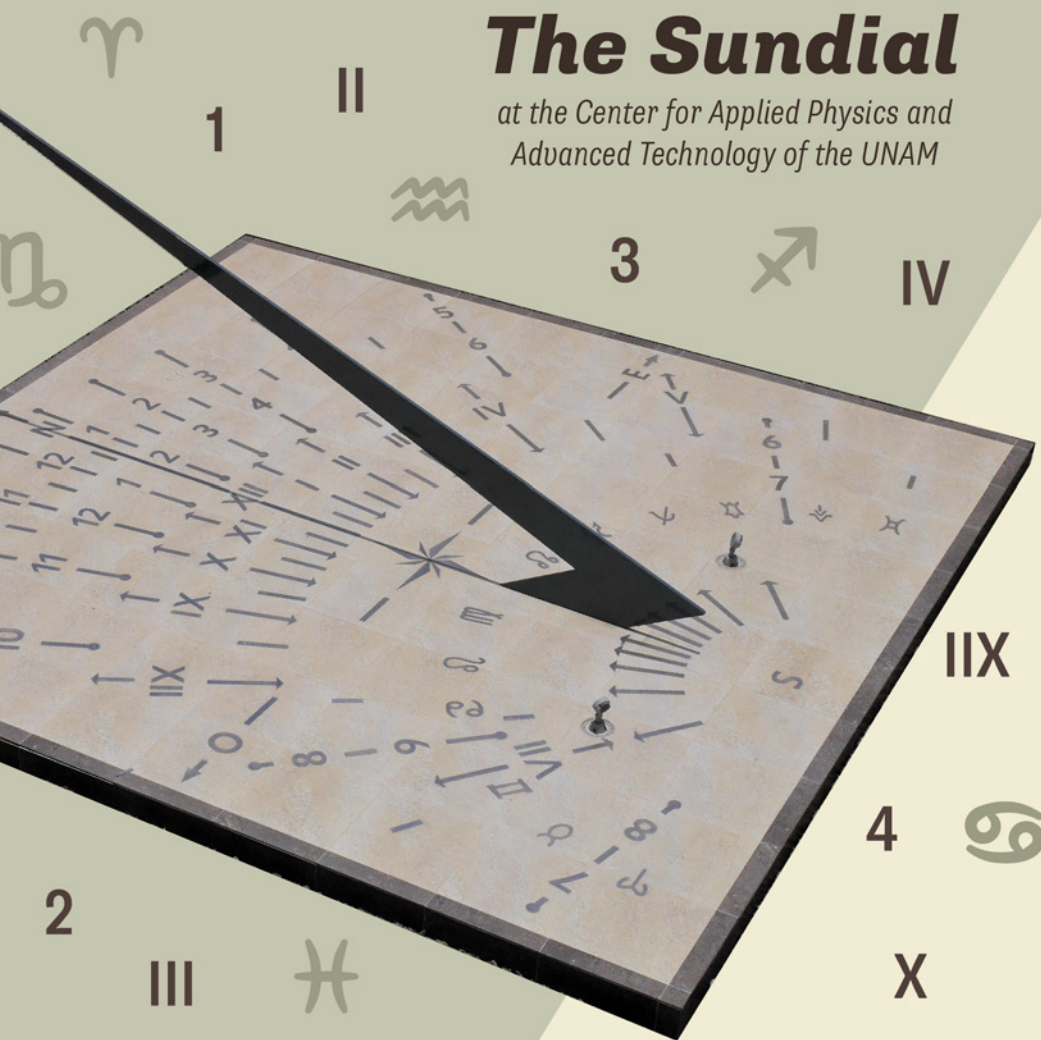


El Reloj Solar

del Centro de Física Aplicada y Tecnología
Avanzada de la UNAM

The Sundial

at the Center for Applied Physics and
Advanced Technology of the UNAM



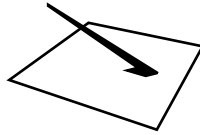
UNAM



C F A T A

Achim M. Loske

El Reloj Solar
del
Centro de Física Aplicada
y Tecnología Avanzada
de la UNAM



El Reloj Solar
del
Centro de Física Aplicada
y Tecnología Avanzada
de la UNAM

/ Achim M. Loske

**El Reloj Solar del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM /
The Sundial at the Center for Applied Physics and Advanced Technology of the UNAM**

por / by: Achim M. Loske

Primera Edición: Agosto 2022 / First Edition: August 2022

© 2022, Achim M. Loske

© 2022, Universidad Nacional Autónoma de México

Diseñado por / Designed by: Daniela Balderrama

Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, distributed or transmitted in any form or by any means, including photocopying, recording, or other electronic or mechanical methods, without the prior written permission of the publisher, except in the case of brief quotations embodied in critical reviews and certain other noncommercial uses permitted by copyright law.

Impreso en México / Printed in Mexico

ISBN 978-607-30-6183-4



C F A T A



UNAM

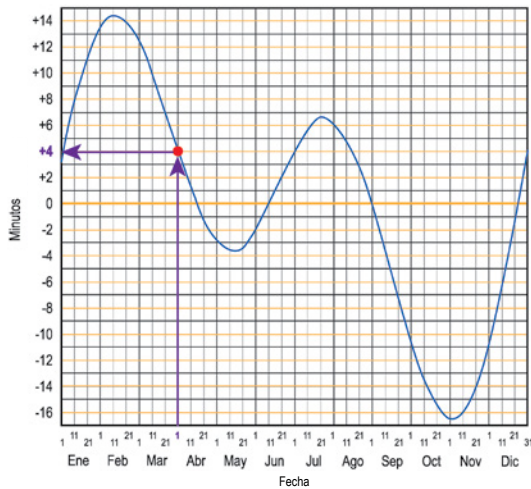
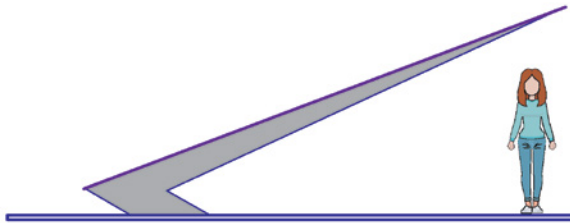
*El autor desea agradecer a la **Dra. Julieta Fierro** por su interés en escribir el prólogo de este libro. Además, agradece a la **Dra. Martha A. Villegas**, al **Dr. Miguel de Icaza**, al **MC Francisco Fernández**, al **Dr. Roberto Machorro** y al **Ing. José C. Montes**, por la minuciosa revisión del texto. Sus sugerencias fueron muy valiosas. Todos los dibujos fueron hechos por la **LDC Gabriela Trucco**. La contribución profesional del **LDI Ismael Ortiz** en la construcción del reloj solar, así como el apoyo del **Dr. Harald Böhnel** en la orientación del gnomon fueron cruciales. El autor también desea destacar el impecable trabajo de edición de este libro por parte de la **LDC Daniela Balderrama**. La construcción del reloj solar fue financiada por el CFATA y la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM.*

/ Guía rápida

Para obtener la hora oficial durante el horario de invierno, observe la sombra del **borde superior** del indicador sobre los números arábigos en la escala que está más cercana al norte (N) y sume o reste la cantidad de minutos que, de acuerdo con la fecha, aparece en la gráfica. Para el horario de verano use la segunda escala con números arábigos.

Ejemplo: el 1º de abril debe sumar 4 minutos para obtener la hora que marcan nuestros relojes mecánicos o electrónicos.

Los números romanos marcan la hora solar. Cuando la sombra del indicador coincide con el XII, es el mediodía solar.



/ Índice

Prólogo	9
Prefacio	11
I. Introducción	13
II. Definiciones y conceptos básicos	18
II.1 La hora sideral, la hora solar y la hora solar media	18
II.2 Los husos horarios y el tiempo medio de Greenwich	21
II.3 La hora oficial	24
II.4 La hora de verano	24
III. ¿Cómo funciona un reloj solar?	25
IV. ¿Cómo obtener la hora?	27
V. Curiosidades del reloj solar del CFATA	30
VI. Comentarios finales	33
VII. Abreviaturas y glosario de términos	34
VIII. Referencias	40

/ **Prólogo**

El libro que acabas de abordar es sobre la cuenta del tiempo.

El tiempo no es sencillo de definir; lo que sabemos hacer con precisión es medirlo. Si imaginamos los átomos en un gas que estén dentro de un contenedor donde la presión y la temperatura no cambian, para las partículas el tiempo les es indistinto; el pasado, presente y futuro son semejantes. Para nosotros, seres macroscópicos, el tiempo se puede notar con el aumento del desorden. Pensemos en una casa recién arreglada y lo que sucede al cabo de varias horas cuando todo comienza a desordenarse, por ejemplo, la cantidad de trastes sucios en la cocina. Para el universo el tiempo también se mide por el aumento del desorden, por ejemplo, la radiación. Las estrellas generan rayos gamma, los de mayor energía; éstos se van degradando conforme avanzan hasta el exterior, dónde los emiten como radiación menos energética como ultravioleta o luz visible. El Sol radia energía que absorben las plantas para transformarla en azúcar; cuando la consumimos nosotros irradiamos energía infrarroja, la degradamos. Así la energía del universo se va degradando conforme pasa el tiempo; es una manera de medirlo.

A diferencia de la ciencia, la medida del tiempo de la vida diaria se mide con fenómenos repetitivos, como los relojes que marcan el paso de los segundos, minutos y horas. Todas las grandes culturas emplearon sucesos astronómicos que se repiten para crear sus calendarios: el paso del día y la noche, las fases de la Luna, el año, la sucesión de las estaciones, la época de lluvias y de secas.

Varias culturas de la humanidad notaron cómo la posición del Sol a lo largo del día y de las estaciones producía sombras cambiantes en diversas estructuras. Las más conocidas son los gnómones, construidos específicamente para generar sombras bien definidas, observadas sobre superficies con marcas de las horas en distintas estaciones del año.

Pues precisamente Achim Loske se ha dedicado a la cuenta del tiempo empleando juegos de luz y sombra que proyecta el Sol durante un día determinado y sus cambios durante el año. Los egipcios de la antigüedad construyeron relojes observando las sombras de objetos como los obeliscos. En Mesoamérica hay juegos de luz como el día del paso cenital, cuando la luz alumbra el fondo de una oquedad, y juegos de luz y sombra durante los equinoccios. El Dr. Loske va un paso más allá; crea obras de arte conjuntando proyecciones de luz y sombra con sus instrumentos.

Este libro presenta y describe un reloj solar que Achim M. Loske construyó para el Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM. La intención es invitar al público interesado a visitar el reloj y a comprender cómo funciona este modelo en particular. Dado que está ubicado en un lugar público, cualquier persona lo puede visitar. El libro es una guía para comprender cómo se usa el Sol para medir el tiempo en un sitio particular. Como sucede con cualquier texto especializado uno debe abordar esta obra con paciencia, buscando información sobre algún tema que nos resulte novedoso para apreciar como es debido el reloj de Sol del CFATA.

El texto de Loske describe cómo se usó el Sol desde la antigüedad para medir el tiempo. A partir de la introducción nos invita a visitar museos dónde se muestran distintos tipos de relojes para comprender mejor su variedad y deleitarnos con su belleza y cómo un reloj de Sol emplea la variación de la sombra que proyecta un objeto a lo largo del día. Nos aclara que no siempre es igual; debido a la inclinación del eje de rotación de la Tierra la variación de la sombra cambia con la época del año, así que un buen reloj de Sol debe de tomar en cuenta esta particularidad. La sombra que proyecta el objeto se modifica con la latitud y, como si fuera poco, el tiempo civil, es decir el que usamos para nuestras actividades cotidianas no coincide con un reloj solar sencillo. Así que construir un reloj como los que idea nuestro autor resulta ser una obra maestra, por lo que vale la pena adentrarse en este texto.

Julieta Fierro Gossman

Instituto de Astronomía, UNAM
Ciudad de México, agosto de 2021

/ Prefacio

Este pequeño libro se concibió como apoyo para que los visitantes con escasos conocimientos en astronomía o geometría solar comprendan los conceptos básicos del funcionamiento del reloj solar del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada (CFATA) de la UNAM. Además, puede ser útil en clases de ciencias desde secundaria hasta universidad, con la finalidad de entusiasmar a profesores y alumnos a profundizar en ciertos temas de astronomía e incluso de arquitectura solar. Para quienes deseen hacer una visita al reloj solar, el espacio está abierto a todo el público.

Hay conceptos que no se tratan con todo el rigor científico, debido a que el objetivo del texto es la divulgación y no una descripción formal de los fenómenos involucrados en el funcionamiento del reloj. Algunos términos técnicos aparecen descritos en el capítulo VII y se resaltaron con letra negrita la primera vez que se mencionan en el texto.

Espero que esta guía aclare las dudas que pudieran surgir al visitar el reloj solar del CFATA y que fomente el interés en la infinita variedad de relojes solares y su relación con la astronomía, envolviendo al visitante en la fascinación de comprender los movimientos entre la Tierra y el Sol.

Achim M. Loske

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada, UNAM
Querétaro, Qro., julio de 2021

I. Introducción

El movimiento aparente del Sol en el cielo, por ser cíclico, es una referencia de tiempo para la mayoría de los seres vivos. A pesar de que hoy en día los relojes solares ya no rigen la hora en nuestra vida cotidiana, siguen construyéndose como esculturas didácticas, artísticas y científicas, recordándonos que la hora que usamos se definió en base a motivos prácticos e históricos. A diferencia de otros instrumentos astronómicos, como el **astrolabio** y el **sextante**, los relojes solares no han quedado relegados en los museos.



Fig. 1 "Monumento al Tiempo" de aproximadamente 2.5 m de diámetro, instalado en Wennigsen, cerca de Hannover, Alemania. Es una obra que incluye diversos parámetros relativos a la medición del tiempo y al movimiento de la Tierra con respecto al Sol. Diseño y realización: Erich Pollähne. Foto: Siegfried Rasper.

La ciencia del diseño de relojes solares, denominada **gnomónica**, es amplia. Pertenece a la cronometría, un campo de la física relacionado con la determinación y medida del tiempo. En varios países del mundo existen asociaciones de aficionados a los relojes solares, así como académicos que se dedican profesionalmente a su diseño, el cual puede llegar a ser muy complejo (**Fig. 1**). Resulta sorprendente que incluso en Marte se han instalado relojes solares con fines científicos.

Una diferencia fundamental entre un reloj solar y cualquier otro tipo de reloj radica en que con un reloj solar es posible *determinar* la hora. Los relojes mecánicos inicialmente eran poco fiables (Landes 2007), motivo por el cual los relojes solares siguieron usándose hasta fines del siglo XIX para ajustar los relojes mecánicos en edificios gubernamentales e iglesias (**Fig. 2**).

La historia de los relojes solares y la medición del tiempo son temas interesantes y extensos, estrechamente ligados a las religiones, el arte, la agricultura, el comercio y la navegación de muchas culturas (Hose & McDougall 1912; Loske 1979; Dohrn-van Rossum 1996; Rohr 1996; Severino 1997; Jespersen & Fitz-Randolph 1999; Scott 1999; Schechner 2001; Landes 2007; Schechner 2014).

Se sabe que uno de los primeros métodos para comparar intervalos de tiempo pudo haber sido la medición de la longitud de la sombra de una varilla enterrada verticalmente en la tierra. Estos relojes rudimentarios serían los antecesores de los obeliscos monumentales construidos muchos siglos después. Existen evidencias de obeliscos en Egipto que datan de 3500 años a. C., así como de relojes solares chinos desde casi 2700 años a. C. Además, sorprende saber que alrededor de 1500 a. C. los egipcios ya usaban relojes solares portátiles (Jespersen & Fitz-Randolph 1999). En el cenotafio de Seti I en Abidos, una antigua e importante ciudad en Egipto, se relata el uso de un reloj solar por el año 1300 a. C. Hallazgos de calendarios y relojes solares monumentales, construidos entre 2000 y 1500 años a. C. en Asia y en el Mediterráneo, demuestran conocimientos astronómicos sorprendentes. Otras civilizaciones como la babilonia, griega y maya también medían intervalos de tiempo en base a la posición del Sol en el cielo.



Fig. 2 Torre del siglo XVI, en el edificio de la sede del parlamento en Linz, Austria. Puede apreciarse el casco barroco y en el cuerpo de la torre un reloj mecánico y un reloj solar que se repiten en cada una de sus fachadas. Los relojes solares con técnica de esgrafiado, fueron diseñados por Fritz Fröhlich, un pintor austriaco contemporáneo. Foto: Siegfried Rasper.

