

EXPERIMENTOS SIMPLES PARA ENTENDER UNA TIERRA COMPLICADA

6

La Medición de la Tierra

Texto: Mariano Cerca y Dora Carreón-Freyre
Ilustración: Claudia Cuadra

Universidad Nacional Autónoma de México



Dr. José Narro Robles
Rector

Dr. Sergio M. Alcocer Martínez de Castro
Secretario General

Mtro. Juan José Pérez Castañeda
Secretario Administrativo

Dra. Rosaura Ruiz Gutiérrez
Secretaria de Desarrollo Institucional

Dr. Carlos Arámburo de la Hoz
Coordinador de la Investigación Científica

Dr. Gerardo Carrasco Núñez
Director del Centro de Geociencias

Lic. David Turner Barragán
Director General de Publicaciones y Fomento Editorial

Dra. Susana A. Alaniz Álvarez
Dr. Ángel F. Nieto Samaniego
Dr. Manuel Lozano Leyva
Coordinadores de la Serie

Lic. Claudia Cuadra
Diseño y formación

Primera edición, Septiembre 2009
Primera reimpresión, Mayo 2010

D.R. © Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510, México D.F.

Centro de Geociencias
Universidad Nacional Autónoma de México
Boulevard Juriquilla núm. 3001, Juriquilla, Querétaro
C.P. 76230, México

ISBN (Obra General) 978-970-32-4388-4
ISBN 978-607-02-0662-7

Impreso y hecho en México

Este libro no puede ser reproducido, total ni parcialmente, por ningún medio electrónico o de otro tipo, sin autorización escrita de los editores.





Índice

Introducción

pag. 1

Las primeras mediciones

pag. 4

Experimento 1: La medición de la circunferencia de la Tierra

pag. 8

Experimento 2: Rayos paralelos y divergentes

pag. 11

Experimento 3: Explorar para hacer un mapa

pag. 12

Experimento 4: Medir hacia el interior de la Tierra

pag. 15

Experimento 5: Medición de distancias con ondas

pag. 16

Experimento 6: Medir el contenido de agua del suelo

pag. 20

Experimento 7: Medir la consistencia del suelo

pag. 22

Experimento 8: Medir la consistencia de los materiales geológicos

pag. 25

Agradecimientos

pag. 28

Acerca de los autores

pag. 29



Introducción

Desde su origen, la humanidad ha tratado de entender la Tierra, cuál es su composición, forma y cómo se mueve. El desarrollo de sistemas de medición ha sido fundamental para satisfacer estas inquietudes, y en algunas ocasiones tales mediciones se han hecho de manera ingeniosa y creativa. Medir consiste en encontrar la proporción existente entre un objeto y una unidad de medida. Por ejemplo, utilizamos una regla para medir longitudes. Pero en ocasiones no es posible aplicar la unidad de medida de forma directa, y cuando esto sucede, se pueden medir algunas dimensiones para calcular indirectamente otras que queremos obtener.

¿Te imaginas lo difícil que sería medir la distancia entre tu casa y la escuela con una regla? ¿la distancia a la Luna? ¿o la altura de un edificio o montaña? En esta ocasión te queremos contar uno de los experimentos más ingeniosos que se han hecho para medir de manera indirecta la circunferencia de la Tierra. También te mostraremos algunas mediciones de propiedades interesantes de nuestro planeta, las cuales se hacen dentro de disciplinas como la Geografía, Geología, Geofísica o Mecánica de Suelos.

Eratóstenes de Cirene

Eratóstenes fue un sabio griego que estuvo a cargo de la Biblioteca de Alejandría a mediados del siglo tercero antes de nuestro tiempo, es decir, hace 2249 años. Además de *Astronomía* estudió otras disciplinas como Geografía, Filosofía y Poesía; y se dice que era muy inteligente, por lo que sus contemporáneos le llamaban Beta, β , la segunda letra del alfabeto griego, jera el segundo mejor en todo lo que hacía!



A Eratóstenes se le atribuye la invención de la esfera armilar: un instrumento formado por anillos metálicos que giran con diferentes velocidades alrededor de un centro común. En el tiempo de Eratóstenes se pensaba que la Tierra estaba en el centro de un sistema de esferas, en las que se encontraban el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas fijas. La esfera armilar permitía calcular con buena exactitud el movimiento de los astros como se observa desde la Tierra.



También se atribuye a Eratóstenes la invención de un sencillo tamizador numérico que permite obtener los números primos. Este aparato se puede reproducir fácilmente en el salón de clases o en casa, de la siguiente manera: sobre el pizarrón se dibuja una tabla que contiene los números en orden ascendente, empezando desde 2, y se borran todos los múltiplos de cada número exceptuando el número base. De esta manera, los números que quedan en la tabla son todos primos.

	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

“Sobre la medición de la Tierra” es el título de la obra de Eratóstenes donde se describe un gran logro de la imaginación y de la creatividad científica, que ha sentado algunas bases para los métodos científicos modernos de la *Geografía*. El contenido de su obra lo sabemos por las citas de autores clásicos, puesto que lo escrito por él no sobrevivió hasta la actualidad.

Es interesante mencionar que Eratóstenes no fue el único hombre en preguntarse cuál era la circunferencia de la Tierra, otro experimento con una metodología muy similar, aunque menos conocido, fue llevado a cabo por Yi Xing hace unos 1300 años, ¡1000 años después de la medición de Eratóstenes! Este sabio envió 13 equipos de medición a diferentes ciudades de China para que midieran la sombra que producía una vara de bambú en el verano y en invierno, y logró calcular con gran precisión la longitud de un segmento del arco meridiano.

En la actualidad, la medición directa o indirecta de muchas de las características de la Tierra se llevan a cabo dentro de disciplinas como la Geodesia, la Geografía, la Geología y la Geofísica.



En este fascículo empezaremos el **Experimento 1** por ubicar el tiempo en el antiguo Egipto y los problemas a los que se enfrentó Eratóstenes para medir los ángulos solares y las distancias entre ciudades. Para el experimento de medición del meridiano de la Tierra se utilizarán dos obeliscos verticales (que podrás recortar y pegar de este fascículo). En el **Experimento 2** medirás los ángulos que producen sus sombras, seguidos de algunos sencillos trazos geométricos.

Vamos a hacer un mapa y a repasar sus características principales en el **Experimento 3**. En el **Experimento 4** repasaremos cómo se forman algunas montañas terrestres. Para medir distancias, vamos a utilizar la velocidad de propagación de una onda en el **Experimento 5**. Los **Experimentos 6 y 7** tienen que ver con la medición de las propiedades del suelo. En el **Experimento 8** vamos a descubrir cómo se puede medir la resistencia de un suelo y una roca.

Las primeras mediciones



Cuando el experimento de Eratóstenes fue ideado y llevado a cabo, hace más de 2200 años, no había instrumentos precisos para conocer las distancias entre ciudades, por lo que su resultado es sorprendente. Eratóstenes aprovechó que tenía a su cargo la Biblioteca de Alejandría, la más importante de su tiempo, para consultar los mapas del mundo conocido y planos de división de terrenos agrícolas en Egipto, y entendió que la superficie de la esfera terrestre se puede dividir con una red de líneas que pasan por puntos conocidos.

El resultado del experimento de Eratóstenes fue la medición del meridiano terrestre. Pero ¿qué es un meridiano? Es la circunferencia de la Tierra que pasa por los polos; mientras que un paralelo es el círculo en la superficie de la Tierra que define un plano perpendicular al eje de rotación. La importancia de este experimento radica en la manera de cómo se logró calcular la circunferencia de la Tierra por medio de la medición de los ángulos con que llegan los rayos del sol, y de ahí surge la posibilidad de aplicarlo para medir distancias entre diferentes puntos sobre la superficie de la Tierra, y la distancia entre la Tierra y el Sol o la Luna.

