrografía, geología, etc.

Somos su Relevo a la Calidad

La Guía MetAs, es el boletín periódico del laboratorio de metrología MetAs, S.A. de C.V.

En *La Guía MetAs* se presentan noticias de la metrología, artículos e información técnica seleccionada por los colaboradores de MetAs, que deseamos compartir con nuestros colegas, usuarios, clientes, amigos, y en fin con todos aquellos interesados o relacionados con la metrología técnica e industrial.

Calle: Jalisco # 313. Colonia: Centro
49 000. Cd. Guzmán, Jalisco, México
Teléfono & Fax: 01 (341) 4 13 61 23 & 4 13 16 91
E-mail: metas@metas.com.mx. Web: www.metas.com.mx

Laboratorio de Metrología:

Presión

Alto Vacío

Temperatura

Humedad

Eléctrica

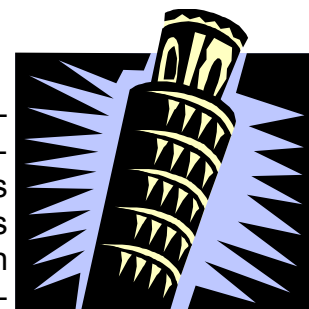
Instrumentación Industrial

Entrenamiento & Consultoría

**Galileo
Galilei
&
Isaac
Newton**

Galileo Galilei

Al describir la aceleración de la gravedad es necesario referirse al físico, matemático, astrónomo y pensador italiano Galileo Galilei (1564 - 1642), que formuló las leyes que rigen la aceleración en la caída de los cuerpos (Reader's Digest. 1981) en su conocido experimento con dos balas de cañón de diferente peso en la torre inclinada de Pisa, refutando con esto las antiguas teorías aristotélicas.



Torre de Pisa

Además inventó el telescopio de refracción, también conocido como telescopio galileano con el que descubrió las manchas solares, cuatro satélites de Júpiter, las fases de Venus y Marte. También inventó el termómetro y la balanza hidrostática, descubrió el isocronismo del péndulo el cual fundamenta la operación de los relojes de péndulo.

Aceleración de la gravedad & constante gravitacional

Vale la pena aclarar y no confundir el valor de la *aceleración de la gravedad* g , con la *constante de gravitación universal* G , cuyo valor fue determinado experimentalmente por el físico inglés Henry Cavendish (1731 - 1810) en 1798, basado en la teoría de la gravitación universal descubierta por el físico inglés Isaac Newton (1642 - 1727) en 1665, al observar la caída de una manzana al suelo de su jardín (Reader's Digest. 1981).

Cuando se hacen mediciones de la gravedad de la Tierra no se mide la fuerza gravitacional F , normalmente se mide la aceleración de la gravedad g , mediante el uso de gravímetros, siendo el más común el de masa y resorte. La fuerza gravitacional F , la constante de la gravitación universal G y la aceleración de la gravedad g , se relacionan mediante las siguientes ecuaciones desarrolladas por Isaac Newton y que explican el fenómeno primeramente experimentado por Galileo Galilei.

$$F = G \cdot M \cdot m_o / a^2 \quad \text{Ley de mutua atracción entre masas de Newton}$$

$$g = F / m_o \quad \text{Segunda Ley de Newton } (F = m_o \cdot g)$$

$$g \approx G \cdot M / a^2 \quad \text{Relación entre } g \text{ \& } G$$

Si consideramos el valor de la constante gravitacional geocéntrica (incluyendo la atmósfera) $G \cdot M = 3\,986\,005 \cdot 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$ (Moritz, H. 1988), donde G es la constante gravitacional newtoniana $G = 6,672\,59 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$ (Petley, B. 1992) y M es la masa total de la Tierra y a el radio ecuatorial de la Tierra, $a = 6\,378\,137 \text{ m}$ (Moritz, H. 1988), encontraremos que el valor de la aceleración de la gravedad g es de aproximadamente $9,8 \text{ m/s}^2$.

Aceleración de la gravedad

$$g_0 = 9,806\ 65 \text{ m/s}^2$$

La aceleración de la gravedad no es la misma en todos los lugares del planeta: en los polos es de $9,832 \text{ m/s}^2$ y en el ecuador de $9,780 \text{ m/s}^2$ (Moritz, H. 1988); por convención internacional se considera el valor normalizado de $g_0 = 9,806\ 650 \text{ m/s}^2$ ($32,174\ 05 \text{ ft/s}^2$) el cual corresponde a una latitud de $45,5^\circ$ y 0 m s.n.m. (sobre el nivel medio del mar).