Alrededor del año 140 d. C., el astrónomo greco-egipcio Claudio Ptolomeo describió varios relojes solares antiguos, comparándolos con sus diseños propios. En la historia de la gnomónica, un personaje famoso es el astrónomo y matemático Christophorus Clavius, quien en 1602 publicó una obra extensa y compleja, en la que se describen varios métodos para construir relojes solares de diferentes tipos. En la historia de los relojes solares es común hacer referencia a los monumentos astronómicos sorprendentes del observatorio de Jaipur, India, construidos en 1728.

En 1923, Hugo Michnik descubrió el **reloj solar bifilar**. En esa época también se desarrolló el **heliocronómetro**, un tipo de reloj solar muy preciso, empleado para regular los relojes en las estaciones de ferrocarril.

Joseph Drecker fue uno de los primeros científicos en publicar los fundamentos matemáticos de la gnomónica de manera formal, quien además estudió a fondo la astronomía de la cultura egipcia. En los últimos capítulos de uno de sus libros (Drecker 1925), describe los relojes solares cuyo **gnomon** o indicador es paralelo al eje de rotación de la Tierra. Descartando los **relojes solares analemáticos (Fig. 3)**, este es el caso en la mayoría de los relojes construidos a partir del siglo XIV, a los cuales se les llama “modernos”. Otro libro clásico, que incluye un tratado histórico notable, fue publicado por Ernst Zinner (1956).



Fig. 3 Reloj solar analemático instalado en Nienhagen, Alemania. Los visitantes hacen la función del **gnomon**, parándose sobre la carátula en el sitio adecuado según la fecha, de manera que su sombra es la que marca la hora. Diseño: Siegfried Rasper.

Quien esté interesado en la historia de los instrumentos astronómicos y los relojes solares, puede encontrar información y colecciones de relojes solares sorprendentes en el *Adler Planetarium and Astronomy Museum* en Chicago (<https://adler-ais.axiellhosting.com>), en la *Harvard Collection of Historical Scientific Instruments*, en Cambridge, Massachusetts (<https://chsi.harvard.edu>), en el *History of Science Museum* de la Universidad de Oxford (<https://www.hsm.ox.ac.uk/collections>), así como en el *Mathematisch Physikalischer Salon* en Dresde, Alemania (<https://mathematisch-physikalischer-salon.skd.museum/en>). Bien vale la pena una visita, aunque sea virtual, a estos museos.

Los relojes solares se dividen en varios grupos, según la orientación, inclinación y forma de la carátula. Algunos ejemplos son los relojes horizontales (**Fig. 4**), los verticales (**Fig. 5**), los analemáticos (**Fig. 3**) y los **relojes solares ecuatoriales (Fig. 6)**. Su diseño puede variar dependiendo del sitio y de la época en la que se construyeron, mostrando diferentes tipos de hora como, por ejemplo, la **hora solar**, la **hora solar media**, la **hora local**, o las **horas babilónicas** (Soler Gayá 1989; Loske 1999; Miranda & Pereira 2018). Además de las horas, los relojes de Sol pueden mostrar información muy diversa como, por ejemplo, la salida y puesta del Sol, la fecha según diferentes tipos de calendarios, la **altura de Sol** y la duración del día.



Fig. 4 Reloj solar horizontal que indica la **hora solar** del sitio de colocación (números romanos), así como la hora solar del **meridiano** (90° O) que rige la hora en la Ciudad de México. Pueden distinguirse un **analema** alrededor de la marca del **mediodía solar**, los **signos del zodiaco** en la periferia, así como una brújula en el extremo norte de la carátula. Diseño: Lothar M. Loske.



Fig. 5 Reloj solar vertical declinante con un gnomon de 3.3 metros, instalado en el Centro de Nanociencias y Nanotecnología de la UNAM en Ensenada, BC. La pared donde se trazó el reloj no está orientada exactamente hacia el sur, sino que declina más de 8 grados al este, razón por la que las líneas de las horas no son simétricas. Diseño: Roberto Machorro.



Fig. 6 Reloj solar ecuatorial de 3.4 metros de diámetro, instalado en Frankfurt, Alemania en 1951 (Loske 1999). Sus carátulas marcan la **hora solar** de Frankfurt y la hora solar del **meridiano 15° E**, que rige la **hora legal** en Alemania. También es posible determinar la fecha, la **hora solar**, la **hora solar media** y la **hora legal** de 200 ciudades alrededor del mundo. Esto mismo puede lograrse para cualquier sitio sobre la Tierra, siempre y cuando se conozcan sus coordenadas geográficas. Diseño: Lothar M. Loske.

No todo tipo de reloj solar es adecuado para su uso a cualquier **latitud geográfica**. Así, por ejemplo, los relojes solares horizontales no son comunes a latitudes bajas, es decir, cerca del ecuador terrestre. Los relojes solares verticales son los más comunes. En Europa se les puede ver en muchos edificios públicos, iglesias y casas.

Los relojes solares portátiles (**Fig. 7**) se usaron desde mediados del siglo XVI hasta el siglo XIX. Incluso a principios del siglo XX, la mayoría de las personas aún dependían de relojes solares para ajustar la hora de sus relojes de pulso que aparecieron por primera vez a finales del siglo XIX, volviéndose populares durante la Primera Guerra Mundial. Antes de la existencia de relojes mecánicos confiables, en la noche se recurría a relojes de agua, arena, fuego o aceite (Loske 1979; Loske 1992; Dohrn-van Rossum 1996; Jespersen & Fitz-Randolph 1999; Landes 2007).



Fig. 7 Reloj solar portátil de latón (diámetro aproximado 10 cm). Puede determinarse la **hora solar** orientando el gnomon con la brújula y ajustando el ángulo de la carátula.

Para quienes estén interesados en ampliar sus conocimientos sobre relojes solares o construir uno, hay varios libros que explican los conceptos a diferentes niveles (Bertrán de Quintana 1937; Loske 1970; Waugh 1973; Soler Gayá 1989; Rohr 1996; Soler Gayá 1997; Mayall & Mayall 2000; King 2007; Miranda 2015; Miranda & Pereira 2018). Actualmente, también puede recurrirse a *software* muy completo, con el cual es posible diseñar carátulas de relojes solares de varios tipos (Blateyron 2015).

II. Definiciones y conceptos básicos

En este capítulo se tratan, de manera simplificada, algunos conceptos relacionados con el reloj solar del CFATA.

II.1 La hora sideral, la hora solar y la hora solar media

Por definición, un **día sideral** o **día sidéreo** es el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta completa en torno a su eje de rotación, es decir, el tiempo que tarda en girar 360° . Para determinarlo, puede tomarse como referencia una estrella muy lejana. En la **Figura 8** un día sideral equivale al tiempo que requiere la Tierra en pasar de la posición **1** a la **2**. Debido a que la estrella mostrada (**3**) se encuentra a una distancia enorme, las líneas azules pueden considerarse prácticamente paralelas. El día sideral dura 3 minutos 56 segundos menos que el **día solar medio**. Cabe mencionar que las variaciones de los días siderales son sumamente pequeñas y detectables únicamente con relojes muy sofisticados, como los atómicos.

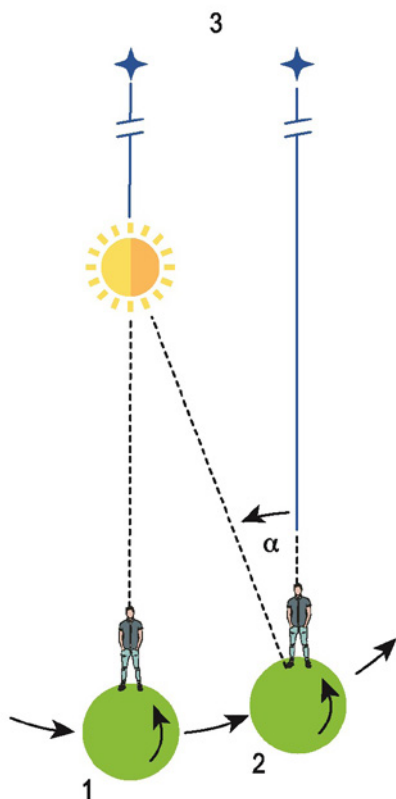


Fig. 8 Esquema para mostrar que el **día solar** es unos minutos más largo que el **día sideral**. Debido a que la Tierra se mueve en torno al Sol, después de rotar 360° sobre su propio eje (pasando del punto **1** al **2**), aún debe girar un ángulo α , para que el Sol se encuentre nuevamente sobre la cabeza del observador. Como referencia se selecciona una estrella muy lejana (**3**).

La hora solar, también llamada **hora solar verdadera**, se basa en el **día solar** o **día solar verdadero**, definido como el tiempo que transcurre entre una culminación del Sol y la siguiente, o bien, como el tiempo que tarda el Sol en pasar dos veces seguidas por una posición específica. Es unos minutos más largo que el día sidéreo. Esto se debe a que la Tierra, además de girar en torno a su propio eje, se traslada en torno al Sol, como puede observarse en la **Figura 8**. Debido a ello, para que el Sol se encuentre nuevamente sobre la cabeza del observador, la Tierra debe girar un ángulo (α) adicional. El movimiento de la Tierra en torno al Sol es complejo. Por un lado, no sigue una circunferencia, sino una trayectoria elíptica. Por el otro, su eje de rotación está inclinado aproximadamente 23.5° con respecto al plano que contiene la órbita alrededor del Sol, teniendo movimientos de **precesión** y **nutación** como los que se observan en los trompos.

Una consecuencia de que la Tierra gire en torno al Sol sobre una trayectoria elíptica con una velocidad variable (**Fig. 9**) es que la duración del día solar no es constante. Eso significa que, por ejemplo, el 21 de febrero el tiempo que transcurre entre las 9 y las 10 de la mañana no es el mismo que el tiempo (medidos con un reloj mecánico o electrónico) que transcurre entre las 9 y las 10 de la mañana del 18 de noviembre. Para conocer su duración, cada intervalo de tiempo debería relacionarse con su fecha. Esto no es práctico en la vida cotidiana, motivo por el cual se definió el día solar medio como la duración entre dos culminaciones consecutivas del Sol, suponiendo que la Tierra se moviera a velocidad constante alrededor del Sol siguiendo una trayectoria circular, en lugar de elíptica (**Fig. 10**).

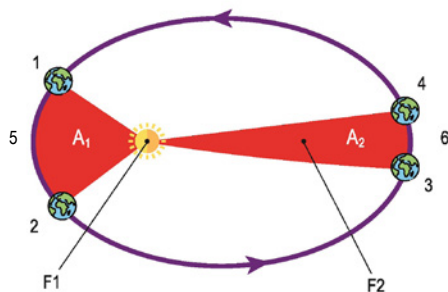


Fig. 9 Esquema del movimiento de traslación de la Tierra en torno al Sol. De acuerdo con la segunda ley de Kepler, si el tiempo que requiere la Tierra en moverse del punto 1 al punto 2 es el mismo que requiere para pasar del punto 3 al 4, entonces las áreas A_1 y A_2 son iguales. La velocidad de traslación de la Tierra es mayor en el **perihelio** (5) que en el **afelio** (6). Por claridad, la elipse se dibujó con una **excentricidad** mucho mayor que la real. F_1 y F_2 son los focos de la elipse.

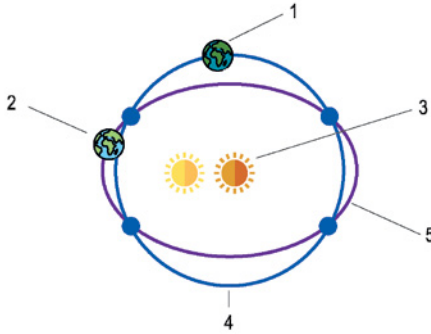


Fig. 10 Para definir la **hora solar media**, cuya duración no cambia dependiendo de la fecha, se supone una Tierra imaginaria (1) que, a diferencia de la real (2), no tiene movimiento de **precesión** y gira a velocidad constante en torno a un Sol imaginario (3) sobre una circunferencia (4), en lugar de hacerlo con velocidad variable siguiendo una trayectoria elíptica (5). La **excentricidad** de la elipse mostrada en este esquema no coincide con la real, que es muy pequeña (aproximadamente 0.0167).

La diferencia entre la hora solar y la hora solar media, denominada **ecuación del tiempo** es variable, es decir, depende de la fecha. Como puede observarse en la **Figura 11**, dicha diferencia puede llegar a ser de más de 16 minutos. En cuatro días al año (puntos rojos) esta diferencia es prácticamente nula.

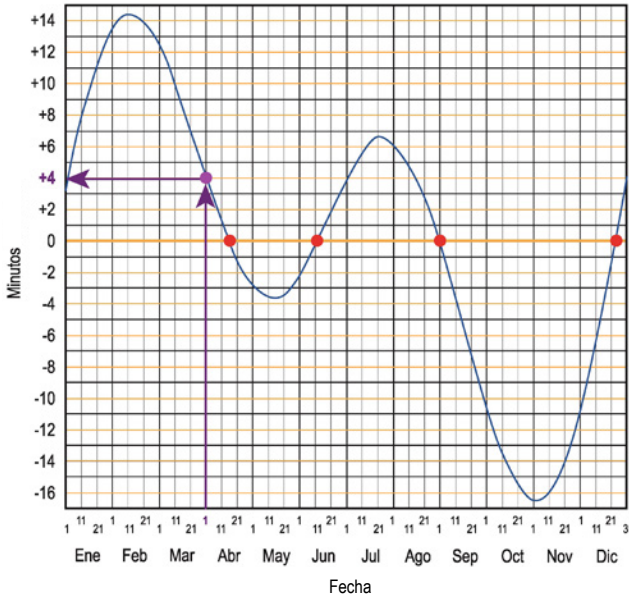


Fig. 11 Gráfica de la **ecuación del tiempo**, que muestra la cantidad de minutos que, dependiendo de la fecha, se deben sumar o restar a la hora de invierno o de verano que indique el reloj solar (escalas con números arábigos) para obtener la **hora oficial**, que es la que marcan nuestros relojes de uso común.

II.2 Los husos horarios y el tiempo medio de Greenwich

Para conocer la **hora oficial** en cierto sitio es importante recordar que, por razones prácticas, el mundo se dividió imaginariamente en 24 **husos horarios**, es decir, 24 regiones dentro de las cuales se supone que la hora no cambia. Se trazó un **meridiano** cada 15° hacia el este y el oeste del denominado **meridiano cero** o **meridiano de Greenwich** (**Fig. 12**), que pasa por el Observatorio Real de Greenwich, cerca de Londres (<https://www.rmg.co.uk/royal-observatory>). Este observatorio, fundado en 1675, es otro museo digno de visitarse (**Fig. 13**).

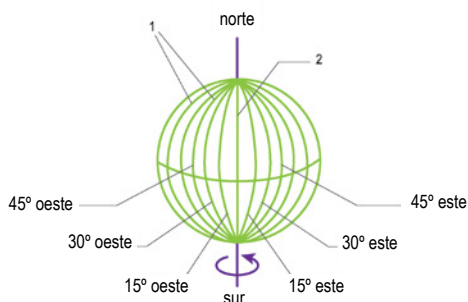


Fig. 12 Esquema que muestra la distribución de los **meridianos (1)** hacia el este y el oeste del **meridiano de Greenwich (2)**.



Fig. 13 Fotografía de uno de los edificios del antiguo Observatorio Real de Greenwich, mostrando una cinta metálica (flecha) que supuestamente coincide con el **meridiano cero**. Cabe mencionar que cuando no había mediciones suficientemente exactas se eligió ubicar la línea del meridiano cero aquí, sin embargo, el verdadero meridiano cero pasa a 102 metros del observatorio.

Entre una zona horaria y la inmediata existe una diferencia de una hora. Al viajar de un huso horario a otro en dirección este (oeste), hay que sumar (restar) una hora. La necesidad de dicha convención, establecida en la Conferencia Internacional del Meridiano, celebrada en 1884 en Washington D.C., surgió con el desarrollo de los medios de transporte. Al poder recorrer distancias más grandes en tiempos cada vez más cortos, resultó ser confuso que dos ciudades alejadas sólo algunas decenas de kilómetros tuvieran horas diferentes.

Independientemente de que viajemos hacia el este o el oeste, tarde o temprano llegaremos al meridiano 180° , denominado **línea internacional de cambio de fecha**. Al cruzar este meridiano se debe cambiar la fecha un día. Por conveniencia, en varias regiones las delimitaciones de los husos horarios siguen las fronteras políticas. La **Figura 14** muestra el caso para la República Mexicana.