La siguiente carta es ficción pero nos permite pensar algunos de los problemas que enfrentó Eratóstenes en el siglo III antes de nuestra era para obtener su estimación de la circunferencia de la Tierra. Sabemos que escribía cartas a su amigo Ptolomeo Evergetes sobre temas interesantes de estudio, y que sentía una gran curiosidad por conocer cómo funcionan los fenómenos terrestres.



Siena (en la actualidad Aswan, Egipto), Junio 21

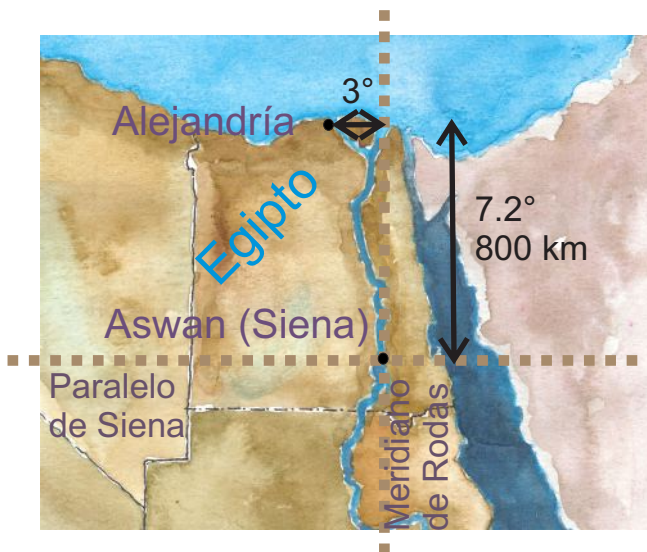
Estimado amigo Ptolomeo Evergetes:

Te escribo desde mi habitación en Siena desde donde observo las palmeras moviéndose lentamente con el viento, un poco de calma en estos meses de intenso viaje. Los hombres que conforman el pequeño regimiento de soldados que has enviado para medir con paso constante la distancia entre nuestra querida Alejandría y esta ciudad han sido de gran ayuda. Hemos calculado una distancia de 5000 estadios entre las dos ciudades. Espero con impaciencia regresar a Alejandría y medir con mi nuevo gnomón** la diferencia de ángulos en el próximo solsticio. Efectivamente, la diferencia entre los ángulos sólo puede explicarse si la Tierra es una esfera y el sol se encuentra tan lejano que sus rayos llegan paralelos a la superficie de la Tierra.*

*Tu amigo
Eratóstenes*

* Un estadio egipcio equivale aproximadamente a 160 metros.

** Un gnomón es un objeto alargado generalmente de forma triangular con medidas precisas que sirve para proyectar sombras producidas por los rayos del sol.



Mapa de meridianos y paralelos en los tiempos de Eratóstenes. Para calcular la circunferencia de la Tierra, Eratóstenes supuso que Alejandría y Aswan se encontraban en el mismo meridiano, aunque ahora sabemos que Alejandría se encuentran a una distancia de 3° al oeste.

Los griegos sabían desde los tiempos de Parménides, en el siglo V antes de nuestra era, que la forma de la Tierra es parecida a una esfera, y que el Sol se encuentra a una distancia tan grande que sus rayos de luz llegan de manera paralela a esta.

Los griegos también habían descubierto que existe un ángulo entre la trayectoria del Sol y el Ecuador. Cada mediodía exacto existe un lugar sobre la Tierra en el cual no se producen sombras porque el Sol pasa exactamente en el cenit.

Como el eje de rotación de la Tierra está inclinado, si unes todos los puntos en donde no se producen sombras a mediodía, se define una trayectoria o desplazamiento del Sol sobre la superficie de la Tierra que se llama **Eclíptica**. La Eclíptica intersecta al Ecuador en dos puntos a lo largo del año, estos días se llaman **equinoccios**. Durante los equinoccios, el día y la noche duran aproximadamente lo mismo (12 horas). En el hemisferio norte de la Tierra, el punto más al norte en que pasa la Eclíptica se llama **solsticio de verano**, mientras que el punto más al sur se denomina **solsticio de invierno**.



¿Qué tiene que ver todo esto con Eratóstenes? Pues resulta que fue precisamente él quien calculó en aproximadamente 24° el ángulo que forma la eclíptica con respecto al Ecuador. Eratóstenes sabía que Aswan, que se encuentra en la latitud del trópico de Cáncer, coincidía con la Eclíptica en el solsticio de verano, y podemos ahora añadir que por esta razón no se producen sombras en ese lugar.

De regreso en Alejandría, en el mediodía solar del solsticio de verano, Eratóstenes midió con gran cuidado la sombra de un obelisco de altura conocida, y obtuvo un ángulo α de 7.2° .

Entonces, Eratóstenes comprendió que sus observaciones sólo se podían explicar si la Tierra no es plana.



Eratóstenes utilizó el “estadio” egipcio como unidad de medición de longitud, que en el antiguo Egipto correspondía a 160 metros. En la actualidad, utilizamos unidades fundamentales de medición definidas con gran precisión. En el Sistema Internacional de Unidades (SI) se han definido siete unidades físicas fundamentales.

Aquí sólo utilizaremos las tres primeras que tienen que ver con las mediciones de los experimentos, y que puedes observar en la tabla. El ángulo es una unidad complementaria del SI.

Magnitud física	Unidad de medición	Símbolo
Longitud	metro	m
Masa	kilogramo	kg
Tiempo	segundo	s
Temperatura	Kelvin	K
Cantidad de sustancia	mol	mol
Intensidad luminosa	candela	cd
Intensidad de corriente eléctrica	Ampere	A

Experimento 1

La medición de la circunferencia de la Tierra

Para explicar el logro de medir la Tierra, vamos a reproducir en miniatura el experimento que Eratóstenes llevó a cabo hace dos mil años.

Materiales

2 objetos alargados de altura conocida (puedes recortar y armar los obeliscos que se encuentran al final del fascículo).

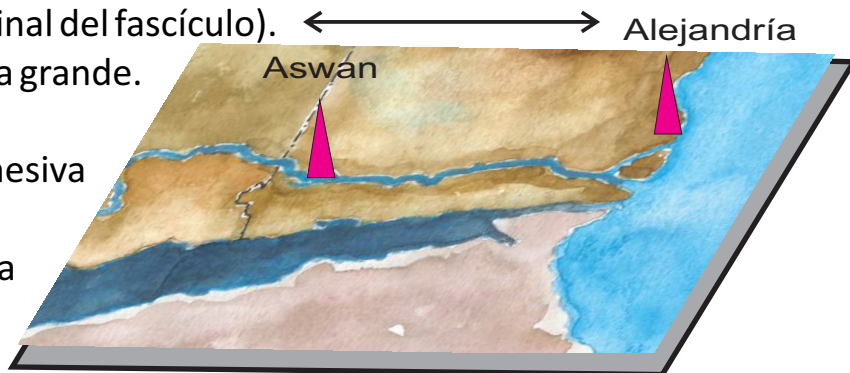
al menos 40 cm de separación

1 cartulina o una pelota grande.

1 regla.