En México La aceleración local de la gravedad puede ser medida por el Instituto de Geofísica de la UNAM (Mena, M. 2002) con exactitud mejor a 1 ppm (parte por millón), mediante gravímetros de masa y resorte de la marca LaCoste & Romberg. Cuando no se requiere de tanta exactitud como en el caso de la metrología industrial, la aceleración de la gravedad puede calcularse con exactitud del orden de $0,01\ \% = 100 \text{ ppm}$, mediante la recomendación del boletín OIML 127.

Cálculo de la aceleración de la gravedad local

La aceleración de la gravedad local puede calcularse de acuerdo con la ecuación recomendada por la Organización Internacional de Metrología Legal en el boletín OIML 127 (Thulin, A. 1992), con una exactitud del $0,01\ \%$.

Esta ecuación utiliza los coeficientes adoptados por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) en el GRS80 (Geodetic Reference System of 1980), dichos coeficientes representan el tamaño, forma y campos gravitacionales de la Tierra (Moritz, H. 1988).



Boletín OIML 127 & GRS80

$$g_l = g_e \cdot (1 + f^* \cdot \text{sen}^2 \Phi - f_4 \cdot \text{sen}^2 2\Phi) - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot H$$

donde:

g_l = aceleración de la gravedad local, en m/s^2

$g_e = 9,780\ 318 \text{ m/s}^2$, aceleración de la gravedad en el ecuador ($\Phi = 0^\circ$)

$f^* = 0,005\ 302\ 4$ (aplastamiento gravitacional)

$f_4 = 0,000\ 005\ 8$

Φ = latitud, en grados ($^\circ$)

H = altitud (ortométrica) sobre el nivel medio del mar, en metros (m)

Para un ejemplo numérico consideraremos la latitud y altitud de las instalaciones del laboratorio *MetAs*, ubicado en Ciudad Guzmán, Jalisco, los valores de latitud y altitud han sido obtenidos de la lista de *distribución de localidades, según su altitud sobre el nivel del mar*, publicada por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI (2002).

**Latitud
&
Altitud**

Ejemplo: cálculo de la aceleración de la gravedad local

$$\Phi_{MetAs} = 19^\circ 42' 10'' = 19^\circ + (42/60)^\circ + (10/3600)^\circ = 19,703^\circ$$

$$H_{MetAs} = 1\,520\text{ m}$$

$$g_{l\,MetAs} = 9,780\,318\text{ m/s}^2 \cdot [1 + (5,3024 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}^2 19,703^\circ) - (5,8 \cdot 10^{-6} \cdot \text{sen}^2 2 \cdot 19,703^\circ)] - 3,086 \cdot 10^{-6} \cdot 1\,520\text{ m}$$

$$g_{l\,MetAs} = 9,780\,318 \cdot [1 + 0,000\,602\,7 - 0,000\,002\,3] - 0,004\,691$$

$$g_{l\,MetAs} = 9,780\,318 \cdot [1,000\,600\,4] - 0,004\,691$$

$$g_{l\,MetAs} = 9,786\,190 - 0,004\,691$$

$$g_{l\,MetAs} = 9,781\,499\text{ m/s}^2$$

$$g_{l\,MetAs} = (9,781\,50 \pm 0,000\,98)\text{ m/s}^2$$

Considerando el valor normalizado de la aceleración de gravedad g_0 , podemos encontrar la relación g/g_0 la cual se utiliza como factor de corrección en diferentes aplicaciones metrológicas.

$$g_{l\,MetAs} / g_0 = 9,781\,50 / 9,806\,65 = 0,997\,435$$

Encontramos que el factor de corrección se desvía de la unidad ideal en el orden de -0,26 %. Para el caso de la g_l calculada, este error es enorme al utilizar patrones de referencia de alta exactitud, de aquí la importancia de conocer el valor de la aceleración de la gravedad local.

Latitud & altitud en ciudades de México

Los valores de latitud y altitud de las principales localidades habitadas en los Estados Unidos Mexicanos, pueden ser consultadas de la lista publicada por el INEGI (2002), la cual se reproduce a continuación.