Fig. 14 Husos horarios en México. Sus denominaciones oficiales son: tiempo del sureste (UTC-5), tiempo del centro (UTC-6), tiempo del Pacífico (UTC-7) y tiempo del noroeste (UTC-8). Nótese la distancia entre el **meridiano** que rige la hora en Querétaro (90° oeste) y la ubicación de Querétaro.

El meridiano de Greenwich se usa como referencia para conocer la **longitud geográfica** de un sitio, es decir, la distancia hacia el este u oeste que existe entre una posición determinada y el mencionado meridiano. La segunda coordenada, requerida para fijar cierta posición sobre la Tierra, es la latitud geográfica, que especifica el ángulo, hacia el sur o hacia el norte, a partir del ecuador terrestre, cuya latitud se definió igual a 0° (**Fig. 15**). Generalmente ambas coordenadas se dan en grados de arco. En el caso del reloj solar del CFATA, la latitud y longitud equivalen a $\phi = 20^\circ 42' 5''$ norte (20.7014° N) y $\lambda = 100^\circ 26' 49''$ oeste (100.447° O), respectivamente.

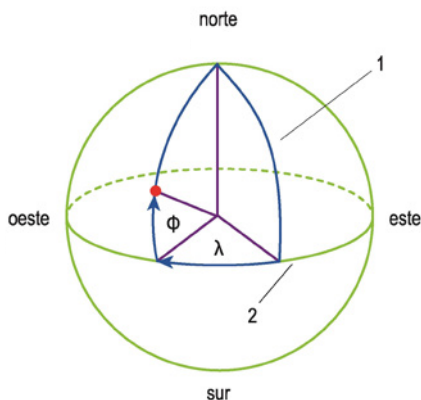


Fig. 15 Esquema que muestra cómo se define la **longitud geográfica** (ángulo λ) con respecto al **meridiano de Greenwich** (1) y la **latitud geográfica** (ángulo ϕ) con respecto al **ecuador** (2).

El meridiano que rige la hora en la zona centro de México, y por lo tanto en Querétaro, es el meridiano 90° oeste, de manera que los relojes en Londres están adelantados 6 horas con respecto a los de Querétaro. La hora en esta parte de nuestro país recibe la denominación UTC-6, es decir, deben restarse 6 horas a la hora en Greenwich para obtener la hora en México. El **tiempo universal coordinado (UTC)** es reconocido internacionalmente para definir la hora en cada huso horario. En México está a cargo del Centro Nacional de Metrología (CENAM).

El **tiempo medio de Greenwich (GMT)** originalmente se refería a la hora solar media en Greenwich. Con el desarrollo de los relojes de cuarzo y los relojes atómicos, se detectó que la rotación terrestre no es constante. Aunque las variaciones son sumamente pequeñas, influyen en la navegación y en el funcionamiento de los equipos **GPS**. Debido a ello, en 1972 se adoptó el UTC, que utiliza la definición atómica de la duración de un segundo.

Para compensar la diferencia que surge debido a que la velocidad de rotación de la Tierra no es constante, dos veces al año se suma o se resta un segundo al tiempo marcado (conservado) por los relojes atómicos. De esta manera se obtiene el UTC. Los ajustes se programan para que la diferencia entre el UTC y el GMT nunca exceda 0.9 segundos. Obviamente estos ajustes son irrelevantes al observar la hora en un reloj solar.

11.3 La hora oficial

La hora oficial, también denominada **hora legal** u **hora civil**, es aquella que marcan nuestros relojes, teléfonos celulares y computadoras. Es aceptada por el gobierno de cada país y se basa en un meridiano específico. Como se comentó anteriormente, la hora oficial en Querétaro (UTC-6) corresponde a la hora del meridiano 90° oeste.

Cabe mencionar que la hora local no necesariamente equivale a la hora oficial. La hora local se refiere a la longitud geográfica de un sitio específico, por ejemplo, la de un avión en vuelo sobre el océano.

11.4 La hora de verano

El horario de verano se introdujo en algunos países durante la Primera Guerra Mundial. En México, exceptuando la franja fronteriza con Estados Unidos y los estados de Quintana Roo y Sonora, el horario de verano inicia el primer domingo de abril a las 2:00 **a. m.**, concluyendo el último domingo de octubre a las 2:00 a. m. La hora y el día de la semana para hacer este cambio se eligieron por razones prácticas. Por convención, en la mencionada franja fronteriza el horario de verano da inicio el segundo domingo de marzo a las 2:00 a. m. y termina el primer domingo de noviembre a las 2:00 a. m. Sonora y Quintana Roo no participan en el programa del horario de verano. Durante el horario de verano, en Querétaro la hora se denomina UTC-5.

Al ajustar los relojes al horario de verano, el amanecer y el anochecer ocurren más tarde, permitiendo así un período adicional de luz solar por las tardes. La ventaja principal de esta práctica es un ahorro de energía eléctrica considerable a nivel nacional, debido al aprovechamiento de la luz natural en las tardes. Actualmente, el horario de verano se aplica en gran parte de América del Norte, Europa, algunos países de Oceanía, así como en Cuba, Chile, Paraguay, Haití y Las Bahamas.

III. ¿Cómo funciona un reloj solar?

Un reloj solar se basa en el movimiento aparente del Sol en la **bóveda celeste**. En principio, la proyección de la sombra de cualquier objeto sobre una superficie puede usarse para medir el paso del tiempo. Por experiencia todos sabemos que conforme transcurre el día, las sombras que proyecta el Sol se vuelven más cortas. Al mediodía adquieren su mínima longitud. Pasando este instante, nuevamente se alargan hasta la puesta del Sol. Además, la dirección de las sombras también cambia a lo largo del día, estando siempre del lado opuesto al Sol. Durante el **mediodía solar**, las sombras se alinean en dirección norte – sur. Si la sombra es proyectada por una varilla vertical, uno de sus extremos apuntará hacia el **norte geográfico** y el otro hacia el **sur geográfico**.

Para facilitar el diseño y la lectura, es conveniente que el gnomon y la carátula tengan una forma y orientación determinada. Generalmente el gnomon es un objeto delgado. En la mayoría de los relojes solares grandes, es una varilla o estructura con un borde recto que produce una sombra bien definida. Otros diseños poseen orificios o ranuras que proyectan marcas luminosas dentro de la sombra de un elemento más grande como, por ejemplo, un disco.

Debido a la distancia tan grande entre la Tierra y el Sol, si el gnomon se orienta paralelamente al eje de rotación de la Tierra, puede suponerse que el Sol gira en torno a él, dando una vuelta completa por día. Esto facilita el diseño de la carátula. En la **Figura 16** se muestra que después del mediodía solar, cuando el Sol continúa su movimiento aparente hacia el oeste, la sombra del gnomon avanza hacia el este.

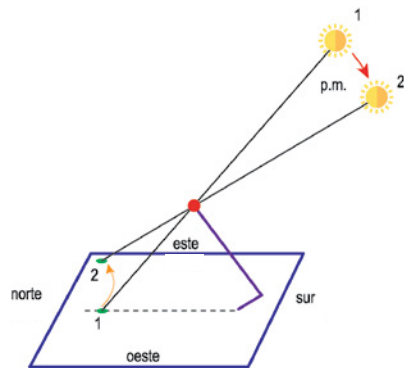


Fig. 16 Sombra de la punta de un gnomon sobre una superficie horizontal durante el desplazamiento aparente del Sol de este a oeste, partiendo desde el **mediodía solar (1)** hasta la tarde (**2**).

Los relojes solares son sumamente precisos, ya que su “órgano regulador” es la rotación de la Tierra en torno a su eje. Son más precisos que muchos relojes de cuarzo; sin embargo, su **resolución** depende del tamaño de la carátula, la nitidez de la sombra, así como del espesor y de la forma del gnomon.

IV. ¿Cómo obtener la hora?

El reloj del CFATA es un reloj solar horizontal de aproximadamente 6 por 6 metros, cuyo gnomon mide cinco metros y medio de largo. Su punta está a 2.23 metros de altura (Fig. 17). Si lo desea, el visitante puede caminar sobre la carátula.

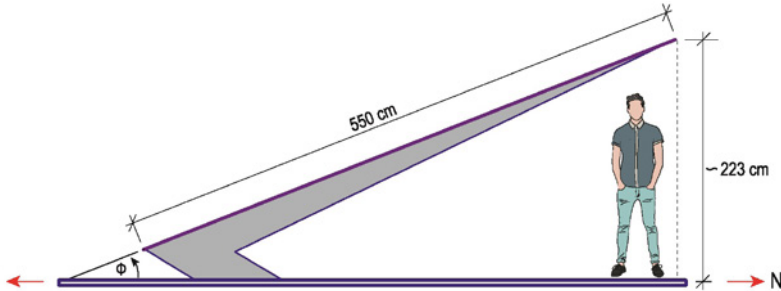


Fig. 17 Esquema del gnomon. El ángulo ϕ corresponde a la **latitud geográfica** del CFATA (aproximadamente 20.7° N). Para determinar la hora, debe observarse la sombra que proyecta el borde superior del gnomon (color morado) sobre la carátula.

La sombra que proyecta el borde superior del gnomon sobre la carátula señala tres tipos de hora (Fig. 18). La escala con números romanos marca la hora solar, de manera que el mediodía solar corresponde al instante en que la sombra del indicador coincide con el **XII**. Conforme transcurre el año, el largo de la sombra del gnomon varía, siendo la más corta en el **solsticio de verano** y la más larga en el **solsticio de invierno**.

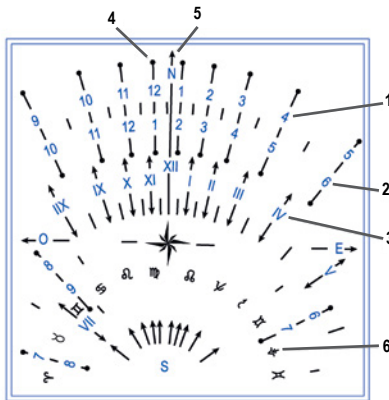


Fig. 18a La escala marcada con el número 1 muestra la **hora solar del meridiano** 90° oeste en horario de invierno. Para el horario de verano debe usarse la escala 2. La escala inferior (números romanos) muestra la hora solar del CFATA (3). Nótese que el **mediodía solar** correspondiente al meridiano 90° oeste (4) está adelantado con respecto al mediodía solar en el CFATA (5). En la sección sur de la carátula aparecen los **signos del zodiaco** (6).



Fig. 18b Fotografía del reloj solar del CFATA. Los detalles de la carátula se describen en la **Fig. 18a**.

La escala con números arábigos en la parte norte de la carátula muestra la hora solar del meridiano que rige la hora en el centro del país durante el horario de invierno. Para el horario de verano debe usarse la escala intermedia.

Como la longitud geográfica del CFATA es de aproximadamente 100° oeste, existe una diferencia significativa entre la hora solar en el meridiano 90° oeste y la hora solar en el sitio de instalación del reloj solar (**Fig. 14**). Si en el meridiano 90° oeste es el mediodía solar, la Tierra aún tiene que girar más de 10° para que sea el mediodía en Juriquilla. Por ello, ambas escalas con números arábigos están desplazadas casi 42 minutos con respecto a la de números romanos (1° de arco equivale a 4 minutos de tiempo).

Como se mencionó anteriormente, alrededor del 15 de abril, el 15 de junio, el 1° de septiembre y el 25 de diciembre, la hora indicada en las escalas con números arábigos coincide con la hora legal (como la marcan nuestros relojes mecánicos y electrónicos). Cualquier otro día debe sumarse o restarse la cantidad de minutos que, de acuerdo con la fecha, aparece en la **Tabla 1**. Dicha diferencia también puede estimarse a partir de la ecuación del tiempo mostrada en la **Figura 11**.

Día	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m/s</i>
1	3/2	13/26	12/25	3/59	-2/53	-2/17	3/43	6/17	0/4	-10/14	-16/22	-11/2
2	3/29	13/36	12/15	3/40	-3/1	-2/8	3/54	6/14	-0/15	-10/34	-16/24	-10/40
3	3/59	13/44	12/2	3/23	-3/7	-1/58	4/6	6/9	-0/34	-10/52	-16/24	-10/16
4	4/28	13/51	11/50	3/6	-3/13	-1/48	4/17	6/4	-0/54	-11/11	-16/24	-9/52
5	4/54	13/57	11/36	2/48	-3/19	-1/38	4/28	5/58	-1/14	-11/29	-16/23	-9/28
6	5/21	14/3	11/23	2/31	-3/24	-1/27	4/37	5/52	-1/34	-11/46	-16/21	-9/3
7	5/48	14/7	11/9	2/14	-3/28	-1/16	4/49	5/45	-1/54	-12/5	-16/18	-8/38
8	6/14	14/11	10/54	1/57	-3/32	-1/5	4/57	5/38	-2/15	-12/22	-16/15	-8/12
9	6/39	14/14	10/38	1/41	-3/35	-0/53	5/6	5/29	-2/36	-12/39	-16/10	-7/45
10	7/4	14/16	10/24	1/24	-3/38	-0/42	5/15	5/21	-2/57	-12/55	-16/5	-7/18
11	7/29	14/17	10/8	1/8	-3/40	-0/30	5/23	5/12	-3/18	-13/11	-15/59	-6/51
12	7/54	14/17	9/52	0/52	-3/41	-0/18	5/31	5/2	-3/39	-13/26	-15/52	-6/23
13	8/17	14/17	9/36	0/37	-3/42	-0/5	5/38	4/51	-4/0	-13/41	-15/48	-5/55
14	8/40	14/16	9/20	0/22	-3/43	0/7	5/45	4/40	-4/21	-13/55	-15/36	-5/27
15	9/2	14/14	9/3	0/7	-3/43	0/20	5/52	4/29	-4/42	-14/9	-15/26	-4/58
16	9/23	14/11	8/46	-0/8	-3/42	0/32	5/58	4/17	-5/4	-14/22	-15/15	-4/29
17	9/44	14/8	8/28	-0/21	-3/41	0/45	6/3	4/4	-5/25	-14/35	-15/4	-4/1
18	10/5	14/4	8/11	-0/36	-3/39	0/58	6/8	3/52	-5/48	-14/47	-14/52	-3/30
19	10/24	13/59	8/53	-0/49	-3/37	1/11	6/12	3/39	-6/8	-14/59	-14/38	-3/1
20	10/42	13/53	7/36	-1/2	-3/34	1/24	6/14	3/24	-6/29	-15/9	-14/25	-2/31
21	10/42	13/48	7/18	-1/15	-3/30	1/37	6/19	3/10	-6/50	-15/19	-14/10	-2/1
22	10/42	13/41	7/0	-1/27	-3/26	1/50	6/22	2/55	-7/12	-15/28	-13/55	-1/31
23	10/42	13/34	6/42	-1/39	-3/21	2/3	6/24	2/40	-7/33	-15/37	-13/39	-1/1
24	11/48	13/26	6/22	-1/50	-3/16	2/16	6/26	2/24	-7/53	-15/45	-13/22	-0/31
25	12/6	13/17	6/5	-2/0	-3/10	2/29	6/27	2/8	-8/14	-15/52	-13/4	-0/1
26	12/19	13/8	5/47	-2/11	-3/4	2/42	6/27	1/51	-8/35	-15/58	-12/45	0/29
27	12/32	12/59	5/29	-2/20	-2/58	2/55	6/27	1/34	-8/55	-16/4	-12/26	0/58
28	12/45	12/48	5/11	-2/29	-2/50	3/7	6/26	1/17	-9/15	-16/9	-12/6	1/28
29	12/57	12/36	4/53	-2/38	-2/44	3/18	6/25	0/59	-9/35	-16/14	-11/45	1/57
30	13/8		4/36	-2/46	-2/35	3/33	6/23	0/41	-9/55	-16/17	-11/24	2/26
31	13/18		4/17	-2/26			6/21	0/23		-16/20		2/55

Tabla I. Valores medios (minutos/segundos) de la ecuación del tiempo para cada día del año.

V. Curiosidades del reloj solar del CFATA

Durante los primeros años después de su construcción, el edificio del CFATA contaba con un espejo de agua en cada uno de sus jardines centrales. Con el paso del tiempo ambos espejos dejaron de cumplir su función. Uno de ellos se aprovechó para construir el reloj solar descrito aquí. El otro se destinará a la carátula de un calendario solar. El reloj solar se construyó para conmemorar el décimo aniversario del Centro.