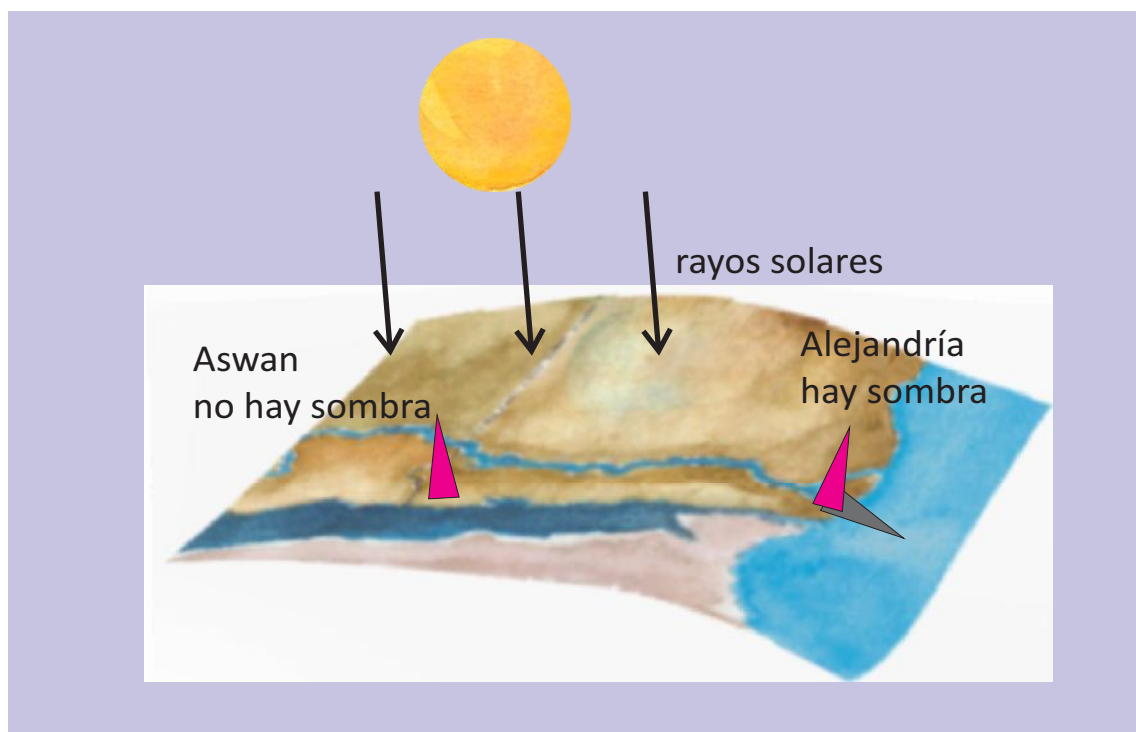
Pegamento o cinta adhesiva de doble cara.

Media hora de sol cerca del mediodía.



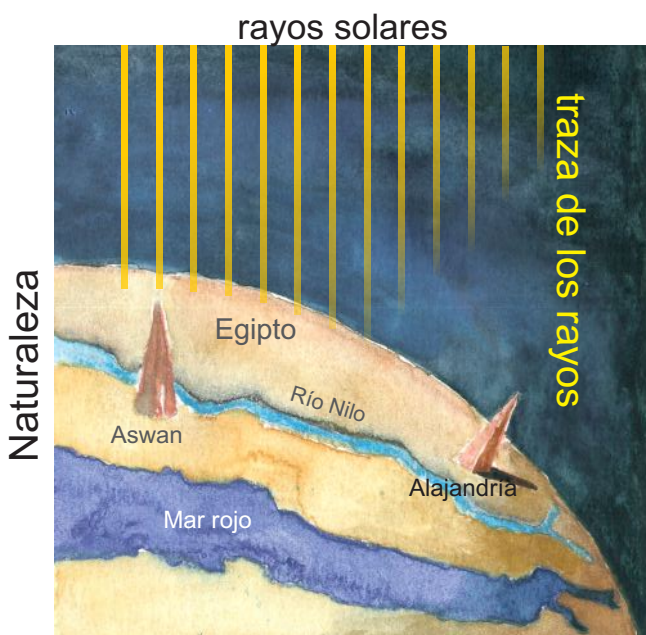
Procedimiento

Primero tenemos que armar los obeliscos y pegarlos a una distancia entre ellos de 40 cm en la cartulina. Para mayor realismo se puede imprimir o fotocopiar un mapa de Egipto, agrandararlo y poner los obeliscos en las localizaciones de Aswan y Alejandría. Asegúrate de que los obeliscos se mantengan firmes sobre la cartulina.



Una vez que hemos armado nuestra miniatura terrestre podemos salir a un lugar soleado. Coloca la cartulina sobre un piso plano o mesa y observa las sombras que se forman. Inclina la cartulina de manera que no se formen sombras en los obeliscos. Ahora tenemos que doblar la cartulina un poco para simular la curvatura de la Tierra y encontrar el ángulo adecuado para que no se forme una sombra en Aswan.

El tamaño de la sombra que se produce en Alejandría depende de la curvatura de la Tierra. Para verificar esta hipótesis, puedes variar la curvatura de la cartulina para producir una sombra de mayor o menor tamaño en Alejandría sin producir una sombra en Aswan.

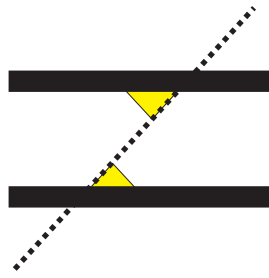


La sombra depende también de la distancia entre las ciudades. Para verificar esta idea puedes pedir ayuda a un compañero o adulto. Mientras mantienes una curvatura constante, cuidando siempre que no se forme una sombra en Aswan, pide a tu ayudante que despegue el segundo obelisco y lo coloque más cerca o más lejos.

Explicación

El dibujo de la página siguiente permite explicar el cálculo de la circunferencia de la Tierra. En Aswan los rayos solares llegan perpendiculares a la superficie y por eso no forman una sombra. En Alejandría la traza de los rayos llega oblicua a la superficie curva de la Tierra.

Si se traza una línea perpendicular a la superficie en Alejandría de manera que intercepte los rayos paralelos, se observa que el ángulo de 7.2° observado en Alejandría es igual a la diferencia de latitud entre las dos ciudades (ver mapa de meridianos y paralelos). La circunferencia de la Tierra tiene 360° y como la distancia entre las dos ciudades es 5,000 estadios, el problema se resuelve simplemente dividiendo 360 entre 7.2 y multiplicando el resultado por 5,000. El resultado es 250,000 estadios o 40,000 km. ¡Nada mal para su tiempo!



Los ángulos iluminados en la figura son iguales.



La circunferencia de la Tierra tiene 360°

El ángulo $\alpha = 7.2^\circ$ cabe 50 veces en una circunferencia

La distancia entre las dos ciudades equivale a 5,000 estadios

La longitud de la circunferencia es $50 \times 5,000 = 250,000$ estadios

1 estadio = 160 m, entonces la circunferencia de la Tierra mide 40,000 km

Dos retos para los más avanzados:

Reto 1. Aplica el método de Eratóstenes para medir un balón

1. Toma una pelota grande (al menos del tamaño de un balón de fútbol) y pega los obeliscos sobre ella a una distancia conocida.
2. Sal al mediodía y haz que uno de los obeliscos no produzca sombra.
3. Mide la longitud de la sombra del segundo obelisco y calcula la circunferencia de la pelota.

Reto 2. Verifica el método de Eratóstenes

Intenta reproducir el experimento de Eratóstenes el día en que el Sol pase por el cenit en tu ciudad; es decir, un objeto parecido a un gnomón (reloj de sol) no debe generar una sombra a mediodía. En Querétaro, donde está ubicado el Centro de Geociencias de la UNAM (20.7° de latitud), eso ocurre los días cercanos al 25 de mayo y el 18 de julio.

Al mismo tiempo se debe realizar una medición de la sombra de un objeto similar en una ciudad que se encuentre aproximadamente sobre el mismo meridiano. Por ejemplo, Nuevo Laredo, Tamaulipas, se encuentra a 28.2° de latitud a una distancia angular que es similar a la que existe entre Alejandría y Aswan.



Experimento 2

Rayos paralelos y divergentes

Ahora sabemos que la Tierra no es plana y que el Sol se encuentra tan lejos que sus rayos nos llegan de manera paralela. Los griegos antiguos observaron la forma circular del planeta en la forma de la sombra de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse, o en el cambio de altura con la latitud de las estrellas fijas, como la estrella polar. Eratóstenes calculó la distancia entre la Tierra y el Sol en 140 millones de kilómetros, suficientes para que los rayos de luz lleguen de manera paralela. Sin embargo, para reforzar estas ideas podemos experimentar con la formación de rayos divergentes en nuestro experimento en miniatura.

Materiales

1 lámpara de mano.