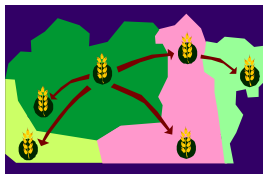


México

Ciudad, Estado	Latitud (°, ', ")	Altitud (m)
Aguascalientes, Ags.	21° 52' 53"	1 870
Ensenada, B.C.	31° 51' 49"	20
Mexicali, B.C.	32° 39' 48"	3
Tijuana, B.C.	32° 32' 05"	20
La Paz, B.C.S.	24° 08' 32"	10
Campeche, Camp.	19° 50' 32"	10
Ciudad del Carmen, Camp.	18° 38' 36"	2
Ciudad Acuña, Coah.	29° 19' 12"	280
Frontera, Coah.	26° 55' 35"	590
Monclova, Coah.	26° 54' 03"	620
Piedras Negras, Coah.	28° 42' 00"	230
Saltillo, Coah.	25° 26' 00"	1 700

Latitud & altitud (Cont.)

Ciudad, Estado	Latitud (°, ', ")	Altitud (m)
Torreón, Coah.	25° 32' 40"	1 120
Colima, Col.	19° 14' 35"	500
Manzanillo, Col.	19° 03' 06"	5
Tecomán, Col.	18° 54' 30"	30
Ciudad de Villa de Álvarez, Col.	19° 16' 00"	530
Comitán de Domínguez, Chis.	15° 15' 04"	1 620
San Cristóbal de las Casas, Chis.	16° 44' 12"	1 940
Tapachula de Córdoba y Ordóñez, Chis.	14° 54' 29"	170
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	16° 45' 10"	600
Cuauhtémoc, Chih.	28° 24' 14"	2 060
Chihuahua, Chih.	28° 37' 54"	1 440
Delicias, Chih.	28° 11' 08"	1 170
Hidalgo del Parral, Chih.	26° 55' 51"	1 720
Juárez, Chih.	31° 44' 06"	1 120
Azcapotzalco, D.F.	19° 28' 58"	2 240
Coyoacán, D.F.	19° 21' 00"	2 243
Cuajimalpan de Morelos, D.F.	19° 22' 28"	2 620
Gustavo A. Madero, D.F.	19° 28' 56"	2 240
Iztacalco, D.F.	19° 23' 43"	2 235
Iztapalapa, D.F.	19° 21' 30"	2 247
La Magdalena Contreras, D.F.	19° 20' 00"	2 350
Álvaro Obregón, D.F.	19° 24' 00"	2 320
Tláhuac, D.F.	19° 18' 15"	2 250
Tlalpan, D.F.	19° 18' 30"	2 410
Xochimilco, D.F.	19° 16' 30"	2 260
Benito Juárez, D.F.	19° 22' 15"	2 242
Cuauhtémoc, D.F.	19° 26' 35"	2 230
Miguel Hidalgo, D.F.	19° 24' 24"	2 265
Venustiano Carranza, D.F.	19° 25' 00"	2 265
Victoria de Durango, Dgo.	24° 01' 28"	1 880
Gómez Palacio, Dgo.	25° 33' 40"	1 150
Ciudad Lerdo, Dgo.	25° 32' 10"	1 140
Acámbaro, Gto.	20° 01' 53"	1 860
San Miguel de Allende, Gto.	20° 54' 51"	1 910
Celaya, Gto.	20° 31' 40"	1 750
Cortazar, Gto.	20° 28' 54"	1 730
Guanajuato, Gto.	21° 01' 00"	2 000
Irapuato, Gto.	20° 40' 23"	1 730
León de los Aldama, Gto.	21° 07' 07"	1 800
Salamanca, Gto.	20° 34' 09"	1 720
San Francisco del Rincón, Gto.	21° 01' 02"	1 750
Silao, Gto.	20° 56' 33"	1 780
Valle de Santiago, Gto.	20° 23' 30"	1 720
Acapulco de Juárez, Gro.	16° 52' 16"	30
Chilpancingo de los Bravo, Gro.	17° 33' 05"	1 250
Iguala de la Independencia, Gro.	18° 20' 37"	710



Latitud & altitud (Cont.)