Un reto del proyecto fue la orientación del gnomon. Debía apuntar exactamente hacia el norte geográfico. Una brújula magnética no era suficientemente confiable por las desviaciones que sufría debido al entorno. Por otro lado, la altura del edificio del CFATA impedía usar a la estrella polar como referencia. Tampoco fue posible usar un **GPS**, ya que para trazar una línea norte-sur se hubiera requerido una distancia libre mayor a la existente en el jardín interior. Por ello se recurrió a una brújula solar. En principio, la idea es sencilla. Si con un reloj solar que está alineado adecuadamente se puede determinar la hora, entonces también es posible el proceso inverso: conociendo la hora exacta, se puede orientar un reloj solar (**Fig. 19**). Con este método se tensó un hilo de referencia con dirección norte-sur sobre la carátula del reloj en construcción.

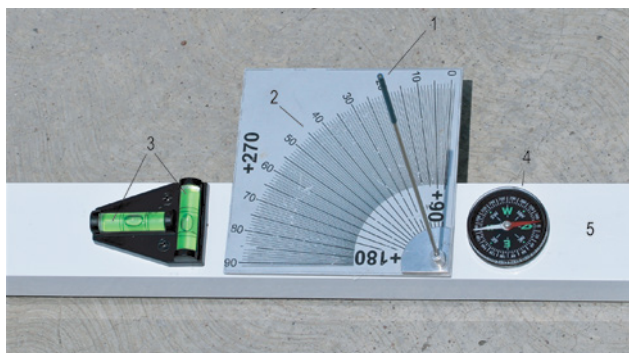


Fig. 19 Fotografía de la brújula solar usada para trazar una línea norte-sur, mostrando su gnomon (1), su carátula (2), dos niveles de burbuja (3), una brújula magnética (4) y la canaleta larga de aluminio (5) sobre la que se montaron dichos elementos.

Antes de soldar el gnomon a una placa de acero, se colgó una plomada desde la punta del gnomon, para verificar que coincidiera con la línea norte-sur. Además, fue necesario confirmar que justamente en el mediodía solar las sombras del gnomon y de la plomada se proyectaran sobre el mencionado hilo. Como último paso se verificó que el ángulo que forma el borde superior del gnomon con el plano de la carátula coincidiera con la latitud geográfica (**Fig. 20**). De esta manera, el borde superior del gnomon quedó paralelo al eje de rotación de la Tierra. La **Figura 21** muestra algunas etapas de la construcción.



Fig. 20 Inclinómetro usado para verificar que el borde superior del **gnomon** formara un ángulo de 20.7° con respecto al plano horizontal.



Fig. 21 (a)



Fig. 21 (b)



Fig. 21 (c)



Fig. 21 (d)

Fig. 21 Imágenes que muestran diferentes etapas de la construcción del reloj solar del CFATA. **(a)** Preparando los cimientos del gnomon. **(b)** Colando el concreto para la base de la carátula. **(c)** Sujutando el **gnomon** para soldarlo. **(d)** Pegando los símbolos y números de acero inoxidable en la carátula, colocando bolsas con arena sobre ellos.

En la **Figura 18** puede apreciarse que el plano del gnomon no es paralelo a los costados este y oeste de la carátula. Debido a ello, las líneas horarias son asimétricas. Además, el gnomon está desplazado hacia el oeste. La finalidad de ello es que el reloj solar marque la hora durante el periodo del día de mayor afluencia de personas al CFATA.

Los **signos del zodiaco** alrededor la base del indicador (**Fig. 18**) únicamente tienen fines ornamentales y recuerdan la relación histórica entre la astrología y la astronomía; sin embargo, debe tenerse en mente que la astrología no es una ciencia.

VI. Comentarios finales

Los relojes solares siguen gozando de admiración, incluso siendo instrumentos de tiempos remotos. Desde el punto de vista didáctico, motivan la enseñanza con una variedad de conceptos interesantes. Los maestros de primaria y secundaria pueden enriquecer sus clases de ciencias naturales haciendo relojes solares sencillos con sus alumnos, usando materiales caseros. En el bachillerato y en la universidad, habrá alumnos interesados en comprender aspectos de cronometría, aplicar sus conocimientos matemáticos a un problema específico e inclusive diseñar y construir un reloj de Sol para su escuela.

Además de su historia y del potencial didáctico inherente, los relojes solares tienen otra peculiaridad. Como el movimiento del Sol y de la Tierra son armónicos, sus carátulas generalmente resultan ser estéticas. Probablemente esto contribuya al cariño que les tienen artistas, astrónomos aficionados y el público en general en muchos países.

Suele suceder que los relojes solares sean juzgados injustamente. En aquellos que sólo indican la hora solar, al comparar la hora del reloj solar con la de un reloj de pulso o del teléfono celular, los visitantes concluyen que el reloj solar no funciona correctamente. En realidad, ambos tipos de relojes, los “artificiales” (mecánicos, electrónicos o atómicos) y los “naturales” (solares), marcan la hora correctamente. Simplemente marcan otro tipo de hora.

Los relojes solares tienen dos ventajas con respecto a otros relojes, ya sea antiguos como los de arena, agua y fuego, o más recientes, como los mecánicos o electrónicos. Estas son la de no consumir energía y la propiedad de determinar la hora sin necesidad de ser ajustados. Determinar o “encontrar” el tiempo, implica conocer la hora a través de la posición del Sol (o de las estrellas), sin consultar un reloj patrón. En ese contexto, los demás relojes, incluso los atómicos, pueden denominarse “guardatiempos”, ya que sólo conservan la hora. Los relojes solares cumplen ambas funciones: determinan y “guardan” el tiempo. Obviamente dejan de funcionar al nublarse el cielo u ocultarse el Sol, pero al iluminarse nuevamente su carátula, aparece la hora exacta.

VII. Abreviaturas y glosario de términos

Afelio: Punto sobre la trayectoria elíptica en el cual la Tierra se encuentra más alejada del Sol.

Altura del Sol: “Distancia” entre el horizonte y el Sol. Se da en grados de arco. También se define como el ángulo de incidencia de los rayos solares con respecto a la horizontal.

a. m.: Ver **ante meridiem**.

Analema: Del griego “pedestal de reloj solar”, sin embargo, se refiere a la curva con forma de “8” (**lemniscata**) que se genera por la posición del Sol si cada día se le observa (fotografía) a la misma hora desde la misma posición.

Ante meridiem: Se refiere a cualquier hora entre las 00:00 y las 12:00 horas.

Ascensión recta: Ángulo medido a lo largo del **ecuador celeste** a partir del **punto de Aries**. Junto con la **declinación** forma un sistema de coordenadas usado en astronomía para localizar objetos en la **bóveda celeste**.

Astrolabio: El astrolabio (del griego “buscador de estrellas”) es un instrumento que se usaba para determinar la posición de una estrella sobre la **bóveda celeste**, con la finalidad de encontrar la **latitud geográfica** de un sitio, conociendo la hora. También se usaba para saber la hora, conociendo la latitud.

Bóveda celeste: En astronomía se define como una esfera imaginaria concéntrica con la Tierra, sobre la cual aparentemente se mueven los objetos celestes (astros, planetas, cometas, etc.). No tiene un radio definido.

Cenit (zenit): Punto en el cual la vertical de un sitio cruza la **bóveda celeste**.

Constelación: Agrupación de estrellas que al unir las por líneas imaginarias aparentemente forman siluetas de seres u objetos en la **bóveda celeste**. A pesar de que varias civilizaciones han imaginado constelaciones diversas en astronomía sólo se usan 88 constelaciones. De esta manera cada punto sobre la bóveda celeste está dentro de una de estas 88 regiones.

Culminación: Se refiere a la máxima **altura del Sol** o cualquier cuerpo celeste sobre el horizonte, es decir, cuando el cuerpo celeste cruza el **meridiano** local, un círculo imaginario que pasa por el **cenit** y une el norte con el sur.

Declinación: Ángulo que forma la posición de un objeto con el ecuador de la **bóveda celeste**. Se considera positiva hacia el norte del **ecuador celeste** y negativa hacia el sur. Junto con la **ascensión recta** forma un sistema de coordenadas usado en astronomía para localizar objetos en la bóveda celeste. En los **equinoccios** la declinación es cero, mientras que en el solsticio de verano su valor es de aproximadamente $+23^{\circ} 27'$ y en el de invierno es aproximadamente $-23^{\circ} 27'$.

Día sidereal o sidéreo: Formalmente se define como el tiempo transcurrido entre dos **culminaciones** sucesivas del **punto de Aries**.

Día sidereal o sidéreo medio: Se define como el tiempo que tarda la Tierra en girar una vez en torno a su eje, sin tomar en cuenta el movimiento de **nutación**. Su duración no varía. Equivale a 23 horas 56 minutos y 4.091 segundos, es decir, aproximadamente 4 minutos menos que el **día solar medio**.

Día solar: Tiempo que transcurre entre dos **culminaciones** consecutivas del Sol, o bien tiempo que tarda el Sol en pasar dos veces seguidas por una posición específica.

Día solar medio: Tiempo que se definió suponiendo que un Sol imaginario recorre la **bóveda celeste** con una velocidad uniforme. Sus horas son constantes.

Día solar verdadero: Ver **día solar**.

Eclíptica: Del griego *ekleipsis* que significa “ocultación” o “desaparición”. Se refiere a la curva que surge de la intersección del plano de la órbita terrestre con la **bóveda celeste**.

Ecuación del tiempo: Diferencia entre la **hora solar** y la **hora solar media**. Esta diferencia varía de un momento a otro. Dada la resolución de los relojes solares, en **gnomónica** generalmente se usan gráficas (**Fig. 11**) o tablas (**ver Tabla 1**) que, dependiendo de la fecha, muestran la cantidad de minutos que deben sumarse o restarse a la hora solar para obtener la hora solar media.

Ecuador celeste: Círculo imaginario que resulta de extender el plano del ecuador de la Tierra hasta “cortar” la **bóveda celeste**, dividiéndola en dos hemisferios. Se supone que su centro coincide el centro de la Tierra. Tiene una inclinación de aproximadamente $23^{\circ} 27'$ con respecto a la **eclíptica**.

Equinoccio: Del latín “noche igual”. Se refiere a los dos días del año (equinoccio de otoño y equinoccio de primavera) en los que el día y la noche tienen la misma duración. Los equinoccios se dan en el instante en el que el Sol se encuentra sobre el plano del ecuador terrestre.

Excentricidad: Se refiere al grado de desviación con respecto a una circunferencia. En astronomía, una excentricidad (**e**) nula significaría que un cuerpo celeste gira en torno a otro sobre una circunferencia. Valores de **e** entre 0 y 1 corresponden a órbitas elípticas.

GMT: Ver **Greenwich mean time**.

Gnomon: Del griego “guía” o “maestro”. Se refiere al objeto (indicador) que proyecta la sombra sobre la carátula en un reloj solar.

Gnomónica: Ciencia que estudia el diseño, la construcción y el funcionamiento de relojes solares.

GPS: Sistema de posicionamiento global, por sus siglas en inglés: *global positioning system*.

Greenwich mean time: Hora oficial en el Reino Unido.

Heliocronómetro: Reloj solar con una precisión superior a los 5 min, con el que pueden determinarse la **hora solar** y la **hora oficial**.

Hora babilónica: La hora babilónica resulta de dividir el día en 24 horas (solares) iguales, iniciando el conteo en el orto.

Hora civil: Ver **hora oficial**.

Hora legal: Ver **hora oficial**.

Hora local: Es la hora referida al **meridiano** del lugar, es decir, a una posición específica.

Hora oficial: Hora que marcan nuestros relojes cotidianos.

Hora sideral o sidérea media: Se refiere a la hora basada en el **día sideral medio**.

Hora solar: La hora solar, también llamada **hora solar verdadera**, es la hora que marca un reloj solar en base al movimiento aparente del Sol. Cuando el Sol pasa por el **meridiano** de cierto lugar, es el mediodía (las 12:00 horas) de la hora solar, denominado **mediodía solar**. La duración de los **días solares** y, consecuentemente de las horas solares, depende de la fecha.

Hora solar media: Es la hora que resulta de definir la existencia de una Tierra ficticia que gira en torno al Sol con una velocidad constante. Su duración no cambia al transcurrir el año.

Hora solar verdadera: Ver **hora solar**.

Huso horario: Una de las 24 regiones (gajos) imaginarias en las que se ha dividido la Tierra. Cada huso horario cubre 15° de arco y equivale a una hora. Por definición, se considera que la hora dentro de cada huso horario es la misma.

Latitud geográfica: Medida de qué tan al norte o al sur del ecuador terrestre se encuentra un sitio. Se mide en grados de arco.

Lemniscata: Del latín *lemniscatus*, que significa “decorado con cintas”. Se refiere a curvas con forma parecida al número ocho.

Línea internacional de cambio de fecha: Línea imaginaria que va desde el **polo norte geográfico** hasta el **polo sur geográfico** y coincide con el **meridiano 180°**; es decir, es el antimeridiano del **meridiano de Greenwich**. En vista de que cruzar dicha línea implica cambiar de fecha un día, los países que son atravesados por el meridiano 180°, por cuestiones prácticas decidieron situarse en uno u otro día.

Longitud geográfica: Medida de qué tan lejos al oeste o al este del **meridiano cero** se encuentra un sitio. Se mide en grados de arco.

Mediodía astronómico: Ver **mediodía solar**.

Mediodía solar: Instante en el que el Sol está más cerca del **cenit** y cruza el **meridiano**. En ese momento la longitud de las sombras es mínima. Corresponde al mediodía de la **hora solar**. En **gnomónica** generalmente se usa el término mediodía solar, ya que el **mediodía astronómico** es relativo al astro que se tenga de referencia.

Meridiano: Del latín *meridies*, que significa “mediodía”. Se puede visualizar como la sombra que proyecta una varilla delgada recta en el instante del **mediodía solar**.

Meridiano cero: Línea imaginaria que va desde del **polo norte geográfico** al **polo sur geográfico**, pasando por el observatorio de Greenwich, Reino Unido. Divide a la Tierra en hemisferio este y hemisferio oeste.

Meridiano de Greenwich: Ver **meridiano cero**.

Norte geográfico: Se refiere al sitio por el cual pasa el eje de rotación imaginario de la Tierra en el norte.

Nutación: Del latín *nutatio* que significa “cabecear”. Es un movimiento ondulatorio del eje de rotación. La nutación se suma a la **precesión**. Se puede visualizar como un serpiente superpuesto al movimiento de precesión del eje de rotación terrestre. Surge debido a la atracción gravitacional de la Luna sobre la Tierra y a la forma no esférica de la Tierra.

Perihelio: Punto sobre la trayectoria elíptica en el cual la Tierra se encuentra más cercana al Sol.

Polo norte geográfico: Ver **norte geográfico**.

Polo sur geográfico: Ver **sur geográfico**.

Precesión: Lento balanceo del eje de rotación terrestre, similar al movimiento del eje

de rotación de un trompo. Se debe a la atracción gravitatoria del Sol y de la Luna, así como a la forma no esférica de la Tierra. El periodo de precesión del eje terrestre es de aproximadamente 26,000 años.

Punto de Aries o punto vernal: Punto sobre la **eclíptica** en el que el Sol pasa del hemisferio sur celeste al hemisferio norte celeste. Esto ocurre justamente en el equinoccio de primavera. Actualmente este punto se encuentra en la **constelación** de piscis.

Reloj solar analemático: Reloj solar en el cual el **gnomon** no es fijo. Se coloca verticalmente según la fecha. En algunos relojes grandes, el indicador puede ser el visitante, es decir, su sombra es la que marca la hora.

Reloj solar bifilar: Reloj solar horizontal que no requiere **gnomon**. Marca la hora con la intersección de las sombras de dos hilos o cadenas delgadas, suspendidas a cierta distancia sobre la carátula y alineadas, una en la dirección norte-sur y la otra en la dirección este-oeste. Puede diseñarse para marcar cualquiera de los tipos de hora mencionados en esta guía para los demás relojes solares.

Reloj solar ecuatorial: Reloj solar cuyo **gnomon** es paralelo al eje de rotación de la Tierra y cuya carátula puede ser paralela (**Fig. 6**) o perpendicular al gnomon. Sus líneas horarias están espaciadas 15 grados.

Resolución: Se refiere a la mínima lectura detectable, es decir, a la mínima separación entre las marcas de la carátula.

Sextante: Instrumento diseñado para determinar el ángulo entre dos objetos, por ejemplo, dos puntos específicos en la costa, o el Sol y el horizonte. Por su precisión, sustituyó al **astrolabio**. Antes de la implementación del sistema **GPS**, era el instrumento mayormente usado para determinar la posición de un barco en el mar. Para ello se requería también de un almanaque y un cronómetro.