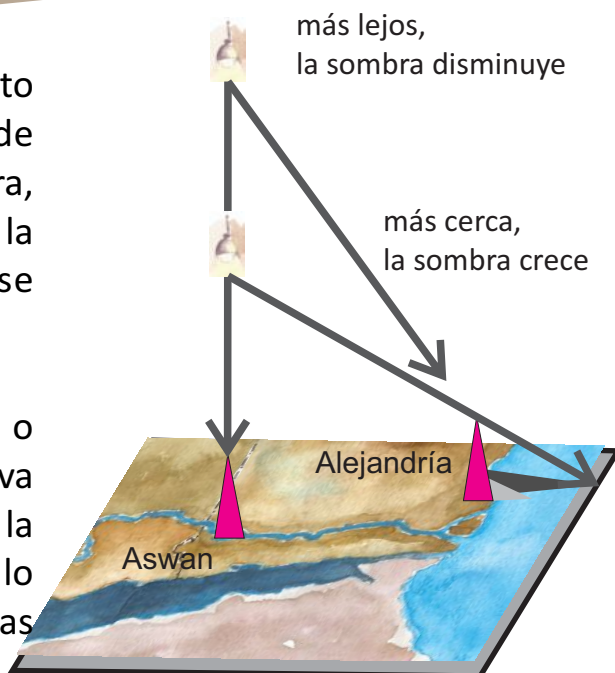
La cartulina con los obeliscos que construiste en el Experimento 1.



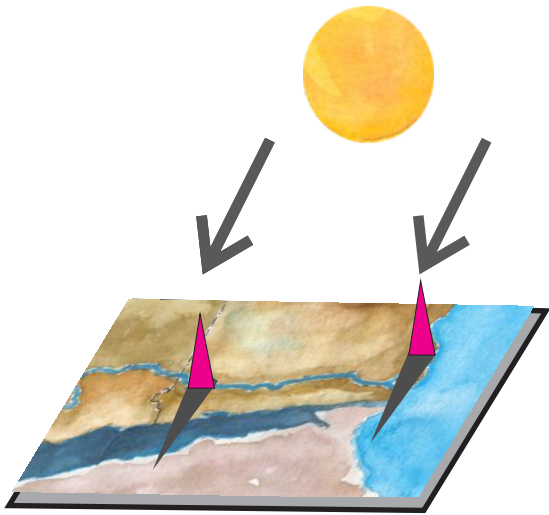
Procedimiento

Coloca la lámpara de mano justo sobre el obelisco de Aswan, de manera que no se produzca sombra, observa y mide el tamaño de la sombra en Alejandría, como se observa en la figura.

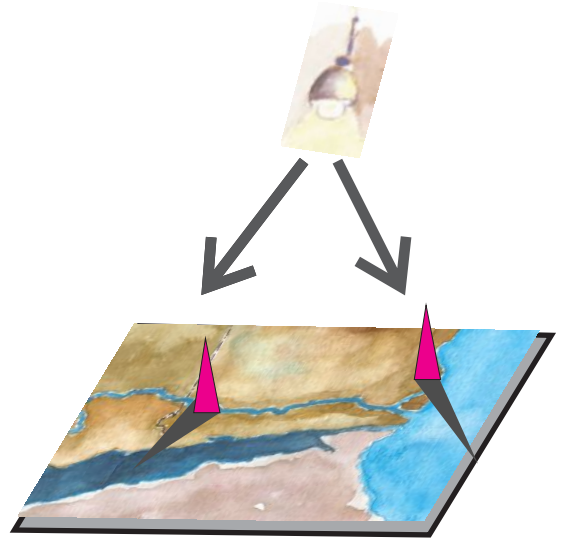
Ahora, lleva la lámpara más cerca o más lejos de la cartulina y observa cómo disminuye el tamaño de la sombra. ¿Puedes alejar la lámpara lo suficiente para hacer desaparecer las sombras?



Ahora puedes salir nuevamente a un lugar soleado y observar las orientaciones de las sombras cuando pones la cartulina como en la siguiente figura. Trata de reproducir el experimento con la lámpara de mano. Acerca o aleja la lámpara de la cartulina y observa con cuidado qué sucede. Este experimento nos ayuda a confirmar que el Sol se encuentra muy lejos de la Tierra, por lo que sus rayos nos llegan paralelos.



rayos paralelos



rayos divergentes

Experimento 3

Explorar para hacer un mapa

Eratóstenes es conocido como el padre de la *Geografía*, pues fue precisamente él quien le dio una metodología formal. Uno de sus grandes logros fue hacer un mapa del mundo conocido hasta entonces. Un mapa es una representación a escala de la Tierra o de un fragmento de ella, que permite dibujar rasgos y símbolos que la describen en una superficie. Una de sus características más importantes es que se pueden tomar medidas y ángulos sobre ellos con una precisión aceptable. En este experimento haremos un mapa y conoceremos algunas de sus características importantes.

Materiales

1 cinta de medir.

1 vaso con agua hasta el borde.

1 papel cuadriculado (20 x 20 cm).

1 rodaja de corcho y 1 aguja.

1 imán y cinta adhesiva.

Lápices de colores.

Procedimiento

El mapa siguiente contiene una porción de terreno de México en donde se muestran: 1) la ubicación del mapa; 2) una rosa de vientos que indica la dirección de los cuatro puntos cardinales; 3) la escala del mapa.

Escribe los cuatro puntos cardinales Norte (N), Sur (S), Este (E) y Oeste (O), en los recuadros en blanco que están sobre el mapa.

Observa los elementos geográficos que hay sobre el mapa (ríos y fronteras) y mide su ángulo con respecto al Norte.



Ahora vamos a construir nuestro mapa del parque más cercano a casa. Dibuja un cuadro de 20 x 20 cm en el papel y divídelo en líneas horizontales y verticales cada 2 cm. La escala del mapa es que cada 2 cm en tu cuaderno es 1 metro en el parque. Escoge una parte abierta que tenga dimensiones de al menos 10 x 10 m. Una vez en el parque, es necesario elegir un punto que represente la posición de origen en tu cuadrícula, el punto (0,0).