Ciudad, Estado

Latitud (°, ', ") Altitud (m)

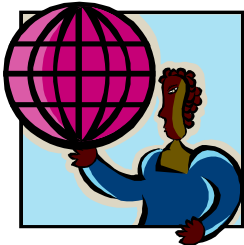
Cd. Guzmán
Jalisco, México
Latitud:
19° 42' 10"
Altitud:
1 520 m

Zihuatanejo, Gro.	17° 38' 40"	20
Pachuca de Soto, Hgo.	20° 07' 21"	2 400
Tulancingo, Hgo.	20° 04' 53"	2 160
Ciudad Guzmán, Jal.	19° 42' 10"	1 520
Guadalajara, Jal.	20° 40' 35"	1 550
Lagos de Moreno, Jal.	20° 21' 21"	1 990
Ocotlán, Jal.	20° 21' 03"	1 530
Puerto Vallarta, Jal.	20° 36' 48"	10
Tepatitlán de Morelos, Jal.	20° 49' 00"	1 800
Tlaquepaque, Jal.	20° 38' 18"	1 540
Tonalá, Jal.	20° 37' 25"	1 660
Zapopan, Jal.	20° 43' 13"	1 560
Ciudad López Mateos, Méx.	19° 33' 40"	2 280
San Francisco Coacalco, Méx.	19° 38' 00"	2 440
Chalco de Díaz Covarrubias, Méx.	19° 15' 53"	2 240
Chicoloapan de Juárez, Méx.	19° 24' 55"	2 250
Chimalhuacán, Méx.	19° 26' 15"	2 400
Ecatepec de Morelos, Méx.	19° 36' 35"	2 250
Ixtapaluca, Méx.	19° 19' 07"	2 260
Metepec, Méx.	19° 15' 04"	2 620
Naucalpan de Juárez, Méx.	19° 28' 31"	2 400
Ciudad Nezahualcóyotl, Méx.	19° 24' 00"	2 440
Ciudad Nicolás Romero, Méx.	19° 37' 30"	2 400
Los Reyes Acaquilpan, Méx.	19° 21' 38"	2 330
Ojo de Agua, Méx.	19° 40' 49"	2 350
Texcoco de Mora, Méx.	19° 30' 20"	2 250
Tlalnepantla, Méx.	19° 32' 12"	2 250
Toluca de Lerdo, Méx.	19° 14' 53"	2 680
Buenavista, Méx.	19° 36' 30"	2 300
San Pablo de las Salinas, Méx.	19° 39' 56"	2 250
Cuautitlán Izcalli, Méx.	19° 38' 46"	2 260
Xico, Méx.	19° 17' 30"	2 220
Apatzingán de la Constitución, Mich.	19° 05' 17"	320
Ciudad Hidalgo, Mich.	19° 41' 28"	2 060
Ciudad Lázaro Cárdenas, Mich.	17° 57' 21"	10
Morelia, Mich.	19° 42' 06"	1 920
La Piedad de Cabadas, Mich.	20° 20' 19"	1 640
Sahuayo de Morelos, Mich.	20° 03' 25"	1 540
Uruapan, Mich.	19° 25' 34"	1 620
Zamora de Hidalgo, Mich.	19° 59' 06"	1 580
Heroica Zitácuaro, Mich.	19° 26' 15"	1 940
Cuautla, Mor.	18° 48' 42"	1 300
Cuernavaca, Mor.	18° 55' 07"	1 510
Jiutepec, Mor.	18° 52' 54"	1 350
Temixco, Mor.	18° 51' 16"	1 290
Tepic, Nay.	21° 30' 58"	915



Latitud & altitud (Cont.)