Signos del zodiaco: Los signos del zodiaco (Aries, Tauro, Géminis, Cáncer, Leo, Virgo, Libra, Escorpio, Sagitario, Capricornio, Acuario y Piscis), del griego “rueda de los animales”, también llamados signos zodiacales, son doce sectores que forman una banda imaginaria en la **bóveda celeste**. El ancho de esta cinta, centrada en la **eclíptica**, es de 18°. A cada uno de los 12 sectores (signos) arbitrariamente se le asignaron 30°. Puede generar confusión que un signo zodiacal dado y la **constelación** de su mismo nombre actualmente cubren áreas distintas de la bóveda celeste. Esto se debe a que por el movimiento de **precesión** la posición de las constelaciones va cambiando lentamente, es decir, se desplaza ligeramente con el tiempo sobre el fondo del cielo. El nombre de cada sector (signo de zodiaco) le fue asignado hace miles de años, de acuerdo con la constelación que se veía en ese momento. Algunos textos consideran un decimotercer signo zodiacal (Ofiuco), comprendido entre el 29 de noviembre y el 17 de diciembre. De hecho, actualmente la eclíptica cruza justamente por la constelación de Ofiuco. Debe tenerse en mente que las figuras que nos imaginamos en la bóveda celeste están formadas por estrellas extremadamente distantes entre ellas

y que, vistas desde otra posición diferente a la de la Tierra, no necesariamente pueden relacionarse para formar figuras. En otras culturas, como la china, los signos zodiacales se definieron de manera diferente.

Solsticio de invierno: Del latín *solstitium*, que significa “Sol quieto”. El solsticio de invierno es el momento en el cual la Tierra se encuentra más cercana al Sol, es decir, en el **perihelio**. La **declinación** del Sol es de $-23^{\circ} 27'$. En el hemisferio norte coincide con el inicio del invierno, siendo el día más corto del año.

Solsticio de verano: Del latín *solstitium*, que significa “Sol quieto”. El solsticio de verano es el momento en el cual la Tierra se encuentra más alejada del Sol, es decir, en el **afelio**. En ese instante, la **declinación** del Sol es de $+23^{\circ} 27'$. En el hemisferio norte coincide con el inicio del verano, siendo el día más largo del año.

Sur geográfico: Se refiere al sitio por el cual pasa el eje de rotación imaginario de la Tierra en el sur.

Tiempo medio de Greenwich: Hora solar media en el **meridiano de Greenwich**. El tiempo medio de Greenwich (**GMT**) se llega a usar como sinónimo de **tiempo universal coordinado (UTC)** aunque, en rigor, el GMT es la denominación de una zona horaria, mientras UTC es el nombre de un estándar de tiempo. Desde 1972, el GMT ya no se considera como un estándar de tiempo, sino únicamente como el nombre de una de las 24 zonas horarias que existen.

Tiempo universal coordinado (UTC): Dado que la rotación de la Tierra sobre su eje no es uniforme, surgen pequeñas diferencias entre el **UTC** y el **GMT**. Para sincronizar ambos tiempos, suele añadirse o quitarse un segundo al UTC. Esta decisión la toma el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS, por sus siglas en inglés) en base a promedios de decenas de relojes atómicos instalados en diferentes partes del mundo, entre ellos en el CENAM. Es el tiempo en el que actualmente se basan la mayoría de los relojes. Nunca difiere del GMT en más de 0.9 segundos. El acrónimo UTC (*coordinated universal time*), que en inglés no corresponde a las siglas en el orden esperado, se definió como un compromiso entre el inglés y el francés (*temps universel coordonné*).

UTC: Ver **Tiempo universal coordinado**.

Velocidad de traslación: Se refiere a la velocidad de la Tierra sobre su trayectoria elíptica en torno al Sol. Su valor máximo (en el **perihelio**) y mínimo (en el **afelio**) es de aproximadamente 30.75 y 28.76 km/s, respectivamente.

VIII. Referencias

Bertrán de Quintana, M. El Sol en la Mano: Estudios de Iluminación, Orientaciones y Relojes Solares. Ediciones de la Universidad Nacional, Ciudad de México, 1937.

Blateyron, F. Shadows Pro 4.0, Paris, 2015 (www.shadowspro.com).

Dohrn-van Rossum, G. History of the Hour: Clocks and Modern Temporal Orders. University of Chicago Press, Chicago, IL, 1996.

Drecker, J. Die Theorie der Sonnenuhren. Vereinigung Wissenschaftlicher Verleger W. de Gruyter, Berlín, Leipzig, 1925.

Hose, C., McDougall, W. The Pagan Tribes of Borneo. MacMillan and Co., Ltd., Londres, 1912, p. 97-115.

Jespersen, J., Fitz-Randolph, J. From Sundials to Atomic Clocks: Understanding Time and Frequency. National Institute of Standards and Technology, monografía 155, Washington DC, 1999.

King, M.A. Designing Sundials: The Graphic Method. Algrove Publishing, Ontario, 2007.

Landes, D.S. Revolución del Tiempo: El Reloj y la Formación del Mundo Moderno. Crítica S.L., Barcelona, 2007.

Loske, L.M. Die Sonnenuhren. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, Nueva York, 2nd ed., 1970.

Loske, L.M. Cronometría: del Obelisco al Reloj de Cuarzo y Atómico. Editorial Impulso, Ciudad de México, 1979.

Loske, L.M. *Ars Temporis*: el Arte de la Medición del Tiempo. Colección Editorial de Arte Chrysler, Ciudad de México, 1992.

Loske, A.M. The equatorial sundial at Frankfurt am Main, Germany. Compendium of the North American Sundial Society 6(3): 12-14, 1999.

Mayall, R.N., Mayall, M.W. Sundails – Their Construction and Use. Dover Publications Inc, Mineola, NY, 2000.

Miranda, A.L. Relojes de Sol y la Medida del Tiempo. Editorial Marcombo, Barcelona, 2015.

Miranda, A.L., Pereira, J.E. Diseño de Relojes de Sol. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Ciudad de México, 2018.

Rohr, R.R. Sundials – History, Theory and Practice. Dover Publications Inc., Mineola, NY, 1996.

Schechner, S.J. The material culture of astronomy in daily life: sundials, science, and social change. *Journal for the History of Astronomy*, 32(108):189-222, 2001.

Schechner, S.L. Time and Time Again: How Science and Culture Shape the Past, Present, and Future. Collection of Historical Scientific Instruments, Harvard University, Cambridge, MA, 2014.

Scott, D. Sundials in Anglo-Saxon England. *British Sundial Society Bulletin*, 11:4-8, 1999.

Severino, N. Gnomonica Cinese: Introduzione alla cultura gnomonica della civiltà cinese. *Academia.edu*, Roccasecca, 1997.

Soler Gayá, R. Diseño y Construcción de Relojes de Sol: Prontuario para la Construcción de Relojes de Sol con la Justificación de los Métodos y Fórmulas. Turner, Madrid, 1989.

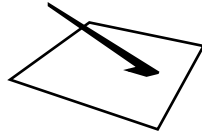
Soler Gayá, R. Diseño y Construcción de Relojes de Sol y Luna: Métodos Gráficos y Analíticos. Colegio de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1997.

Waugh, A. Sundials – Their Theory and Construction. Dover Publications Inc., Garden City, NY, 1973.

Zinner, E. Deutsche und Niederländische Astronomische Instrumente des 11. bis 18. Jahrhunderts. Becksche Verlagsbuchhandlung, Munich, 1956.

/ English version

The Sundial
at the
Center for Applied Physics
and Advanced Technology
of the UNAM



The Sundial
at the
Center for Applied Physics
and Advanced Technology
of the UNAM

/ Achim M. Loske

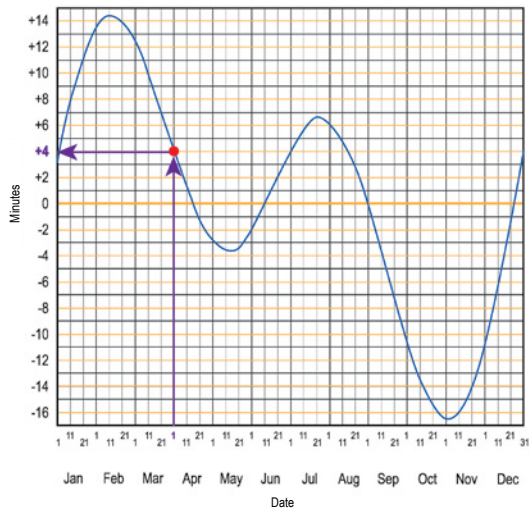
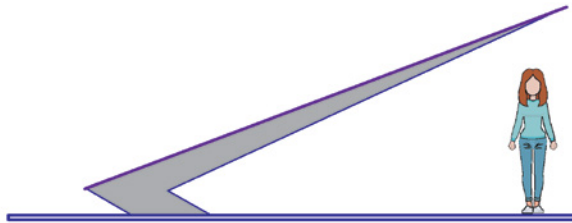
*The author wishes to thank **Dr. Julieta Fierro** for her interest in writing the foreword to this booklet. In addition, he thanks **Dr. Martha A. Villegas**, **Dr. Miguel de Icaza**, **MSc Francisco Fernández**, **Dr. Roberto Machorro** and **Eng. José C. Montes** for the thorough review of the text. Their suggestions were very valuable. All sketches were drawn by **GD Gabriela Trucco**. The professional contribution of **ID Ismael Ortiz** in the construction of the sundial, as well as the support of **Dr. Harald Böhnel** in the orientation of the gnomon, were crucial. The author also wishes to highlight the impeccable edition of this book by **GD Daniela Balderrama**. The construction of the sundial was financed by the CFATA and the “Coordinación de la Investigación Científica” of the UNAM.*

/ Quick guide

To obtain the standard time, look at the shadow of the **upper edge** of the style over the Arabic numeral on the scale that is closest to the north (**N**) and add or subtract the number of minutes that, based on the date, appear in the graph. For daylight saving time use the second scale with Arabic numerals.

Example: On April 1st, to obtain the time displayed by our mechanical or electronic watches, 4 minutes must be added.

Roman numerals show solar time. When the shadow of the style coincides with the number XII, it is solar noon.



/ Index

Foreword	51
Preface	53
I. Introduction	55
II. Definitions and basic concepts	60
II.1 Sidereal time, solar time and mean solar time	60
II.2 Time zones and Greenwich mean time	63
II.3 The official time	66
II.4 Daylight saving time	66
III. How does a sundial work?	67
IV. How does one tell the time?	69
V. Curiosities of the CFATA sundial	72
VI. Final comments	75
VII. Abbreviations and glossary of terms	76
VIII. References	82

/ Foreword

This booklet will introduce you to the counting of time.

Time is not easy to define; what we know how to do, with precision, is to measure it. If we imagine the atoms in a gas residing in a container where the pressure and temperature are constant, time is indistinct for the particles; the past, present and future are the same. For us, macroscopic beings, time can be noticed through an increase in disorder. Let us think of a house that has just been cleaned and what happens after several hours when things begin to get messy again, for example, the accumulation of dirty dishes in the kitchen sink. For the universe, time is also measured by the increase in disorder, for example, radiation. The stars generate gamma rays, the highest form of energy; these rays degrade as they move to the outside of stars, where they are emitted as lower energy radiation such as ultraviolet or visible light. The Sun radiates energy that plants absorb to convert into sugar; when we consume plants, we radiate infrared energy and degrade sugar. Thus, the energy of the universe degrades as time passes, which can be measured.

Unlike science, time in daily life is measured with repetitive phenomena, such as clocks that show the passage of seconds, minutes and hours. All the great cultures have used repeating astronomical events to create their calendars: the passage of day and night, the phases of the Moon, the year, the succession of the seasons, the rainy and dry seasons.

Several cultures noted how the position of the Sun throughout the day and the seasons produced shifting shadows on various structures. The best known are gnomons, built specifically to generate well-defined shadows, observed on surfaces with hourly markings in different seasons of the year.

Achim Loske has dedicated himself to counting time using shadows from the light that the Sun projects during a given day and their

changes during the year. Ancient Egyptians built sundials by observing the shadows of objects such as obelisks. In Mesoamerica, plays of light, such as the day of the zenith, on which the light illuminates the bottom of a hollow, and plays of light and shadow during the equinoxes, are well known. Dr. Loske goes one step further and creates works of art combining projections of light and shadow with his instruments.

This book presents and describes a sundial that Achim M. Loske built for the Center for Applied Physics and Advanced Technology (CFATA) of UNAM. The intention is to invite the interested public to visit the sundial and understand how this particular model works. Because it is in a public place, anyone can visit it. The book is a guide to understand how the Sun is used to measure time in a particular place. As with any specialized text, one must approach this work with patience, looking for information on a topic that is new to us to properly appreciate the CFATA sundial.

Loske's text describes how the Sun has been used since ancient times to measure time. From the introduction, he invites us to visit museums where different types of sundials are shown to better understand their variety and delight us with their beauty and how a sundial uses the variation in the shadow that an object projects throughout the day. He makes it clear that shadows are not always the same; due to the tilting of the rotational axis of the Earth, the variation in shadows change with the time of the year; therefore, a good sundial must consider this particularity. The shadow that an object projects changes with latitude, and as if that were not enough, the civil time, that is, the time we use for our daily activities, does not coincide with a simple sundial. Therefore, the sundial built by Loske and described herein is a masterpiece, worthy of further explanation in this text.

Julieta Fierro Gossman

Institute of Astronomy, UNAM

Mexico City, August 2021

/ Preface

This booklet was conceived as support for visitors with little knowledge in astronomy or solar geometry to understand the basic concepts of how the sundial at the Center for Applied Physics and Advanced Technology (CFATA) of the UNAM works. In addition, it can be useful in science classes from high schools to universities, with the purpose of encouraging teachers and students to delve into certain topics of astronomy and even solar architecture. For those who wish to visit the sundial, the exhibit is open to the public.

There are concepts that are not addressed with full scientific rigor because the aim of the text is the disclosure and not a formal description of the phenomena involved in the operation of the sundial. Some technical terms are described in chapter VII and are highlighted in bold type the first time they are mentioned in the text.

I hope that this guide will address any questions that may arise when visiting the CFATA sundial and that it fosters interest in the infinite variety of sundials and their relationship with astronomy, involving the visitor in the fascinating world of understanding the motion between the Earth and the Sun.

Achim M. Loske

Center for Applied Physics and Advanced Technology, UNAM
Querétaro, Qro., July 2021

I. Introduction

The apparent motion of the Sun in the sky, being cyclical, is a time reference for most living beings. Although, today, sundials no longer govern time in our daily lives, they continue to be constructed as didactic, artistic and scientific sculptures, reminding us that the time we use was defined based on practical and historical reasons. Unlike other astronomical instruments, such as the **astrolabe** and the **sextant**, sundials have not been relegated to museums.



Fig. 1 "Monument to Time", approximately 2.5 m in diameter, installed in Wennigsen, near Hannover, Germany. This work includes various parameters related to the measurement of time and the motion of the Earth with respect to the Sun. Design and realization: Erich Pollähne. Photo: Stegfried Rasper.

The science of sundial design, called **gnomonics**, is extensive. It belongs to chronometry, a field of physics related to the determination and measurement of time. In several countries of the world, there are associations of sundial amateurs as well as academics who are professionally dedicated to the design of sundials, which can be very complex (**Fig. 1**). Surprisingly, even on Mars, sundials have been installed for scientific purposes.

A fundamental difference between a sundial and any other type of watch is that with a sundial, it is

possible to *determine* the time. Mechanical clocks were initially unreliable (Landes 2007), which is why sundials continued to be used until the end of the 19th century to adjust mechanical clocks in government buildings and churches (**Fig. 2**).

The history of sundials and the measurement of time are interesting and extensive topics closely linked to the religions, art, agriculture, commerce and navigation of many cultures (Hose & McDougall 1912; Loske 1979; Dohrn-van Rossum 1996; Rohr 1996; Severino 1997; Jespersen & Fitz-Randolph 1999; Scott 1999; Schechner 2001; Landes 2007; Schechner 2014).



Fig. 2 Sixteenth century tower in the Parliament building in Linz, Austria. One can see the baroque helmet and in the body of the tower a mechanical clock and a sundial that are repeated in each of its facades. Sundials made using the sgraffito technique were designed by Fritz Fröhlich, a contemporary Austrian painter. Photo: Siegfried Rasper.