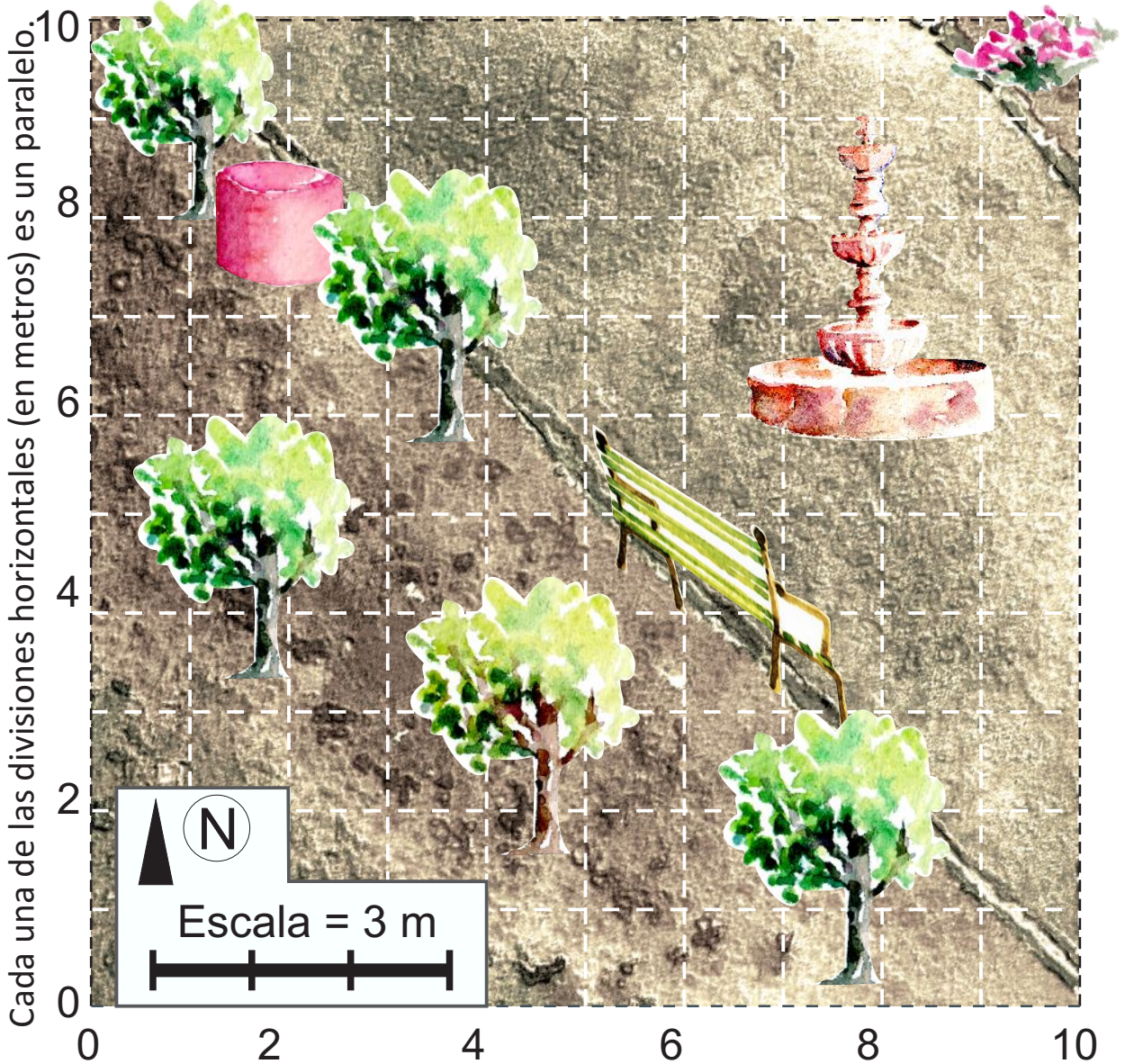
Para orientar un lado de la cuadrícula con respecto al Norte necesitas una brújula; si no tienes acceso a una, la puedes construir fácilmente frotando una aguja sobre un imán muchas veces pero siempre en la misma dirección. Coloca la aguja sobre el corcho y pegala con cinta adhesiva. Coloca el corcho en el vaso lleno de agua. Espera a que la aguja termine de girar y su polo imantado estará apuntando hacia el Norte. Dibuja una línea en el parque según la orientación que marca la aguja.



Para facilitar la ubicación de objetos en el mapa puedes medir un paso de medio metro. A partir del punto de inicio, mide 10 m (o 20 pasos) hacia el Norte. Coloca marcas cada metro en el piso. Regresa al origen y párate viendo hacia el Norte, levanta tu brazo derecho y mide 10 m en esa dirección, que será perpendicular al Norte y se llama Este. Ubica los objetos que se encuentren dentro del área del mapa, ponles un símbolo. Dibuja la orientación del Norte y la escala del mapa, en este caso es $2\text{cm} = 1\text{m}$.



Listo. ¡Ya hiciste tu mapa!, puedes jugar con tus amigos dándoles las coordenadas de objetos en tu mapa y pidiendo que los encuentren.



Cada una de las divisiones verticales (en metros) es un meridiano.

Experimento 4

Medir hacia el interior de la Tierra

En *Geología*, una sección es un plano que se adentra hacia la Tierra desde la superficie. En otras palabras, es como si pudiéramos hacer cortes para revelar lo que hay dentro. Generalmente, las secciones se dibujan a partir de los mapas, pero en otras ocasiones algunas montañas nos permiten ver su estructura (su arreglo geométrico interno) porque fueron erosionadas o cortadas por fallas. En la siguiente figura presentamos la sección de una montaña en la que se observa que su geometría puede ser muy complicada. En este experimento reproduciremos en escala una montaña y haremos secciones para conocer la estructura resultante.

Materiales

Plastilina de diferentes colores.

1 rodillo de cocina.

2 reglas de madera o acrílico.

1 cúter o espátula.



Procedimiento

En una superficie plana, utiliza el rodillo de cocina para hacer placas de diferente espesor con la plastilina, preferiblemente menor de un centímetro. Por ejemplo, puedes hacer 2 de medio centímetro y otras 2 de 1 cm. No es necesario que los espesores sean exactos, pero puedes ayudarte con dos guías a los lados con el espesor requerido. Corta 4 ó 5 placas cuadradas de diferente color pero todas con dimensiones de 7 X 5 cm. Coloca las placas una encima de otra.

Coloca las reglas en los extremos del lado largo del pastel de plastilina y empújalo hacia el centro para deformar el pastel, como se observa en la figura. Con el cúter o espátula haz secciones de tu simulación de montaña perpendiculares a las reglas.

Puedes hacer varios pastelitos de plastilina y deformarlos de diferente manera. Por ejemplo, puedes poner más esfuerzo en una de las reglas o empujarla con un ángulo. Compara las secciones que obtengas.



Experimento 5

Medición de distancias con ondas

Si alguna vez te has preguntado cómo se puede localizar y conocer la profundidad de un objeto situado debajo de la superficie de la Tierra que no se puede ver, este experimento te parecerá muy interesante. La *Geofísica* es la disciplina que mide la estructura de la Tierra y utiliza varios métodos para localizar objetos en el subsuelo y determinar sus propiedades. El principio general de estos métodos es enviar ondas al subsuelo, seguramente ya leíste el fascículo 5 “La Tierra y sus ondas” de esta colección, así que sólo te contaremos brevemente cómo las puedes observar y para qué se pueden utilizar.

Un **principio** básico en el estudio de la propagación de ondas es que la energía, de cualquier tipo, se puede reflejar o refractar cuando encuentra medios con propiedades diferentes. Para el caso específico de la reflexión, si quieres conocer la distancia o la profundidad del objeto que la refleja sólo tienes que medir el tiempo que tarda en viajar de ida y vuelta y tener una idea de la velocidad con que viaja. Recuerda que las ondas viajan a velocidades diferentes en diferentes medios.

Algunas velocidades del sonido que son útiles para que calcules distancias son:

en el aire = 331 m/s

en el agua del mar = 1435 m/s

en agua dulce = 1493 m/s

en concreto = 4000 m/s

Material

Una cuerda, de preferencia de más de 3 m de longitud.

Un árbol o poste.



Procedimiento

Para entender el concepto de propagación de una onda mecánica puedes hacer dos sencillos experimentos. 1) Toma la cuerda, amarra un extremo a un árbol o poste y toma el otro extremo con tu mano. Sujetando la cuerda con fuerza mueve tu brazo hacia arriba y hacia abajo y podrás observar cómo se propagan las ondas de la energía de tu brazo a través de la cuerda.

Explicación

Amplitud es la distancia media entre las crestas y los valles de las ondas y depende de la intensidad de la energía o de la fuerza con la que muevas el brazo. La distancia entre dos crestas o valles consecutivos se llama longitud de onda. Frecuencia es el número de veces que las crestas pasan por el mismo lugar en cierto tiempo, su inverso es el periodo y es el tiempo que pasa entre una cresta y otra. Si produces muchas ondas con distancias cortas entre ellas, su frecuencia es alta, pero si produces ondas amplias con gran longitud de onda tendrás pocas ondas en tu cuerda y su frecuencia será baja. Si mides con un cronómetro el tiempo que tarda en viajar una onda de un extremo a otro de la cuerda, podrás conocer su velocidad de propagación.

Una variación del experimento

Como puedes ver, si conoces la amplitud, frecuencia y velocidad de las ondas, puedes conocer algunas características del medio en el que se propagan las ondas o la distancia hacia un objeto determinado. Para observar cómo se propagan las ondas sólo tienes que dejar caer un objeto pequeño en un estanque, alberca o tina con agua. Cuando el objeto toca el agua puedes ver que las ondas que se generan son de mayor amplitud y frecuencia que las que se van desplazando lejos del punto en donde cayó el objeto. Esto sucede porque a medida que la energía se propaga pierde intensidad hasta desaparecer. Si el estanque es lo suficientemente grande podrás observar que las ondas que llegan más lejos tienen una mayor longitud de onda, las ondas largas viajan más lejos y su frecuencia es menor.

