







**DEL METRO AL NANÓMETRO:  
CONSTRUCCIÓN DE REPRESENTACIONES DIMENSIONALES  
EN EL ALUMNADO DE BACHILLERATO**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

*Rector*

Leonardo Lomelí Vanegas

*Secretaria General*

Patricia Dolores Dávila Aranda

*Secretario Administrativo*

Tomás Humberto Rubio Pérez

*Abogado General*

Hugo Alejandro Concha Cantú

*Directora General de Publicaciones y Fomento Editorial*

Socorro Venegas Pérez

**INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA**

DEL METRO AL NANÓMETRO:  
CONSTRUCCIÓN DE REPRESENTACIONES DIMENSIONALES  
EN EL ALUMNADO DE BACHILLERATO

Fernando Flores-Camacho  
Eduardo Vega-Murguía  
Jesús Manuel Cruz Cisneros  
Leticia Gallegos-Cázares

PROYECTO PAPIME: PE100824



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
INSTITUTO DE CIENCIAS APLICADAS Y TECNOLOGÍA  
MÉXICO, 2024

Esta investigación, arbitrada a “doble ciego” por especialistas en la materia, se privilegia con el aval de Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología.

Este libro fue financiado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA), de la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante el Proyecto PAPIME PE100824 “XXXXXXXXXXXX”, coordinado por XXXXXXX.

*Del metro al nanómetro: construcción de representaciones dimensionales en el alumnado de bachillerato*

Fernando Flores-Camacho  
Eduardo Vega-Murguía  
Jesús Manuel Cruz Cisneros  
Leticia Gallegos-Cázares

Primera edición: día, mes y año.

D.R. © 2024 Universidad Nacional Autónoma de México  
Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510,  
México, CDMX.

Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología  
Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510,  
México, CDMX.

Oficina del Abogado General  
Dirección General de Asuntos Jurídicos

ISBN: XXXXXXXXXXXXXXX

Corrección de estilo: Érika Maya Vargas  
Diseño y formación:  
Corrección ortotipográfica:  
Cuidado de la edición:

Esta edición y sus características son propiedad de la Universidad Nacional Autónoma de México. Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso en México / *Printed in Mexico*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecen la valiosa colaboración de:

Diego Torres Padilla, alumno de la Facultad de Ciencias y becario del proyecto por su apoyo en las actividades experimentales, elaboración de figuras y fotografías y por la elaboración del Anexo 2.

Al Dr. Rodolfo Zanella Specia por haber proporcionado y autorizado el uso de las imágenes de nano partículas de oro.

A la Dra. María de Lourdes Segura Valdez y al Dr. Luis Felipe Jiménez García por haber proporcionado y autorizado el uso de la imagen de la célula de meristemo de cebolla.

Al M. en C. José Guadalupe Bañuelos Muñetón por haber proporcionado y autorizado el uso de imágenes diversas con el microscopio de fuerza atómica.

A la Dra. Claudia Rodríguez Almanza por haber proporcionado y autorizado el uso de la imagen del poro por una toxina de anémona.

Al Fís. Héctor Covarrubias Martínez por haber proporcionado y autorizado el uso de la imagen del surco de un disco de acetato.

Al M. en C. Sergio Padilla por haber proporcionado y autorizado el uso de las imágenes de la regla de precisión de 50 mm y permitírnos tomarle fotografías a través del microscopio.

A los estudiantes Violeta de la Aurora Ahumada Lemus y Christopher Yael Lazcano Tovar por haber proporcionado y autorizado el uso de la imagen del cabello con el hilo de telaraña a través del microscopio.

Al D.I. Humberto Albornoz Delgado por su apoyo en la toma de fotografías.

## **RESUMEN**

El presente libro atiende al problema de representación y conceptualización que sobre la dimensión de entidades pequeñas muestra el alumnado de bachillerato y que influye en la falta de comprensión de las relaciones entre tamaños de entidades micrométricas y nanométricas, así como en los procesos físicos y leyes naturales que aplican a esas escalas y escalas aún menores. En el libro se describe, brevemente, lo que se ha investigado de esta problemática y se sugieren algunas alternativas didácticas correspondientes al desarrollo conceptual y representacional del alumnado, para dar paso a un conjunto de acciones y actividades que se pueden llevar a cabo en las aulas y laboratorios del bachillerato y que, en un recorrido dimensional del metro al nanómetro, proporcionan elementos experimentales y de análisis para apoyar la construcción de representaciones, a través de procesos comparativos dimensionales, de objetos visibles a no visibles y sus formas de medición.