Ciudad, Estado	Latitud (°, ', ")	Altitud (m)
Ciudad Apodaca, N.L.	25° 46' 53"	430
San Pedro Garza García, N.L.	25° 39' 50"	640
Ciudad General Escobedo, N.L.	25° 48' 30"	510
Guadalupe, N.L.	25° 40' 44"	480
Monterrey, N.L.	25° 40' 16"	530
San Nicolás de los Garza, N.L.	25° 44' 29"	500
Ciudad Santa Catarina, N.L.	25° 40' 31"	680
Juchitán de Zaragoza, Oax.	16° 26' 00"	30
Oaxaca de Juárez, Oax.	17° 04' 04"	1 555
Salina Cruz, Oax.	16° 10' 57"	22
San Juan Bautista Tuxtepec, Oax.	18° 05' 10"	20
Atlixco, Pue.	18° 54' 25"	1 840
Heroica Puebla de Zaragoza, Pue.	19° 02' 36"	2 135
San Martín Texmelucan de Labastida, Pue.	19° 17' 00"	2 360
Cholula de Rivadibia, Pue.	19° 03' 41"	2 220
Tehuacán, Pue.	18° 27' 40"	1 620
Teziutlán, Pue.	19° 48' 56"	1 920
Santiago de Querétaro, Qro.	20° 35' 15"	1 820
San Juan del Río, Qro.	20° 23' 16"	1 920
Chetumal, Q. Roo	18° 30' 13"	10
Cancún, Q. Roo	21° 09' 40"	8
Ciudad Valles, S.L.P.	21° 58' 55"	70
Matehuala, S.L.P.	23° 38' 44"	1 570
San Luis Potosí, S.L.P.	22° 09' 04"	1 860
Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.	22° 11' 13"	1 850
Los Mochis, Sin.	25° 47' 36"	10
Culiacán Rosales, Sin.	24° 47' 57"	60
Guasave, Sin.	25° 34' 28"	50
Mazatlán, Sin.	23° 14' 10"	10
Guamúchil, Sin.	25° 27' 50"	50
Agua Prieta, Son.	31° 19' 33"	1 210
Ciudad Obregón, Son.	27° 29' 21"	40
Heroica Guaymas, Son.	27° 55' 06"	10
Hermosillo, Son.	29° 05' 56"	210
Navojoa, Son.	27° 04' 51"	50
Heroica Nogales, Son.	31° 19' 07"	1 200
San Luis Río Colorado, Son.	32° 28' 36"	40
Cárdenas, Tab.	18° 00' 00"	10
Villahermosa, Tab.	17° 59' 26"	20
Miramar, Tamps.	22° 20' 15"	10
Ciudad Madero, Tamps.	22° 16' 35"	10
Ciudad Mante, Tamps.	22° 44' 33"	80
Heroica Matamoros, Tamps.	25° 52' 08"	10
Nuevo Laredo, Tamps.	27° 29' 03"	150
Reynosa, Tamps.	26° 05' 32"	40
Ciudad Río Bravo, Tamps.	25° 58' 52"	20



Latitud & altitud (Cont.)

Ciudad, Estado	Latitud (°, ', ")	Altitud (m)
Tampico, Tamps.	22° 15' 19"	10
Ciudad Victoria, Tamps.	23° 44' 10"	320
Apizaco, Tlax.	19° 24' 49"	2 400
Tlaxcala de Xicohténcatl, Tlax.	19° 19' 00"	2 240
Coatzacoalcos, Ver.	18° 08' 16"	50
Córdoba, Ver.	18° 53' 09"	850
Xalapa Enríquez, Ver.	19° 32' 24"	1 460
Minatitlán, Ver.	17° 59' 20"	20
Orizaba, Ver.	18° 50' 59"	1 230
Poza Rica de Hidalgo, Ver.	20° 32' 06"	50
San Andrés Tuxtla, Ver.	18° 26' 59"	300
Tuxpam de Rodríguez Cano, Ver.	20° 57' 32"	10
Veracruz, Ver.	19° 10' 27"	10
Mérida, Yuc.	20° 58' 04"	9
Fresnillo, Zac.	23° 10' 37"	2 185
Guadalupe, Zac.	22° 44' 46"	2 275
Zacatecas, Zac.	22° 46' 18"	2 440

Referencias

- Aranda, V. (1999). Curso: metrología de presión. MetAs, Metrólogos Asociados - México.
- INEGI. (2002). Distribución de localidades, según su altitud sobre el nivel del mar. INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. www.inegi.gob.mx/territorio/espanol/datosgeogra/rep_mex/rep_mex02.pdf.
- Mena, M. (2002). Estudios gravimétricos regionales. Instituto de Geofísica de la UNAM, Departamento de Vulcanología. www.igeofcu.unam.mx
- Moritz, H. (1988). Geodetic reference system 1980. Geodesist handbook, bulletin Geodesique, Vol. 62, N° 3, 1988. www.gfy.ku.dk/~iag/HB2000/part4/grs80_corr.htm.
- Nava, H. Pezet, F. Mendoza, J. & Hernández, I. (1997). El Sistema Internacional de unidades (SI). CNM-MMM-PT-003. CENAM, Centro Nacional de Metrología.
- NGS, NOAA & INEGI. (1997). MEXICO97. NGS, National Geodetic Survey. www.ngs.noaa.gov/GEOID/MEXICO97.
- Petley, B. (1992). The role of the fundamental constants of physics in metrology. Metrologia 1992, Vol. 29, p 92-112.
- Reader's Digest. (1981). Gran diccionario enciclopédico ilustrado. Tomo I & V. p 24, 1 573, 1 695. México, D.F.
- Thulin, A. (1992). A "standardized" gravity formula. Bulletin OIML - N° 127 - Juin 1992. BML.