Explicación

Estos experimentos te permiten conocer un principio básico de la propagación de ondas. Si quieres localizar objetos que se encuentran a grandes profundidades tendrás que utilizar frecuencias bajas, pero si quieres localizar objetos pequeños a poca profundidad tendrás que utilizar frecuencias altas. En *Geofísica* se estudia con detalle cuáles frecuencias es necesario aplicar para los diferentes tipos de energía, dependiendo del medio que se estudia o del objeto que se está buscando.

Aplicación del experimento

Una aplicación de lo que ya sabes sobre la propagación de las ondas es la siguiente. Si viajaras en un barco y quisieras conocer la profundidad del agua, entonces podrías utilizar un equipo que emite ondas acústicas o mecánicas, como una campana, y tendrías que medir el tiempo que tardan las ondas en viajar a través del agua hasta el fondo y regresar. Es necesario tener un equipo especializado para transmitir y recibir la onda reflejada.





Conociendo la velocidad de propagación (sabiendo que $V=d/t$; velocidad es igual a la distancia entre el tiempo, y por lo tanto $d=Vt$) puedes calcular la distancia entre el barco y el fondo del lago.



Medición de la propiedades de los materiales de la Tierra

Los materiales geológicos constituyen la Tierra; de manera general, podemos decir que son los suelos, las rocas y el agua. En esta sección te vamos a contar algunas diferencias importantes entre las propiedades de suelos y rocas desde el punto de vista de su comportamiento mecánico, es decir, su consistencia; qué tanto se deforman o cuánto peso pueden aguantar sin romperse.

Conceptos generales

El concepto de suelo puede variar para diferentes disciplinas. Para ti el suelo puede ser sencillamente el piso en donde estás parado en este momento, para un agricultor el suelo es el medio en donde crecen y se nutren sus cultivos, un geólogo diferencia el suelo con actividad orgánica de los sedimentos que fueron o pueden llegar a ser una **roca**, como la arena, el limo o la arcilla; para un ingeniero civil el suelo es el material natural que se deshace fácilmente, es decir, que no es tan duro como una roca y de sus propiedades depende el tipo de cimentación que deberá diseñar para una casa o edificio. La disciplina que estudia el comportamiento mecánico de los materiales geológicos para fines de construcción se llama Geotecnia, o específicamente para suelos y sedimentos se llama Mecánica de Suelos, mientras que para rocas se llama Mecánica de Rocas. De estas disciplinas hemos tomado algunos principios para mostrarte cómo se pueden medir algunas de sus propiedades.

De acuerdo con Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, éstos se clasifican por el tamaño de las partículas en: grava (entre 4.78 y 2 mm de diámetro); arena, como la de la playa (entre 2 y 0.075 mm); limo, como el del fondo de los lagos (entre 0.075 y 0.002 mm), y arcillas, que generalmente constituyen el barro con el que se hacen ladrillos y vasijas (con partículas más pequeñas de 0.002 mm o 2 micras). Cabe remarcar que generalmente en la naturaleza los suelos son una mezcla de estos materiales y tamaños.



Experimento 6

Medir el contenido de agua del suelo

La mayor parte de las propiedades mecánicas de los suelos depende de la cantidad de agua o humedad que tienen. En este experimento te mostraremos cómo se puede medir el contenido de agua de un suelo y para qué sirve determinarlo.

Material

Una muestra de suelo, puedes tomar cualquier material natural de un jardín, de un bosque o de los sedimentos de un río.

Un vaso que se pueda meter al horno de la cocina o al horno de microondas.

Una báscula.

Horno de cocina de gas o de microondas.



Procedimiento

Pesa el vaso vacío (P_v) y después llénalo al ras con la muestra del suelo y pésalo nuevamente, éste es el peso de tu muestra húmeda (P_{mh}). Después métele al horno de la cocina, durante 6 horas si es un horno de gas a 110° centígrados y durante 5 minutos con toda la potencia si es un horno de microondas.

Después lo pesas cuando este frío, éste será el peso de tu muestra seca (P_{ms}). Si restas ambos pesos ($P_{mh} - P_{ms}$), obtendrás el peso del agua (P_a) que tenía tu suelo antes de secarlo en el horno. Si ahora al peso de tu muestra seca le restas el peso del vaso ($P_{ms} - P_v$) obtendrás el peso del suelo seco (P_s).

Si divides el peso del agua entre el peso del suelo seco y lo multiplicas por 100 obtendrás en porcentaje el contenido de agua o humedad de tu suelo ($H\%$):

$$H\% = (P_a / P_s) \times 100$$



Experimento 7

Medir la consistencia del suelo

Es importante medir el contenido de agua de un suelo porque de esto depende que se comporte o no como sólido. Alberto Atterberg, a principios del siglo XX, definió unas mediciones llamadas **Límites de consistencia**, que se refieren a la cantidad de agua que puede tener un suelo sin que cambie su consistencia o comportamiento físico. Así, un mismo suelo se puede comportar como líquido, plástico o sólido, dependiendo de la cantidad de agua que contenga.

Material

Una muestra de suelo.
Un vaso de vidrio.
Agua.

Procedimiento

Obtén una muestra de suelo, de preferencia bien seco y sin terrones. Para un mejor resultado trata de usar mezclas de arena, limo y arcilla. En su estado seco rellena el vaso y voltéalo, podrás observar que al voltearlo el suelo forma un cono invertido como cualquier material granular seco (por ejemplo, los conos invertidos de arena que se forman cuando descargan los camiones de volteo).



Ahora, agrega un poco de agua al suelo hasta formar una pasta con la consistencia de la plastilina, rellena nuevamente al vaso y al voltearlo notarás que el suelo tomó la forma del vaso como un molde, ésta es su consistencia plástica.



Finalmente, agrega más agua al suelo hasta hacer una mezcla espesa dentro del vaso, al voltearlo notarás que el suelo fluye como cualquier líquido; por eso, se llama a esta consistencia líquida.

Explicación

Con este experimento has aprendido que un mismo suelo puede pasar por diferentes estados de consistencia: sólido, plástico y líquido, dependiendo de su contenido de agua. En los estudios de **Mecánica de Suelos** se mide el contenido de agua de los materiales y sus límites de consistencia para saber cómo se pueden comportar durante y después de la construcción de una obra.

Una variación del experimento

Otra propiedad importante de algunos suelos es que pueden absorber mucha agua y aumentar su volumen de manera considerable, es decir, se expanden. Cuando estos suelos se secan, disminuye su volumen y se contraen. Los suelos que se expanden y contraen son generalmente limos combinados con arcillas y se pueden reconocer porque son muy plásticos. Las arenas no presentan esta propiedad. Tú puedes saber si tu suelo es expansivo con este sencillo experimento.

Material

- Una muestra de suelo.
- Un vaso de plástico transparente.
- Un marcador indeleble.
- Agua.

Procedimiento

Coloca una muestra de suelo en tu vaso y marca el nivel con el marcador, agrega un poco de agua y déjalo reposar toda la noche. Si al día siguiente el agua se integró al suelo y éste aumentó su volumen puedes tener la certeza de que tienes un suelo arcilloso expansivo, ahora déjalo secar y podrás ver cómo se contrae.



Aplicación

En la siguiente figura puedes ver la importancia de este fenómeno; y probablemente tú también lo has visto al igual que los ratoncitos de la caricatura. En época de secas, cuando casi no llueve, los suelos arcillosos están secos y con grietas y el terreno tiene cierto nivel.



Cuando llueve, los suelos absorben mucha agua y aumentan su volumen, como se ve en la puerta de la casa de los ratoncitos de la caricatura. Cuando hay suelos arcillosos en una zona es importante medir su capacidad de expansión y contracción, porque este fenómeno puede causar daños importantes a casas y edificios, en Mecánica de Suelos estos materiales se conocen como arcillas expansivas.