One of the first methods for comparing time intervals may have been the measurement of the length of the shadow of a vertical rod. These rudimentary sundials were the predecessors of the monumental obelisks built many centuries later. There is evidence of obelisks in Egypt dating to 3500 years B.C. as well as Chinese sundials dating to almost 2700 years B.C. Interestingly, approximately 1500 B.C., Egyptians were already using portable sundials (Jespersen & Fitz-Randolph 1999). In the cenotaph of Seti I in Abydos, an ancient and important city in Egypt, the use of a sundial is associated with the year 1300 B.C. Findings of calendars and monumental sundials built between 2000 and 1500 years B.C. in Asia and the Mediterranean demonstrate surprising astronomical knowledge. The Babylonian, Greek and Mayan civilizations also measured time intervals based on the position of the Sun in the sky.

Approximately 140 A.D, the Greek-Egyptian astronomer Claudius Ptolemy described several ancient sundials, comparing them with his own designs. In the history of gnomonics, one famous personality is the

astronomer and mathematician Christophorus Clavius, who in 1602 published extensive and complex work describing the various methods for constructing sundials of different types. Throughout the history of sundials, the surprising astronomical monuments of the observatory of Jaipur, India, built in 1728, are commonly referred to.

In 1923, Hugo Michnik invented the **bifilar sundial**. At that time, the **heliochronometer**, a very precise type of sundial, was also developed and used to regulate clocks in railway stations.

Joseph Drecker was one of the first scientists to formally publish the mathematical foundations of gnomonics and also studied the astronomy of Egyptian culture in depth. In the last chapters of one of his books (Drecker 1925), he describes sundials whose **gnomon** or style is parallel to Earth's rotational axis. With the exception of **analemmatic sundials (Fig. 3)**, this is the case for the majority of sundials built since the fourteenth century; these sundials are considered “modern”. Another classic book that includes a notable historical treatise was published by Ernst Zinner (1956).

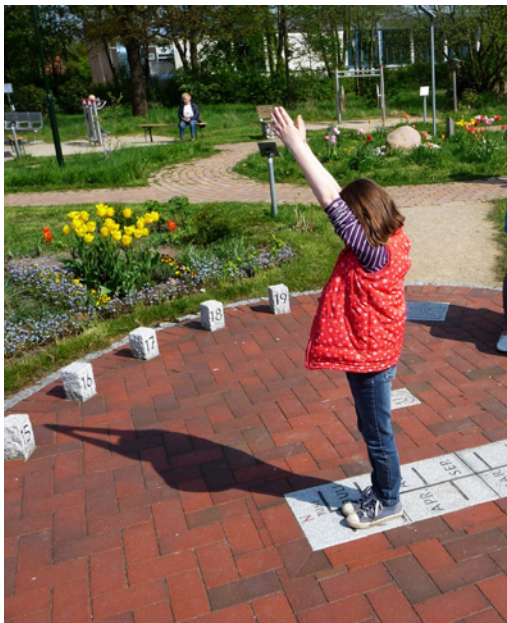


Fig. 3 *Analemmatic sundial* installed in Nienhagen, Germany. The visitors perform the function of the gnomon, standing on the dial plate in the appropriate place according to the date, so that their shadow marks the time. Design: Siegfried Rasper.

Those interested in the history of astronomical instruments and sundials can find useful information and collections of sundials in the *Adler Planetarium and Astronomy Museum* in Chicago (<https://adler-ais.axiellhosting.com>), in the *Harvard Collection of Historical Scientific Instruments*, in Cambridge, Massachusetts (<https://chsi.harvard.edu>), in the History of Science Museum of the University of Oxford (<https://www.hsm.ox.ac.uk/collections>), and in the *Mathematisch Physikalischer Salon* in Dresden, Germany (<https://mathematisch-physikalischer-salon.skd.museum/en>). It is worth a visit, even if virtual, to these museums.

Sundials are divided into several groups based on the orientation, inclination and shape of the dial plate. Some examples are horizontal (**Fig. 4**), vertical (**Fig. 5**), analemmatic (**Fig. 3**) and **equatorial sundials (Fig. 6)**. Their design can vary depending on the site and the period in which they were built, showing different types of time, such as **solar time**, **mean solar time**, **local time**, or **Babylonian hours** (Soler Gayá 1989; Loske 1999; Miranda & Pereira 2018). In addition to hours, sundials can show very diverse information such as sunrise and sunset, the date according to different types of calendars, the **solar altitude** and the day length.



Fig. 4 Horizontal sundial that indicates the **solar time** of the placement site (Roman numerals) as well as the solar time of the **meridian** (90° W) that governs the time in Mexico City. An **analemma** can be distinguished around the **solar noon** mark, the **zodiac signs** on the periphery, and a compass at the northern end of the dial. Design: Lothar M. Loske.



Fig. 5 Vertical declining sundial with a 3.3 meter gnomon installed at the Center for Nanosciences and Nanotechnology of UNAM in Ensenada, BC. The wall where the clock was drawn is not oriented exactly to the south but declines more than 8 degrees to the east, which is why the lines of the hours are not symmetrical. Design: Roberto Machorro.



Fig. 6 Equatorial sundial 3.4 meters in diameter installed in Frankfurt, Germany, in 1951 (Loske 1999). Its dials mark the solar time of Frankfurt and the **solar time** of the 15° E meridian, which governs the **legal time** in Germany. It is also possible to determine the date, **solar time**, **mean solar time** and **legal time** of 200 cities around the world. The same can be achieved for any site on Earth, as long as its geographical coordinates are known. Design: Lothar M. Loske.

Not every type of sundial is suitable for use at any **geographic latitude**. For example, horizontal sundials are not common at low latitudes, that is, near the Earth's equator. Vertical sundials are the most common. In Europe, they can be seen in many public buildings, churches and houses.

Portable sundials (**Fig. 7**), were used from the middle of the 16th century to the 19th century. Even at the beginning of the 20th century, most people still depended on sundials to adjust the time of their wrist watches, which first appeared at the end of the 19th century, becoming popular during the First World War. Before reliable mechanical clocks existed, water, sand, fire or oil clocks were used at night (Loske 1979; Loske 1992; Dohrn-van Rossum 1996; Jespersen & Fitz-Randolph 1999; Landes 2007).



Fig. 7 Portable sundial made of brass (approximately 10 cm in diameter). **Solar time** can be determined by orienting the gnomon with the compass and adjusting the angle of dial.

For those interested in expanding their knowledge of sundials or building one, there are several books that explain the concepts at different levels (Bertrán de Quintana 1937; Loske 1970; Waugh 1973; Soler Gayá 1989; Rohr 1996; Soler Gayá 1997; Mayall & Mayall 2000; King 2007; Miranda 2015; Miranda & Pereira 2018). Today, there is advanced software that one can use to design sundials of various types (Blateyron 2015).

II. Definitions and basic concepts

This chapter discusses and simplifies some concepts related to the CFATA sundial.

II.1 Sidereal time, solar time and mean solar time

By definition, a **sidereal day** is the time it takes for the Earth to make a complete turn around its own axis, that is, the time it takes to rotate 360° . To determine this, a very distant star can be taken as a reference. In **Figure 8**, one sidereal day is equivalent to the time required for the Earth to go from position **1** to position **2**. Because the star shown (**3**) is at an enormous distance, the blue lines can be considered practically parallel. The **sidereal day** lasts 3 minutes and 56 seconds less than the **mean solar day**. It is worth mentioning that the variations in sidereal days are extremely small and detectable only with very sophisticated devices, such as atomic clocks.

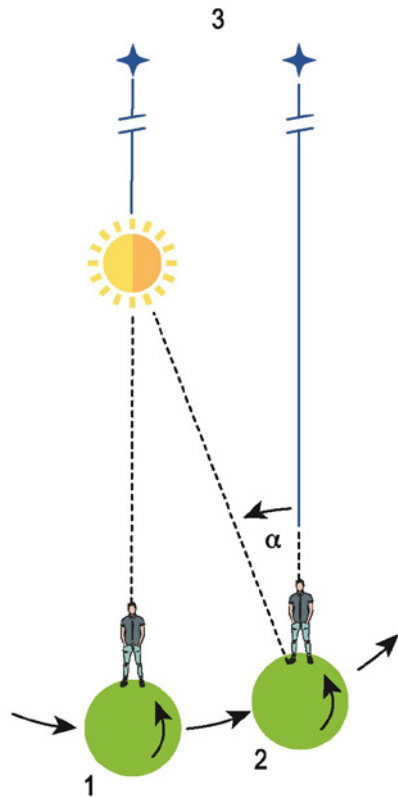


Fig. 8 Diagram showing that a **solar day** is a few minutes longer than a **sidereal day**. Because the Earth moves around the Sun, after rotating 360° on its own axis (going from point **1** to **2**), it must still rotate an angle α so that the Sun is again overhead of the observer. A very distant star is selected as a reference (**3**).

The solar time, also called **true solar time**, is based on the **solar day** or **true solar day**, defined as the time that elapses between one **culmination** of the Sun and the next or as the time it takes the Sun to pass twice in a row through a specific position. It is a few minutes longer than a sidereal day. This is because the Earth, in addition to rotating around its own axis, moves around the Sun, as shown in **Figure 8**. Because of this, for the Sun to be over the observer's head, the Earth must rotate an additional angle (α). The Earth's motion around the Sun is complex. It does not follow a circumference but an elliptical trajectory. Additionally, its axial tilt is approximately 23.5° relative to the orbital plane around the Sun, having **precession** and **nutation** motions similar to those observed with spinning tops.

A consequence of the fact that the Earth revolves around the Sun on an elliptical trajectory with a variable speed (**Fig. 9**) is that the duration of the solar day is not constant. This means that, for example, on February 21st, the time that elapses between 9 and 10 in the morning is not the same as the time (measured with a mechanical or electronic watch) that elapses between 9 and 10 in the morning on November 18th. To determine its duration, each time interval must be related to its date. This is not practical in everyday life, which is why the mean solar day was defined as the duration between two consecutive culminations of the Sun, assuming that the Earth moves at a constant speed around the Sun following a circular trajectory instead of an elliptical one (**Fig. 10**).

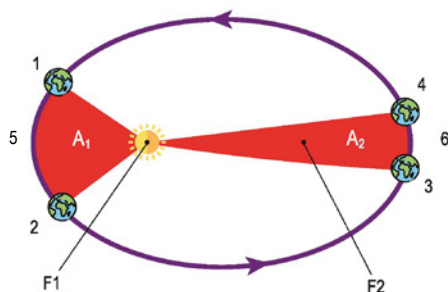


Fig. 9 Diagram of the Earth's translational motion around the Sun. According to Kepler's second law, if the time required for the Earth to move from point **1** to point **2** is the same time required to move from point **3** to **4**, then areas **A1** and **A2** are equal. The **translational velocity** of the Earth is greater at the **perihelion** (**5**) than at the **aphelion** (**6**). For clarity, the ellipse was drawn with a much greater **eccentricity** than the real ellipse. **F1** and **F2** are the foci of the ellipse.

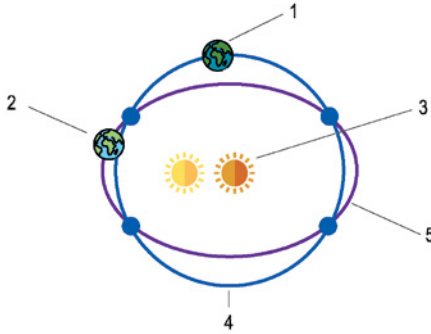


Fig. 10 To define the **mean solar time**, whose duration does not change depending on the date, an imaginary Earth (1) is assumed that, unlike the real Earth (2), has no **precession** motion and rotates at a constant speed around an imaginary Sun (3) on a circumference (4), instead of moving with variable velocity following an elliptical trajectory (5). The **eccentricity** of the ellipse shown in this diagram does not coincide with the actual eccentricity, which is very small (approximately 0.0167).

The difference between solar time and mean solar time, called the **equation of time**, is variable, that is, it depends on the date. As shown in **Figure 11**, this difference can be more than 16 minutes. In four days of the year (red dots), this difference is practically zero.

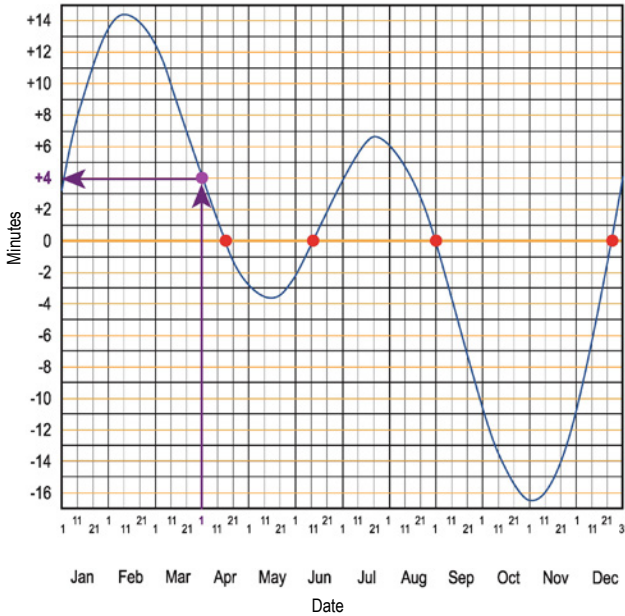


Fig. 11 Graph of the **equation of time**, showing the number of minutes that, depending on the date, must be added or subtracted from the standard time or the daylight saving time seen on the sundial (scales with Arabic numerals) to obtain the **official time**, which is what our commonly used watches display.

11.2 Time zones and Greenwich mean time

To know the **official time** in a certain place, it is important to remember that for practical reasons, the world was imaginarily divided into 24 **time zones**, that is, 24 regions within which it is assumed that the time does not change. A **meridian** was drawn every 15° toward the east and west of the **zero meridian** or **Greenwich meridian (Fig. 12)**, which passes through the Royal Observatory in Greenwich, near London (<https://www.rmg.co.uk/royal-observatory>). This observatory, founded in 1675, is another museum worth visiting (**Fig. 13**).

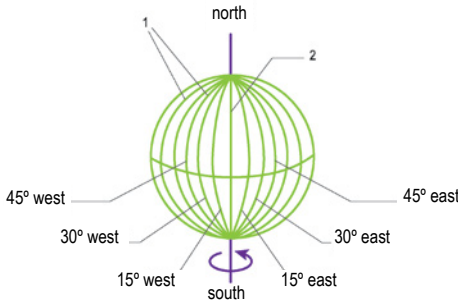


Fig. 12 Diagram showing the distribution of the **meridians (1)** to the east and west of the **Greenwich meridian (2)**.



Fig. 13 Photograph of one of the buildings of the former Royal Observatory of Greenwich, showing a metallic strip (arrow) that supposedly coincides with the **zero meridian**. It is worth mentioning that when there were not sufficiently accurate measurements, it was chosen to locate the zero meridian line here; however, the true zero meridian passes 102 meters from the observatory.

There is a difference of one hour between one time zone and the next. When traveling from one time zone to another in an east (west) direction, one hour must be added (subtracted). The need for such a convention, established at the International Meridian Conference, held in 1884 in Washington D.C., arose with the development of means of transport. Being able to travel greater distances in increasingly shorter times turned out to be confusing when two cities only a few tens of kilometers apart had different times.

Regardless of whether we travel to the east or west, sooner or later, we will arrive at the 180° meridian, called the **international date line**. When crossing this meridian, the date must be changed by one day. For convenience, in several regions, the demarcations of the time zones follow political boundaries. Figure 14 shows the case for Mexico.

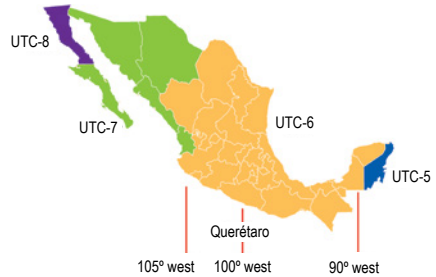


Fig. 14 Time zones in Mexico. Their official names are southeast time (UTC-5), central time (UTC-6), Pacific time (UTC-7) and northwest time (UTC-8). Note the distance between the **meridian** that governs the time in Querétaro (90° west) and the location of Querétaro.