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN
2. SUGERENCIAS DE PROCESOS DIDÁCTICOS
3. AMPLIFICACIÓN O CÓMO VER LO MUY PEQUEÑO
4. MEDICIÓN DE CUERPOS PEQUEÑOS
5. ¿ES POSIBLE MEDIR OBJETOS PEQUEÑOS  
SIN AMPLIFICAR SU IMAGEN?
6. MEDICIÓN DE PARTÍCULAS PEQUEÑAS POR DIFRACCIÓN:  
CÉLULAS DE CEBOLLA
7. PELÍCULAS DELGADAS ¿CÓMO MEDIRLAS?
8. LA ESCALA NANO: ¿CÓMO MEDIRLA?
9. PARA FINALIZAR
10. REFERENCIAS

ANEXO 1

ANEXO 2

# 1

## INTRODUCCIÓN

En nuestro ambiente escolar y también cotidiano, oímos con frecuencia que en el universo hay galaxias, estrellas, planetas y otros cuerpos celestes, pero también que hay células, genes, moléculas, átomos, nanomateriales y partículas elementales. La idea general y un tanto vaga es que los objetos referidos al universo son muy grandes y lejanos y los que tienen que ver con la constitución de la materia y de los organismos son muy pequeños.

Sin embargo, más allá de esta distinción, es complejo decir y representarse, por ejemplo, qué tan pequeños son esos objetos o entidades pequeñas y construirse una concepción espacio-dimensional de esas entidades. Por ejemplo, qué tanto más pequeña es una molécula que un gen o de qué dimensiones son las nanopartículas o los nanomateriales.

Se ha investigado que, por ejemplo, el alumnado de bachillerato tiene dificultades en ordenar por tamaño los siguientes once objetos: átomo de carbono, bacteria, cabello humano, célula de huevo humano, célula de glóbulo rojo, doble hélice de ADN, hormiga, huevo de gallina, molécula de agua, niño y virus, pero mayor es su dificultad para asignarles un valor aproximado en una escala, sea esta expresada en metros o en potencias de 10 (Flores-Camacho *et al.*, 2023).

El problema de la ubicación espacio-dimensional, como se muestra en diversos estudios (Adadan, Akaygun y Sanyal, 2017; Guzman y Sanjay, 2019; Flores-Camacho *et al.*, 2023; Magana, Brophy y Bryan, 2012), va más allá de solo determinar el orden descendente de los objetos o la escala a que corresponden, sino que tiene implicaciones para relacionarlos con los procesos físicos y químicos, así como para comprender las leyes que pueden aplicarse o no en la escala pequeña, por ejemplo, en la nano escala.

Esta problemática de ubicación espacio-dimensional y de relación con los procesos físicos, químicos y biológicos tiene implicaciones para el aprendizaje de la ciencia escolar. En particular, en las confusiones y modelos que presenta el alumnado sobre la estructura de la materia (Flores-Camacho *et al.*, 2007), sobre los procesos genéticos y las estructuras celulares (Flores, Tovar y Gallegos, 2003; García-Rivera *et al.*, 2023), sobre la aplicación de ciertas leyes (Guzman y Sanjay, 2019) y, en general, sobre la mayoría de los conceptos y procesos que ocurren desde la escala celular hasta la atómica.

Es de notar que si bien actualmente es posible conseguir gran cantidad de imágenes sean fotográficas o esquemáticas sobre gran diversidad de objetos de escala muy pequeña, los alumnos no cuentan con referentes para ubicarlos en una escala espacio-dimensional. Además, cuando se construyen modelos de esas entidades, como en el caso de las moléculas, o lo que se observa visualmente en las computadoras, para poder manipularlas estas se construyen a escala humana, de manera que, si bien ello es necesario para poder hacer procesos con esas entidades, no dan idea de



su tamaño real y con ello es explicable que se conciba que un átomo tiene el tamaño de una célula o viceversa.

### ¿Cómo puede construirse una representación comparativa de los tamaños de entidades pequeñas, al menos hasta el nivel de la nano escala?

Una posible respuesta consiste en llevar a cabo procesos de medición, aspecto que, en la mayoría de la enseñanza media superior, está prácticamente olvidado (Smith III, Heuvel-Panhuizen & Teppo, 2011) y que implica un conjunto de acciones que el alumnado puede llevar a cabo para construirse un escenario visoespacial de los objetos para pasar de los pequeños a los muy pequeños.