Experimento 8

Medir la resistencia de los materiales geológicos

Aunque parezca evidente, muchas veces no es fácil distinguir entre un suelo y una roca. Si el suelo es arcilloso y la roca es muy dura, no hay duda. El problema empieza cuando el suelo es muy duro o la roca está muy alterada y se deshace al tocarla. La definición formal de la palabra roca nos dice que es un agregado de minerales, pero el suelo también lo es. Una manera de distinguir uno de otro es la capacidad que tienen de deformarse o de romperse cuando se les aplica un esfuerzo, es decir su **resistencia**. Este concepto lo puedes comprender si imaginas a un niño que intenta caminar sobre un tronco que no resiste su peso. Algunos materiales pueden parecer resistentes, pero sólo hasta que se les aplica un esfuerzo determinado es que se puede medir esta propiedad. El tronco se rompió porque su resistencia fue vencida por el peso del niño que intentaba cruzar el río.



Cuando se aplica una **fuerza** (en nuestro ejemplo, el peso del niño medido en las unidades kilogramos-fuerza “kgf” del Sistema Técnico de Unidades o simplemente kilos), sobre una unidad de área de 1 cm^2 , se obtiene un **esfuerzo**, cuya unidad de medición es kgf/cm^2 . Si la fuerza se distribuye sobre una gran superficie, la resistencia del material aumenta, pero si se aplica sólo en una porción o punto del material su resistencia disminuye. La ruptura de un material indica su resistencia bajo un cierto esfuerzo. La diferencia entre suelo y roca depende de la resistencia que presentan en pruebas de laboratorio, por ejemplo, si el material se rompe en compresión a menos de $14 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ se toma como suelo, en caso contrario se toma como roca.

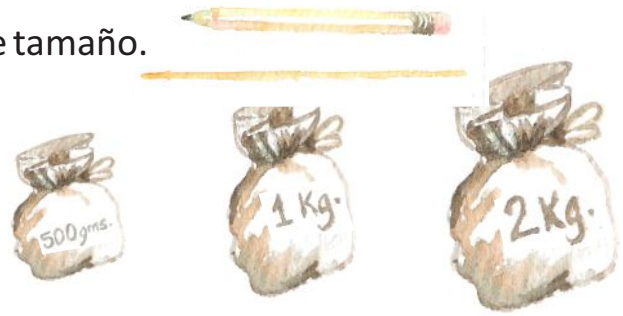
Material

Tres bolsitas de plástico de diferente tamaño.

Azúcar o arena.

Cuatro libros.

Un lápiz y una varita de espagueti.



Procedimiento

Rellena las bolsitas con diferentes pesos de azúcar o arena: 0.5, 1 y 2 kgf. Para evaluar la diferencia de resistencia entre dos materiales vamos a hacer el siguiente experimento. Coloca en una mesa dos libros apilados enfrente de otros, como se observa en la figura. Entre los libros pon una varita de espagueti y encima la bolsita de 0.5 kgf. La varita se rompe porque su resistencia es menor que el esfuerzo aplicado. Los suelos son, en cierta manera, como el espagueti, quebradizos y de baja resistencia. Si colocas un lápiz podrás observar que soporta muy bien la bolsita de 0.5 o de 1 kgf pero probablemente se romperá al poner la bolsita de 2 kgf. La resistencia de las rocas se parece más a la del lápiz, es más elevada pero no demasiado.



Una variación del experimento

Material

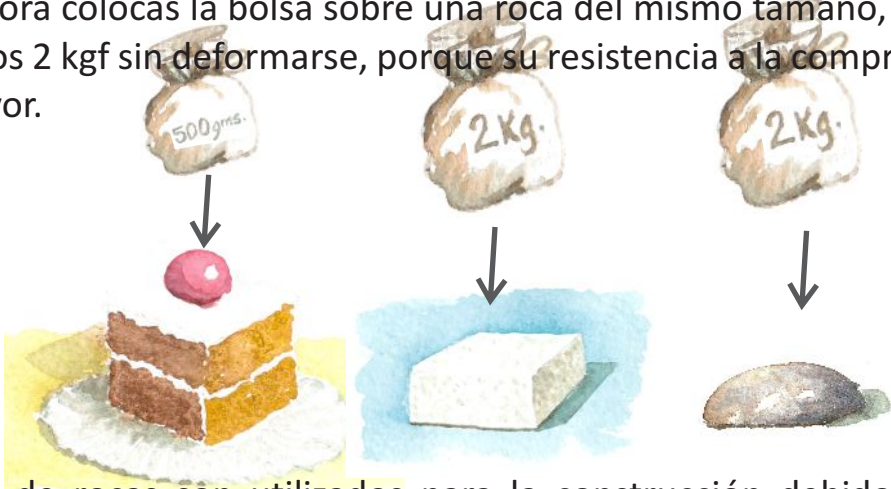
Un pedazo de pastel, un cubito de queso panela y una roca.

Tres bolsitas de plástico de diferentes tamaños con azúcar o arena.

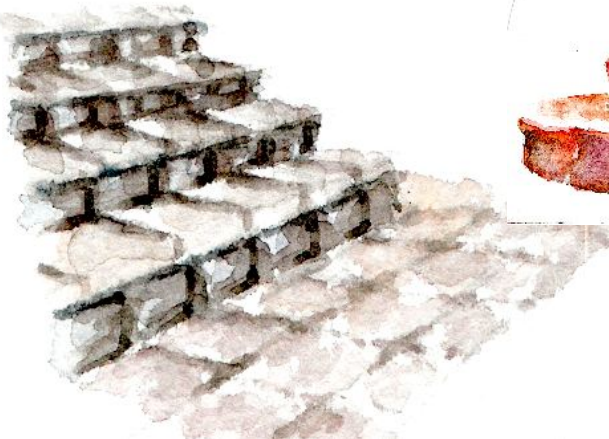
Procedimiento

En el experimento anterior evaluamos la diferencia de resistencia a la flexión de los materiales, ahora vamos a medir su resistencia a la compresión. Utiliza las mismas bolsitas que preparaste para el experimento anterior. Corta un pedazo de pastel de 5 x 5 cm, es decir con un área de 25 cm^2 , y coloca la bolsita de 0.5 kgf sobre éste. Verás que el pastel no soporta el peso porque su resistencia a la compresión es menor a $0.5/25 = 0.02 \text{ kgf/cm}^2$, esta resistencia es parecida a la de un suelo limoso o arcilloso húmedo.

Si ahora haces un cubo de queso panela del mismo tamaño notarás que no le pasa nada con la bolsita de 0.5 kgf, pero se comprimirá si pones la bolsita de 2 kgf sobre él, porque su resistencia a la compresión es menor a 0.08 kgf/cm^2 . Si ahora colocas la bolsa sobre una roca del mismo tamaño, verás que soporta los 2 kgf sin deformarse, porque su resistencia a la compresión es mucho mayor.



Algunos tipos de rocas son utilizados para la construcción debido a su resistencia; por ejemplo, la cantera es suave para moldearla, por eso se usa como bloque para construir; el granito resiste el desgaste y se usa en iglesias y museos, el mármol se puede cortar en láminas y se emplea para fabricar pisos. Observa a tu alrededor e identifica qué tipos de rocas se usaron para construir las casas y edificios que conoces.





El ser humano mide para conocer su entorno. Desde el experimento de Eratóstenes hasta nuestros días se ha medido una infinidad de longitudes, fenómenos y procesos. Sin embargo, todavía hay muchas cosas por medir, por conocer y experimentos por hacer. ¡Esperamos que este fascículo te motive a encontrarlas y medirlas!