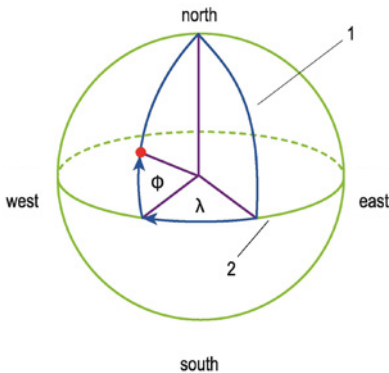


Fig. 15 Diagram showing how the **geographic longitude** (angle λ) is defined with respect to the **Greenwich meridian** (1) and the **geographic latitude** (angle ϕ) with respect to the equator (2).

The Greenwich meridian is used as a reference to know the **geographic longitude** of a site, that is, the distance to the east or west that exists between a given position and the aforementioned meridian. The second coordinate, required to fix a certain position on the Earth, is the geographic latitude, which specifies the angle, to the south or north, from the Earth's equator, whose latitude is defined as 0° (**Fig. 15**). Generally, both coordinates are given in degrees. In the case of the CFATA sundial, the latitude and longitude are equal to $\phi = 20^\circ 42' 5''$ north (20.7014° N) and $\lambda = 100^\circ 26' 49''$ west (100.447° W), respectively.

The meridian that governs the time in central Mexico and, therefore, in Querétaro is the 90° west meridian; the clocks in London are 6 hours ahead of those in Querétaro. The time in this part of our country is called UTC-6; that is, 6 hours must be subtracted from Greenwich time to obtain the time in Mexico. **Coordinated universal time (UTC)** is internationally recognized to define the time in each time zone. In Mexico, it is run by the National Metrology Center (CENAM).

Greenwich mean time (GMT) originally referred to the mean solar time in Greenwich. With the advent of quartz and atomic clocks, it was detected that the Earth's rotation is not constant. Although the variations are extremely small, they influence navigation and the operation of **GPS** equipment. Because of this, in 1972, the UTC was adopted, which uses the atomic definition of the duration of one second.

To compensate for the difference that arises because the Earth does not rotate at a constant speed, twice a year a second is added or subtracted from the time displayed (conserved) by atomic clocks. In this way, the UTC is obtained. The adjustments are programmed so that the difference between UTC and GMT never exceeds 0.9 seconds. Obviously, these adjustments are irrelevant when observing the time on a sundial.

11.3 The official time

The official time, also called **legal time** or **civil time**, is the time displayed by our watches, cell phones and computers. It is adopted by the government of each country and is based on a specific meridian. As mentioned above, the official time in Querétaro (UTC-6) corresponds to the time for the 90° west meridian.

Local time is not necessarily equivalent to the official time. Local time refers to the geographic longitude of a specific location, for example, that of an airplane in flight over the ocean.

11.4 Daylight saving time

Daylight saving time was introduced in some countries during the First World War. In Mexico, except for the border with the United States and the states of Quintana Roo and Sonora, daylight saving time begins on the first Sunday of April at 2:00 **a.m.** and ends on the last Sunday of October at 2:00 a.m. The time and the day of the week for making this change were chosen for practical reasons. By convention, in the aforementioned border zone, daylight saving time begins on the second Sunday of March at 2:00 a.m. and ends on the first Sunday of November at 2:00 a.m. Sonora and Quintana Roo do not observe daylight saving time. During daylight saving, in Querétaro, the time is called UTC-5.

By advancing watches to daylight saving time, dawn and dusk occur later, thus allowing an additional period of sunlight in the afternoon. The main advantage of this practice is a considerable saving of electrical energy at a national scale due to the use of natural light in the afternoons. Currently, daylight saving time is applied in much of North America, Europe, and some countries in Oceania, as well as in Cuba, Chile, Paraguay, Haiti and the Bahamas.

III. How does a sundial work?

A sundial is based on the apparent motion of the Sun in the **celestial vault**. In principle, the projection of the shadow of any object on a surface can be used to measure the passage of time. From experience, we all know that as the day passes, the shadows cast by the Sun become shorter. At noon they are at their shortest. After this moment, they again lengthen until the setting of the Sun. In addition, the direction of the shadows also changes throughout the day, always being on the opposite side of the Sun. During **solar noon**, the shadows align in a north-south direction. If the shadow is projected by a vertical rod, one of its ends will point toward the **geographic north** and the other toward the **geographic south**.

For design purposes and ease of reading, the gnomon and the dial plate of a sundial should have a certain shape and orientation. Generally, the gnomon is a thin object. In most large sundials, it is a straight-edged rod or structure that produces a well-defined shadow. Other designs have holes or grooves that project luminous markings within the shadow of a larger element, such as a disk.

Due to the enormous distance between the Earth and the Sun, if the gnomon is oriented parallel to the rotational axis of the Earth, it can be assumed that the Sun revolves around it, making one complete revolution per day. This facilitates the design of the sundial. **Figure 16** shows that after solar noon, when the Sun continues its apparent motion toward the west, the shadow of the gnomon advances toward the east.

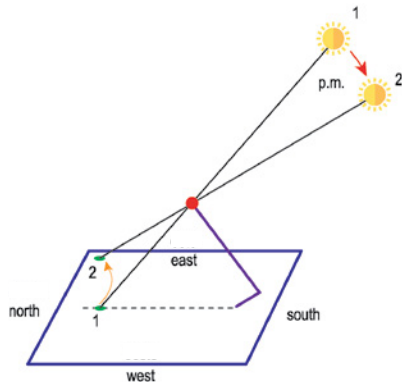


Fig. 16 Shadow of the tip of a gnomon on a horizontal surface during the apparent shift of the Sun from east to west, starting from **solar noon (1)** until the afternoon **(2)**.

Sundials are extremely precise because their “regulating organ” is the rotation of the Earth around its axis. They are more accurate than many quartz watches; however, their **resolution** depends on the size of the dial plate, the sharpness of the shadow as well as the thickness and shape of the gnomon.

IV. How does one tell the time?

The CFATA sundial is horizontal (approximately 6 by 6 meters), having a 5.5-meter-long gnomon. Its tip sits at 2.23 meters high (**Fig. 17**). If desired, the visitor can walk on the dial plate.

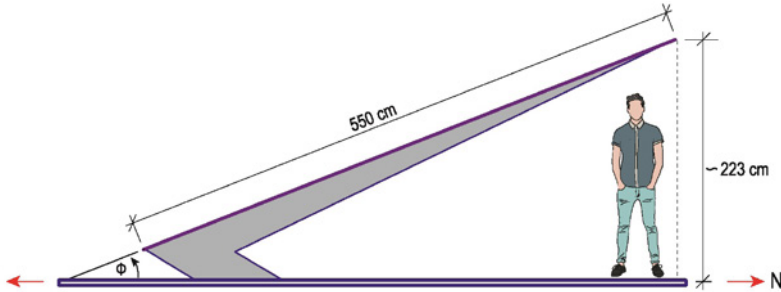


Fig. 17 Diagram of the gnomon. The angle ϕ corresponds to the **geographic latitude** of the CFATA (approximately 20.7° N). To determine the time, the shadow cast by the upper edge of the gnomon (purple) on the dial must be observed.

The shadow cast by the upper edge of the gnomon on the dial plate indicates three types of time (**Fig. 18**). The scale with Roman numerals shows the solar time so that the solar noon corresponds to the instant at which the shadow of the style coincides with the **XII**. As the year progresses, the length of the gnomon shadow varies, with the shortest at the **summer solstice** and the longest at the **winter solstice**.

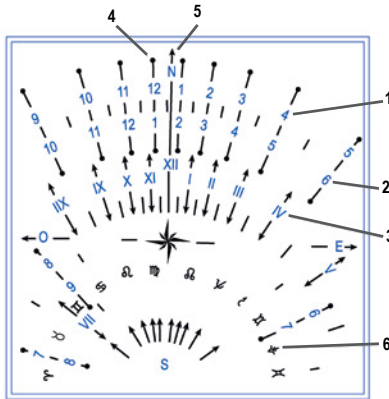


Fig. 18a The scale marked with the number **1** shows the **solar time** of the 90° west **meridian** in winter. For day-light saving time, scale **2** should be used. The lower scale (Roman numerals) shows the solar time at the CFATA (**3**). Note that the **solar noon** corresponding to the 90° west meridian (**4**) is ahead of the solar noon at the CFATA (**5**). The **zodiac signs** are displayed in the southern section of the dial (**6**).



Fig. 18b Photograph of the sundial at the CFATA. The details of the dial are described in **Fig. 18a**.

The scale with Arabic numbers in the northern part of the dial shows the solar time of the meridian that governs the time in the center of the country during winter. For daylight saving time, the intermediate scale should be used.

As the geographic longitude of the CFATA is approximately 100° west, there is a significant difference between the solar time at the 90° west meridian and the solar time at the site of the sundial (**Fig. 14**). If at the 90° west meridian it is solar noon, the Earth still has to rotate more than 10° for it to be noon in Juriquilla. Therefore, both scales with Arabic numerals are shifted almost 42 minutes with respect to the Roman numerals (1° is equivalent to 4 minutes of time).

As mentioned above, approximately on April 15th, June 15th, September 1st and December 25th does the time indicated on the scales with Arabic numerals coincide with the legal time (as displayed by our mechanical and electronic watches). For any other day, the number of minutes that, based on the date, appear in **Table 1** must be added or subtracted. This difference can also be estimated from the equation of time shown in **Figure 11**.

Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s	m/s
1	3/2	13/26	12/25	3/59	-2/53	-2/17	3/43	6/17	0/4	-10/14	-16/22	-11/2
2	3/29	13/36	12/15	3/40	-3/1	-2/8	3/54	6/14	-0/15	-10/34	-16/24	-10/40
3	3/59	13/44	12/2	3/23	-3/7	-1/58	4/6	6/9	-0/34	-10/52	-16/24	-10/16
4	4/28	13/51	11/50	3/6	-3/13	-1/48	4/17	6/4	-0/54	-11/11	-16/24	-9/52
5	4/54	13/57	11/36	2/48	-3/19	-1/38	4/28	5/58	-1/14	-11/29	-16/23	-9/28
6	5/21	14/3	11/23	2/31	-3/24	-1/27	4/37	5/52	-1/34	-11/46	-16/21	-9/3
7	5/48	14/7	11/9	2/14	-3/28	-1/16	4/49	5/45	-1/54	-12/5	-16/18	-8/38
8	6/14	14/11	10/54	1/57	-3/32	-1/5	4/57	5/38	-2/15	-12/22	-16/15	-8/12
9	6/39	14/14	10/38	1/41	-3/35	-0/53	5/6	5/29	-2/36	-12/39	-16/10	-7/45
10	7/4	14/16	10/24	1/24	-3/38	-0/42	5/15	5/21	-2/57	-12/55	-16/5	-7/18
11	7/29	14/17	10/8	1/8	-3/40	-0/30	5/23	5/12	-3/18	-13/11	-15/59	-6/51
12	7/54	14/17	9/52	0/52	-3/41	-0/18	5/31	5/2	-3/39	-13/26	-15/52	-6/23
13	8/17	14/17	9/36	0/37	-3/42	-0/5	5/38	4/51	-4/0	-13/41	-15/48	-5/55
14	8/40	14/16	9/20	0/22	-3/43	0/7	5/45	4/40	-4/21	-13/55	-15/36	-5/27
15	9/2	14/14	9/3	0/7	-3/43	0/20	5/52	4/29	-4/42	-14/9	-15/26	-4/58
16	9/23	14/11	8/46	-0/8	-3/42	0/32	5/58	4/17	-5/4	-14/22	-15/15	-4/29
17	9/44	14/8	8/28	-0/21	-3/41	0/45	6/3	4/4	-5/25	-14/35	-15/4	-4/1
18	10/5	14/4	8/11	-0/36	-3/39	0/58	6/8	3/52	-5/48	-14/47	-14/52	-3/30
19	10/24	13/59	8/53	-0/49	-3/37	1/11	6/12	3/39	-6/8	-14/59	-14/38	-3/1
20	10/42	13/53	7/36	-1/2	-3/34	1/24	6/14	3/24	-6/29	-15/9	-14/25	-2/31
21	10/42	13/48	7/18	-1/15	-3/30	1/37	6/19	3/10	-6/50	-15/19	-14/10	-2/1
22	10/42	13/41	7/0	-1/27	-3/26	1/50	6/22	2/55	-7/12	-15/28	-13/55	-1/31
23	10/42	13/34	6/42	-1/39	-3/21	2/3	6/24	2/40	-7/33	-15/37	-13/39	-1/1
24	11/48	13/26	6/22	-1/50	-3/16	2/16	6/26	2/24	-7/53	-15/45	-13/22	-0/31
25	12/6	13/17	6/5	-2/0	-3/10	2/29	6/27	2/8	-8/14	-15/52	-13/4	-0/1
26	12/19	13/8	5/47	-2/11	-3/4	2/42	6/27	1/51	-8/35	-15/58	-12/45	0/29
27	12/32	12/59	5/29	-2/20	-2/58	2/55	6/27	1/34	-8/55	-16/4	-12/26	0/58
28	12/45	12/48	5/11	-2/29	-2/50	3/7	6/26	1/17	-9/15	-16/9	-12/6	1/28
29	12/57	12/36	4/53	-2/38	-2/44	3/18	6/25	0/59	-9/35	-16/14	-11/45	1/57
30	13/8		4/36	-2/46	-2/35	3/33	6/23	0/41	-9/55	-16/17	-11/24	2/26
31	13/18		4/17	-2/26			6/21	0/23		-16/20		2/55

Table I. Mean values (minutes/seconds) of the equation of time for each day of the year.

V. Curiosities of the CFATA sundial

During the first few years after its construction, the CFATA building had a reflecting pool in each of its central gardens. Over time, both ceased to work. One of them was used to build the sundial described here. The other will be used as the plate of a solar calendar. The sundial was built to commemorate the tenth anniversary of the Center.

One of the challenges of the project was orienting the gnomon. It had to point exactly to the geographic north. A magnetic compass was not sufficiently reliable due to the deviations it is subject to from the surroundings. Further, the height of the CFATA building prevented using the pole star as a reference. It was also not possible to use the **GPS** because to draw a north-south line, a greater free distance would have been required than that existing in the interior garden. Therefore, a solar compass was used. In principle, the idea is simple. If with a properly aligned sundial the time can be determined, then the reverse is also possible: knowing the exact time, a sundial can be oriented (**Fig. 19**). With this method, a reference thread was pulled with a north-south direction over the plate of the sundial under construction.

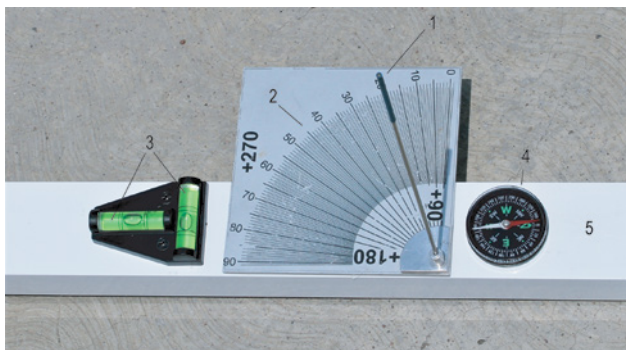


Fig. 19 Photograph of the solar compass used to draw a north-south line, showing its gnomon (1), its dial (2), two bubble levels (3), a magnetic compass (4) and the long aluminum conduit (5) on which these elements were mounted.

Prior to welding the gnomon to a steel plate, a plumb line was hung from the tip of the gnomon to verify that it coincided with the north-south line. In addition, it was necessary to confirm that precisely at solar noon, the shadows of the gnomon and the plumb line were projected on the aforementioned thread. As a last step, it was verified that the angle formed by the upper edge of the gnomon with the plane of the dial plate coincided with the geographic latitude (**Fig. 20**). In this way, the upper edge of the gnomon was parallel to the axis of rotation of the Earth. **Figure 21** shows a few stages of construction.



Fig. 20 Inclinometer used to verify that the upper edge of the **gnomon** formed an angle of 20.7° with respect to the horizontal plane.



Fig. 21 (a)



Fig. 21 (b)



Fig. 21 (c)



Fig. 21 (d)

Fig. 21 Images showing different stages of the construction of the CFATA sundial. **(a)** Preparing the foundations for the **gnomon**. **(b)** Pouring the concrete for the base of the dial. **(c)** Holding the gnomon to weld it. **(d)** Affixing the stainless-steel symbols and numbers to the dial, weighting them with sand bags.

As seen in **Figure 18**, the plane of the gnomon is not parallel to the east and west sides of the dial plate. Due to this, the hourly lines are asymmetrical. In addition, the gnomon is displaced to the west. The reason for this is that the sundial should show the time during the busiest hours of the day.