Para dar cuenta de que las mediciones de objetos pequeños, llevadas a cabo por el alumnado, contribuyen a la comprensión y representación de factores de escala y de ubicación espacio-dimensional, se llevó a cabo una actividad (que en el presente libro corresponde al numeral 4) con alumnado de bachillerato al que se aplicó el cuestionario de la investigación referida de Flores-Camacho *et al.* (2023). Esta actividad y su aplicación se llevó a cabo utilizando un *pretest* y un *postest*, una vez que, en el transcurso de dos sesiones de clase, alumnado y profesor llevaron a cabo la actividad.

Los resultados muestran avance en los alumnos, principalmente en la ubicación ordenada de las 11 entidades enunciadas previamente con una ganancia de  $g = 0.29$  (de acuerdo con el procedimiento de Hake, en Vega-Murguía *et al.* (2024).

La siguiente figura 1.1 muestra una gráfica comparativa en la que se puede apreciar cómo el estudiantado mejora en su jerarquización dimensional de los objetos.

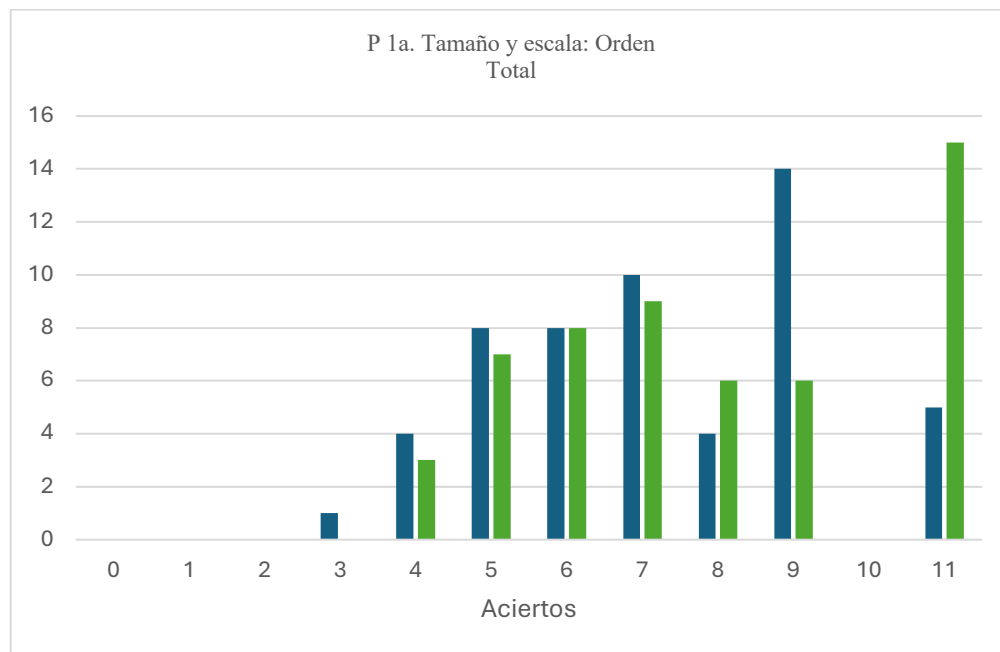


Figura 1.1. Gráfica de aciertos del ordenamiento de los objetos.  
Barra izquierda: pretest; derecha: postest. Se representa una ganancia  $g = 0.29$  (Autor, 2024).  
El eje de las ordenadas corresponde a la frecuencia y el de las abscisas al de aciertos correspondiente al ordenamiento por tamaño de los objetos.

A partir de estos resultados, se construyó el presente libro como una propuesta didáctica a través de diversos procesos de medición de entidades pequeñas que van desde los milímetros hasta los nanómetros.

### **Propuesta didáctica y su estructura**

El propósito del presente libro para el profesorado y el alumnado es el de proporcionar una estructura didáctica que, a través de actividades de medición, apoye al alumnado a una reconstrucción representacional de las escalas dimensionales.

Esta reconstrucción representacional implica pasar de sus nociones cotidianas, al menos en un sentido ordenado de mayor a menor, de lo que son dimensionalmente las entidades pequeñas, desde la escala en metros hasta los nanómetros.

Para alcanzar el propósito, se ha propuesto una secuencia en la que el primer aspecto es la comprensión de lo que implica la amplificación de los objetos desde la percepción cotidiana, para, por medio de ampliaciones sucesivas, llegar hasta estructuras y objetos inobservables a simple vista, como las células vegetales. Este proceso de amplificación se desarrolla en paralelo con la amplificación desde una imagen de la Tierra vista desde el espacio hasta observar en ella objetos cotidianos como autos. En esta actividad, el proceso es comparativo, conservando en ambos casos los mismos factores de amplificación y sus expresiones numéricas.