AGRADECIMIENTOS

El manuscrito fue revisado por los doctores Rafael Méndez Sánchez, Miguel de Icaza Herrera y Susana A. Alaniz Álvarez, el Ing. Juan José Martínez Vásquez, los M. en C. Adriana Meyers y Antonino Márquez Sarmiento, la prof. Alicia Serrano García, las Lic. Teresa Soledad Medina y Carolina Muñoz y el Sr. Ricardo Carrizosa. La corrección de estilo fue hecha por Héctor Curiel García.



Acerca de los autores

Dora Carreón Freyre

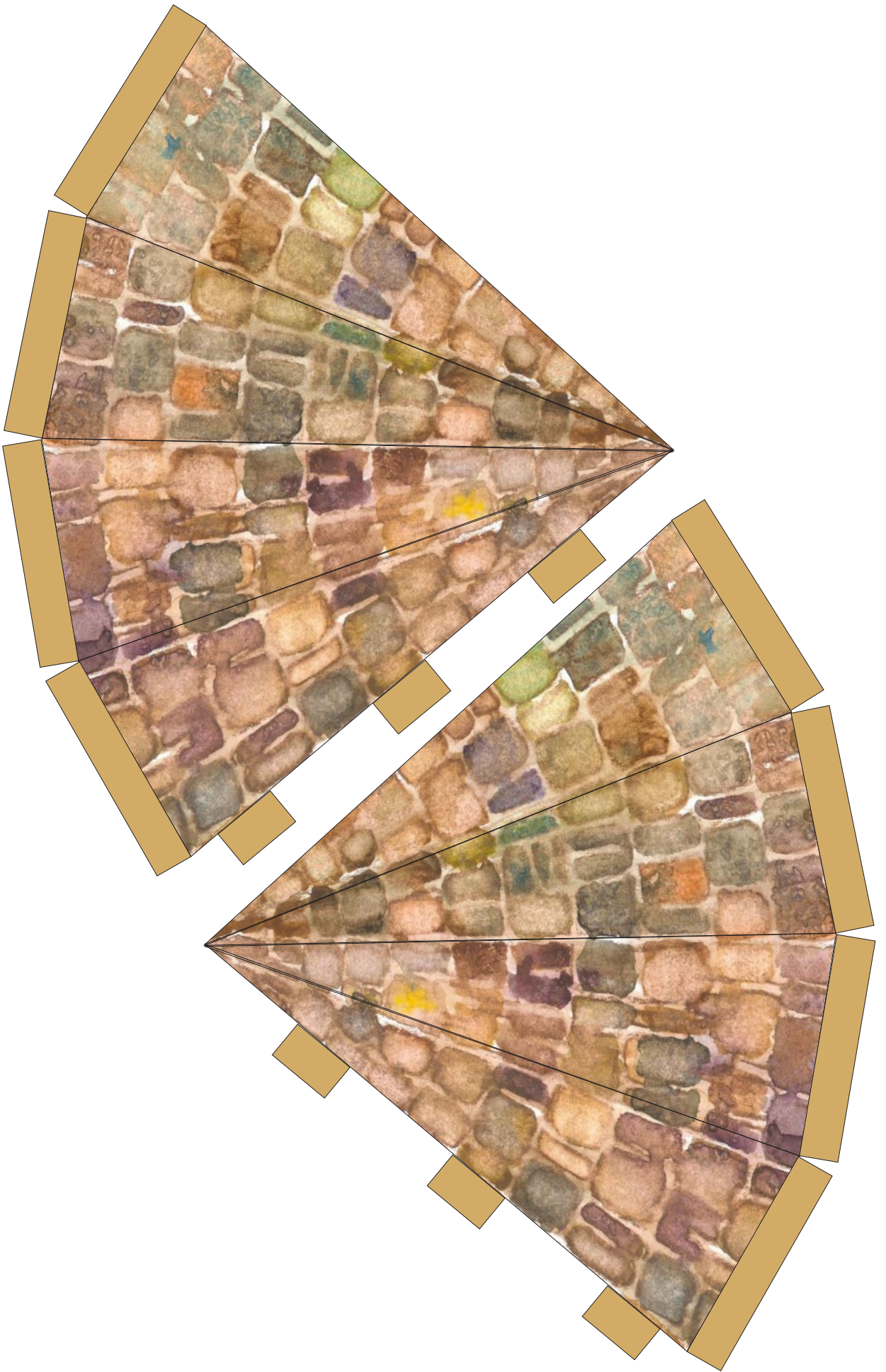
Es investigadora en el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, con doctorado en Ingeniería Geológica por la Escuela de Minas de París. Estudia el fracturamiento del medio geológico en zonas urbanas y desarrolla trabajo experimental en Geomecánica en el Laboratorio de Mecánica Multiescalar de Geosistemas (LAMMG), instrumentación y monitoreo en campo e integración de bases de datos. Perteneció al Sistema Nacional de Investigadores y al grupo de trabajo de Subsistencia del Terreno de la UNESCO.

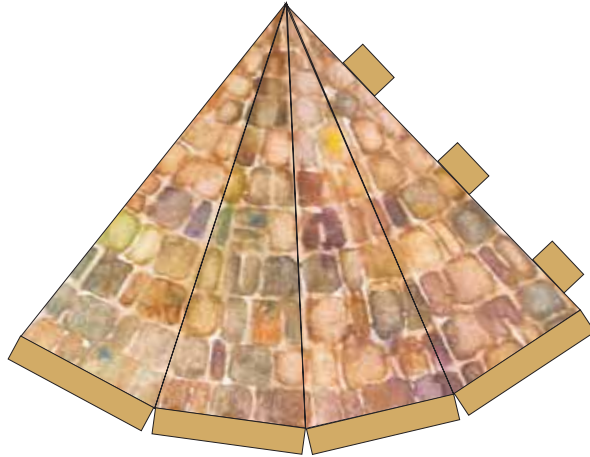
Mariano Cerca

Es investigador responsable del Laboratorio LAMMG, Centro de Geociencias, donde realiza experimentos y mediciones en materiales a escala de laboratorio para tratar de entender los fenómenos geológicos y mecánicos de la Tierra. Es especialista en Geología Estructural y Tectónica y pertenece al Sistema Nacional de Investigadores.

Claudia Cuadra

Es profesora de pintura en la Universidad Ibero Mexicana y también imparte clases particulares. Participa en talleres de producción artística. Es egresada de la carrera de Diseño Industrial, con estudios de posgrado de Artes en la Academia de San Carlos. Ha cursado diplomados de acuarela, Dibujo al natural, Historia del Arte y Óleo en la Universidad Autónoma de Querétaro.





La impresión de este fascículo fue financiada por:
Delgación Iztapalapa, México, D.F.
Dirección General de Asuntos del Personal Académico, UNAM,
Programa de Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza
Proyecto PE105307

"Experimentos simples para entender una Tierra complicada. 6. La Medición de la Tierra" editado por el Centro de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, se terminó de imprimir el 31 de mayo de 2010 en los talleres de Diseño e Impresos de Querétaro, S.A. de C.V., Av. Universidad No. 166 Ote, Centro, Querétaro, 76000. El tiraje consta de 4000 ejemplares, se realizó mediante offset en papel couche de 100g. Las fuentes utilizadas fueron Calibri en el cuerpo del texto, y Carlisle en la portada. El cuidado de la edición estuvo a cargo de Claudia Cuadra.



La serie “Experimentos simples para entender una Tierra complicada” está basada en la lista de los experimentos más bellos de la historia, publicada por la revista *Physics World* en septiembre del 2002. Fueron elegidos por su simplicidad, elegancia y por la transformación que provocaron en el pensamiento científico de su época.

Cada fascículo de esta serie está dedicado a uno de esos experimentos. Nuestro propósito es lograr que reproduzcas en casa esos experimentos y entiendas, a través de la experimentación, fenómenos que ocurren tanto en nuestra vida cotidiana como en nuestro planeta.

La serie completa la puedes descargar de la página web:
<http://www.geociencias.unam.mx>

Este fascículo está dedicado al experimento “La Medición de la Tierra” de Eratóstenes.

Patrocinadores