The **zodiac signs** around the base of the style (**Fig. 18**) serve only a decorative purpose and recount the historical relationship between astrology and astronomy; however, it should be kept in mind that astrology is not a science.

VI. Final comments

Sundials continue to be admired, even used as instruments of ancient times. From the didactic point of view, they motivate teaching through the inclusion of a variety of interesting concepts. Primary and secondary school teachers can enrich their natural science classes by making simple sundials with their students using homemade materials. In high schools and universities, there will be students who are interested in understanding aspects of chronometry, applying their mathematical knowledge to a specific problem and even designing and constructing a sundial for their school.

In addition to their history and inherent teaching potential, sundials have another peculiarity. As the motion of the Sun and the Earth are harmonic, their dial plates generally have a certain aesthetic. This probably contributes to the affection that artists, amateur astronomers and the general public have for them in many countries.

It is often the case that sundials are unfairly judged. For those sundials that only indicate the solar time, when comparing the sundial time with that of a wristwatch or cell phone, visitors conclude that the sundial does not work correctly. The fact is that both types of clocks, i.e., “artificial” (mechanical, electronic or atomic) and “natural” (solar) clocks, display the time correctly. They simply show different types of time.

Sundials have two advantages over other clocks, either ancient, such as those of sand, water and fire, or more recent, such as mechanical or electronic watches. Sundials do not consume energy, and time does not need to be adjusted. Determining or “finding” the time involves knowing the hour through the position of the Sun (or the stars) without consulting a master clock. In this context, other clocks, including atomic clocks, can be called “timekeepers” because they only keep the time. Sundials fulfill both functions: they both determine and “keep” time. Obviously, they stop working when the sky is clouded or the Sun is hidden, but when its dial is illuminated again, the exact time appears.

VII. Abbreviations and glossary of terms

a.m.: See **ante meridiem**.

Analemma: From the Greek “sundial pedestal”; however, it refers to the figure-8 loop (**lemniscate**) that results when the position of the Sun is observed (photographed) each day at the same time from the same position.

Analemmatic sundial: Sundial on which the **gnomon** is not fixed. It is placed vertically according to the date. In some large sundials, the gnomon may be the visitor, that is, their shadow shows the time.

Ante meridiem: Refers to any time between 00:00 and 12:00 hours.

Aphelion: Point on the elliptical trajectory at which the Earth is farthest from the Sun.

Astrolabe: The astrolabe (from the Greek “star-tracker”) is an instrument that was used to determine the position of a star on the **celestial vault** to find the **geographic latitude** of a site, knowing the time. It was also used to determine the time, knowing the latitude.

Astronomical noon: See **solar noon**.

Babylonian hour: The Babylonian hour results from dividing the **solar day** into 24 hours, starting at sunrise.

Bifilar sundial: A sundial without a **gnomon** on whose dial time is shown by the shadow of the intersection of two non-touching threads or thin chains, suspended parallel to the dial. One thread is aligned in the north-south direction and the other one in the east-west direction. It may be designed to show all types of time mentioned in this guide for other sundials.

Celestial equator: An imaginary circle that results from extending the plane of the Earth's equator to “cut” the **celestial vault**, splitting it into two hemispheres. It is assumed that its center coincides with the center of the Earth. It has an inclination of approximately 23° 27' with respect to the **ecliptic**.

Celestial vault: In astronomy, it is defined as an imaginary sphere concentric with the Earth, on which celestial objects (stars, planets, comets, etc.) apparently move. It does not have a defined radius.

Civil time: See **official time**.

Constellation: Grouping of stars that, when joined by imaginary lines, apparently form silhouettes of beings or objects projected upon the **celestial vault**. Although several civilizations have imagined diverse constellations in astronomy, only 88 constellations are used. In this way, each point on the celestial vault is within one of these 88 regions.

Coordinated universal time (UTC): Given that the rotation of the Earth on its axis is not uniform, small differences arise between **UTC** and **GMT**. To synchronize both times, one second is usually added or subtracted from the UTC. This decision is made by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) based on means of dozens of atomic clocks installed in different parts of the world, including CENAM. It is the time at which most clocks are currently based. It never differs from GMT by more than 0.9 seconds. The acronym UTC (*coordinated universal time*), which in English does not correspond to the acronym in the expected order, was defined as a compromise between English and French (*temps universel coordonné*).

Culmination: This refers to the maximum **solar altitude** or any celestial body above the horizon, that is, when the celestial body crosses the local **meridian**, there is an imaginary circle that passes through the **zenith** and unites the north with the south.

Declination: Angle formed by the position of an object with the equator of the **celestial vault**. It is positive north of the **celestial equator** and negative toward the south. Together with the **right ascension**, it forms a coordinate system used in astronomy to locate objects in the celestial vault. In the **equinoxes**, the declination is zero, while in the summer solstice, its value is approximately $+23^{\circ} 27'$, and in the winter solstice, it is approximately $-23^{\circ} 27'$.

Eccentricity: It refers to the degree of deviation with respect to a circumference. In astronomy, a null eccentricity (**e**) would mean that a celestial body revolves around another on a circumference. Values of **e** between 0 and 1 correspond to elliptical orbits.

Ecliptic: From the Greek *ekleipsis* meaning “abandonment”. It refers to the curve resulting from the intersection of the plane of the Earth’s orbit with the **celestial vault**.

Equatorial sundial: Sundial having the **gnomon** aligned with the Earth’s rotational axis. The dial can be parallel (**Fig. 6**) or perpendicular to the gnomon’s style. All hour-lines on the dial are spaced 15 degrees apart.

Equation of time: Difference between **solar time** and **mean solar time**. This difference varies from one moment to another. Given the resolution of sundials, graphs (**Fig. 11**) or tables (see **Table 1**) are generally used in gnomonics that, depending on the date, show the number of minutes that must be added or subtracted from the solar time to obtain the mean solar time.

Equinox: From the Latin “equal night”. It refers to the two days of the year (fall equinox

and spring equinox) on which day and night have the same duration. Equinoxes occur at the instant at which the Sun is on the plane of the Earth's equator.

First point of Aries or vernal point: Point on the **ecliptic** at which the Sun passes from the southern celestial hemisphere to the northern celestial hemisphere. This happens precisely on the vernal equinox. Currently, this point is in the **constellation** of Pisces.

Geographic latitude: Measurement of how far north or south of the terrestrial equator a site is located. It is measured in degrees.

Geographic longitude: Measure of how far west or east of the **zero meridian** a site is. It is measured in degrees.

Geographic north: Refers to the place through which the imaginary axis of rotation of the Earth passes in the north.

Geographic north pole: See **geographic north**.

Geographic south: Refers to the place through which the imaginary axis of rotation of the Earth passes in the south.

Geographic south pole: See **geographic south**.

GMT: See **Greenwich mean time**.

Gnomon: From the Greek "guide" or "teacher". Refers to the object (style) that casts the shadow on the dial plate of a sundial.

Gnomonics: Science that studies the design, construction and operation of sundials.

GPS: Global positioning system.

Greenwich mean time: **Official time** in the United Kingdom.

Greenwich meridian: See **zero meridian**.

Heliochronometer: Sundial to determine the **solar time** and the **official time** with a precision superior to 5 minutes.

International date line: Imaginary line running between the **geographic north pole** and the **geographic south pole** coinciding with the 180° **meridian**; that is, it is the antimeridian of the **Greenwich meridian**. Given that crossing this line implies changing the date one day, the countries through which the 180° meridian crosses, for practical reasons, have decided to place themselves on one day or the other.

Legal time: See **official time**.

Lemniscate: From Latin *lemniscatus*, which means “ribboned”. Refers to the curves in the shape of a figure-8.

Local time: This refers to the **meridian** of the place, that is, to a specific position.

Mean sidereal day: Time needed for the Earth to rotate once around its axis without considering **nutatation** motion. Its duration does not vary. It is equivalent to 23 hours 56 minutes and 4.091 seconds, that is, approximately 4 minutes less than the **mean solar day**.

Mean sidereal time: Refers to the time based on the **mean sidereal day**.

Mean solar day: Time that was defined assuming that an imaginary Sun travels the **celestial vault** with a uniform velocity. Its hours are constant.

Mean solar time: This is the time that results from defining the existence of a fictitious Earth that revolves around the Sun at a constant speed. Its duration does not change as the year passes.

Meridian: From the Latin *meridies*, which means “midday”. It can be visualized as the shadow cast by a thin straight rod at the instant of **solar noon**.

Nutation: From the Latin *nutatio*, which means “nodding”. It is a rocking motion in the axis of rotation. Nutation is added to **precession**. It can be visualized as a meandering superimposed on the precessional motion of the Earth’s axis of rotation. It arises due to the gravitational attraction between the Moon and the Earth and the nonspherical shape of the Earth.

Official time: Time that our daily watches show.

Perihelion: Point on the elliptical trajectory at which the Earth is closest to the Sun.

Precession: Slow shift in the orientation of the Earth’s rotational axis, similar to the motion of the rotational axis of a spinning top. This is due to the gravitational forces of the Sun and the Moon, as well as the nonspherical shape of the Earth. The precession period of the Earth’s axis is approximately 26,000 years.

Resolution: Refers to the minimum detectable reading, that is, to the minimum separation between the markings on the dial.

Right ascension: Angular distance measured along the **celestial equator** from the **first point of Aries**. Together with **declination**, it forms a coordinate system used in astronomy to locate objects in the **celestial vault**.

Sextant: Instrument designed to determine the angular distance between two objects, for example, two specific points on the coast or the Sun and the horizon. Due to its precision,

it replaced the **astrolabe**. Before the implementation of the **GPS**, it was the instrument mostly used to determine the location of a ship at sea. This also required an almanac and a chronometer.

Sidereal day: Formally, it is defined as the time elapsed between two successive **culminations** of the **first point of Aries**.

Solar altitude: “Distance” between the horizon and the Sun. It is given in degrees. It is also defined as the angle of incidence of the solar rays with respect to the horizontal.

Solar day: Time that elapses between two consecutive **culminations** of the Sun, or the time it takes the Sun to pass twice in a row through a specific position.

Solar noon: The moment at which the Sun is closest to the **zenith** and crosses the **meridian**. At that time, the shadows are at their shortest. Corresponds to noon of the **solar time**. In **gnomonics**, the term solar noon is generally used because **astronomical noon** is relative to the star that is referenced.

Solar time: The solar time, also called **true solar time**, is the time that a sundial shows based on the apparent motion of the Sun. When the Sun passes through the **meridian** of a certain place, it is noon (12:00 hours) of the solar time, called **solar noon**. The length of **solar days** and, consequently, of the solar times depends on the date.

Summer solstice: From the Latin *solstitium*, which means “standing sun”. The summer solstice is the moment at which the Earth is farthest from the Sun, that is, at the **aphelion**. At that instant, the **declination** of the Sun is $+23^{\circ} 27'$. In the Northern Hemisphere, it coincides with the beginning of summer, which is the longest day of the year.

Time zone: One of the 24 imaginary regions (segments) in which the Earth has been divided. Each time zone covers 15° and is equivalent to one hour. By definition, the time within each time zone is the same.

Translational velocity: Refers to the velocity of the Earth on its elliptical trajectory around the Sun. Its maximum value (at **perihelion**) and minimum value (at **aphelion**) are approximately 30.75 and 28.76 km/s, respectively.

True solar day: See **solar day**.

True solar time: See **solar time**.

UTC: See **Coordinated Universal Time**.

Winter solstice: From the Latin *solstitium*, which means “standing sun”. The winter solstice is the moment at which the Earth is closest to the Sun, that is, at **perihelion**. The **declination** of the Sun is $-23^{\circ} 27'$. In the Northern Hemisphere, it coincides with the beginning of winter, which is the shortest day of the year.

Zenith: Point at which the vertical of a site crosses the **celestial vault**.

Zero meridian: Imaginary line going from the **geographic north pole** to the **geographic south pole**, passing through the Royal Observatory in Greenwich, United Kingdom. It divides the Earth into the eastern and western hemispheres.

Zodiac signs: The zodiac signs (Aries, Taurus, Gemini, Cancer, Leo, Virgo, Libra, Scorpio, Sagittarius, Capricorn, Aquarius and Pisces), from the Greek “circle of little animals”, are 12 sectors forming an imaginary band in the **celestial vault**. The width of this belt, centered on the **ecliptic**, is 18° . Each of the 12 sectors (signs) was arbitrarily assigned 30° . It can be confusing that a given zodiac sign and the **constellation** of its same name currently cover different areas of the celestial vault. This is because due to the **precession** motion, the position of the constellations changes slowly, that is, it shifts slightly over time on the background of the sky. The name of each sector (zodiac sign) was assigned thousands of years ago based on the constellation that was seen at that time. Some texts consider a thirteenth zodiac sign (Ophiuchus) between November 29 and December 17. In fact, the ecliptic currently straddles the constellation of Ophiuchus. It should be borne in mind that the figures that we imagine in the celestial vault are formed by extremely distant stars and that, seen from a position other than that of the Earth, they cannot necessarily be seen as figures. In other cultures, such as China, zodiac signs were defined differently.

VIII. References

Bertrán de Quintana, M. *El Sol en la Mano: Estudios de Iluminación, Orientaciones y Relojes Solares*. Ediciones de la Universidad Nacional, Mexico City, 1937.

Blateyron, F. *Shadows Pro 4.0*, Paris, 2015 (www.shadowspro.com).

Dohrn-van Rossum, G. *History of the Hour: Clocks and Modern Temporal Orders*. University of Chicago Press, Chicago, IL, 1996.

Drecker, J. *Die Theorie der Sonnenuhren*. Vereinigung Wissenschaftlicher Verleger W. de Gruyter, Berlin, Leipzig, 1925.

Hose, C., McDougall, W. *The Pagan Tribes of Borneo*. MacMillan and Co., Ltd., London, 1912, p. 97-115.

Jespersen, J., Fitz-Randolph, J. *From Sundials to Atomic Clocks: Understanding Time and Frequency*. National Institute of Standards and Technology, monograph 155, Washington DC, 1999.

King, M.A. *Designing Sundials: The Graphic Method*. Algrove Publishing, Ontario, 2007.

Landes, D.S. *Revolución del Tiempo: El Reloj y la Formación del Mundo Moderno*. Crítica S.L., Barcelona, 2007.

Loske, L.M. *Die Sonnenuhren*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2nd ed., 1970.

Loske, L.M. *Cronometría: del Obelisco al Reloj de Cuarzo y Atómico*. Editorial Impulso, Mexico City, 1979.

Loske, L.M. *Ars Temporis: el Arte de la Medición del Tiempo*. Colección Editorial de Arte Chrysler, Mexico City, 1992.

Loske, A.M. *The equatorial sundial at Frankfurt am Main, Germany*. *Compendium of the North American Sundial Society* 6(3): 12-14, 1999.

Mayall, R.N., Mayall, M.W. *Sundails – Their Construction and Use*. Dover Publications Inc, Mineola, NY, 2000.

Miranda, A.L. *Relojes de Sol y la Medida del Tiempo*. Editorial Marcombo, Barcelona, 2015.

Miranda, A.L., Pereira, J.E. *Diseño de Relojes de Sol*. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. Mexico City, 2018.

Rohr, R.R. *Sundials – History, Theory and Practice*. Dover Publications Inc., Mineola, NY, 1996.

Schechner, S.J. The material culture of astronomy in daily life: sundials, science, and social change. *Journal for the History of Astronomy*, 32(108):189-222, 2001.

Schechner, S.L. *Time and Time Again: How Science and Culture Shape the Past, Present, and Future*. Collection of Historical Scientific Instruments, Harvard University, Cambridge, MA, 2014.

Scott, D. Sundials in Anglo-Saxon England. *British Sundial Society Bulletin*, 11:4-8, 1999.

Severino, N. *Gnomonica Cinese: Introduzione alla cultura gnomonica della civiltà cinese*. Academia.edu, Roccasecca, 1997.

Soler Gayá, R. *Diseño y Construcción de Relojes de Sol: Prontuario para la Construcción de Relojes de Sol con la Justificación de los Métodos y Fórmulas*. Turner, Madrid, 1989.

Soler Gayá, R. *Diseño y Construcción de Relojes de Sol y Luna: Métodos Gráficos y Analíticos*. Colegio de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, 1997.

Waugh, A. *Sundials – Their Theory and Construction*. Dover Publications Inc., Garden City, NY, 1973.

Zinner, E. *Deutsche und Niederländische Astronomische Instrumente des 11. bis 18. Jahrhunderts*. Becksche Verlagsbuchhandlung, Munich, 1956.