El segundo aspecto que se aborda es llevar a cabo las ampliaciones con objetos conocidos y con las células vegetales. Para ello se utiliza el microscopio como instrumento amplificador y un proceso de amplificación que permite determinar el tamaño real de los objetos observados. Esto constituye el inicio para establecer un proceso de escala que va de objetos muy pequeños que pueden observarse –como el hilo de una telaraña– hasta objetos no cotidianos que ya no podemos observar –como las células de una cebolla–.

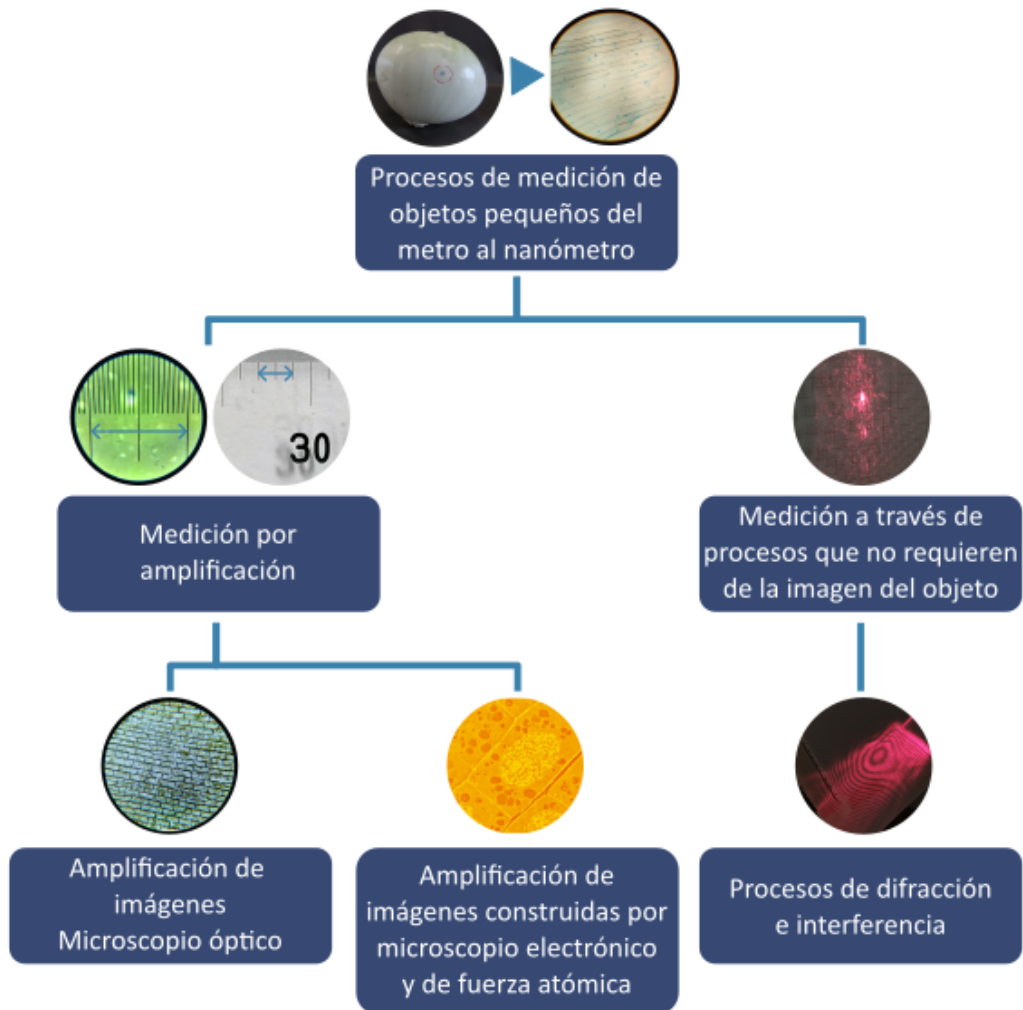
Las observaciones con el microscopio óptico no permiten ir más allá de las micras, por lo que la secuencia continúa –como tercer paso– con una actividad en la que se introduce un proceso de medición indirecto, a partir de fenómenos que ocurren con la luz como la difracción y la interferencia, con los cuales es posible obtener mediciones de objetos del orden de micras y menores.

Al hacer de nuestro conocimiento cómo es posible medir objetos pequeños con procesos que ocurren mediante la luz, se desarrollan dos actividades: una midiendo por medio de la difracción entidades –como células de cebolla, de sangre o partículas de algunas sustancias–. Por lo que respecta a la de utilizar la interferencia de la luz, se miden entidades aún más pequeñas, como la medición de películas delgadas de aceite, que llegan al orden de una décima de micra (aproximadamente media de la longitud de onda de la luz), esto es en la escala nanométrica.

El último aspecto consiste en utilizar imágenes de objetos obtenidos con distintos microscopios, desde el óptico hasta el electrónico, como también el microscopio de fuerza atómica. Estos dos últimos microscopios proporcionan imágenes visuales construidas a partir de diversas propiedades electromagnéticas de la materia. La finalidad de las acciones que se pueden llevar a cabo en esta actividad es apoyar a la comprensión de que alcanzar la escala del orden de nanómetros ya no es posible con instrumentos ópticos; sin embargo, se pueden medir con la construcción de imágenes por medio de otros procesos físicos basados en la interferometría como con el microscopio de fuerza atómica y el microscopio electrónico.

Con la secuencia planteada, se tiene un proceso que lleva al alumnado por medio de procesos de medición realizables en un bachillerato, desde lo medible cotidiano hasta lo nanométrico, lo cual se concreta con lo propuesto en este libro.

En la figura 1.2, representa la estructura de la propuesta didáctica.



*Figura 1.2. Esquema de la estructura de la secuencia de acciones para aproximarse a la construcción de las representaciones espacio-dimensionales en escala pequeña (elaboración propia)*

### Estructura de las actividades

Las actividades están estructuradas para que el alumnado encuentre sentido a lo que ellas implican. Por ello, a lo largo de su desarrollo hay diversos momentos de reflexión o análisis en torno a cuál es el propósito de la actividad, por qué y para qué se hace, por qué se hace de esa forma, qué se puede obtener de ella y qué más es posible llevar a cabo con propuestas para ampliar la reflexión sobre lo realizado.

Congruente con lo anterior, las secciones que contempla cada actividad son:

- **¿Cuál es el propósito de aprendizaje?** Esta sección describe cuál es la finalidad de la actividad en términos de la construcción de representaciones sobre procesos y dimensiones de las entidades que se medirán.
- **Qué hacer.** Describe en términos resumidos el proceso que se seguirá para llevar a cabo la actividad.
- **¿Por qué y para qué hacer esta actividad?** Se presenta una reflexión para el docente y el alumnado sobre las razones para su construcción espacio-dimensional de los objetos en escala pequeña.
- **Desarrollo.** Es la descripción de los materiales y el proceso que deberá seguirse para llevar a cabo las mediciones.
- **¿Qué analizar?** Se propone en esta sección la reflexión sobre las dimensiones obtenidas del objeto medido, sobre el proceso de medición y sobre el proceso de reconstrucción de sus representaciones espacio-dimensionales.
- **Algo más.** Esta sección tiene el propósito de proponer acciones o situaciones complementarias que contribuyan al propósito de la actividad.

En cada una de estas secciones se intercalan preguntas y sugerencias para analizar en clase durante el proceso en el que se lleva a cabo la actividad.

Como se ha apuntado, esta propuesta tiene el propósito de contribuir a que el alumnado de bachillerato reconstruya –a partir de su ubicación espacio-dimensional cotidiana en la cual las entidades pequeñas (como células, nano partículas y muchas otras del entorno cotidiano y lenguaje actual) no son más que una dimensión abstracta en las que todas parecen estar ubicadas en una misma escala de tamaño– una representación sobre lo que implican las dimensiones pequeñas y cómo se ha llegado a ellas; que todos esos objetos, en principio indiferenciados en escala, tienen tamaños que pueden ser de varios órdenes de magnitud y que si bien todos ellos son inobservables a simple vista, son tan diferentes en su escala que llegar a determinar sus dimensiones implica diversos procesos de amplificación para su medición.

Con esta reconstrucción representacional de su espacio y dimensiones, de ser alcanzada en alguna medida, el alumnado de bachillerato tendrá mejores elementos para comprender las implicaciones de la ciencia y la tecnología actuales, en las cuales las nanociencias y nanotecnología son parte relevante.

## SUGERENCIAS DE PROCESOS DIDÁCTICOS

La construcción de nociones y representaciones científicas en el alumnado, como se ha puesto de manifiesto por diversas investigaciones<sup>1</sup> y experiencia docente, es un proceso de orden cognitivo que requiere de cierto tiempo de evolución y/o transformación que depende de diversos factores tanto propios del alumnado como atribuibles al profesorado, y al contexto escolar y extraescolar.

En el caso de la construcción representacional de entidades que requieren procesos de visualización de entornos no asequibles directamente a la percepción de objetos y procesos espacio-dimensionales como son las entidades y sucesos o fenómenos inobservables por su dimensión, resulta en una complejidad representacional y conceptual adicional para el alumnado, con respecto a otro tipo de representaciones científicas que cuentan, al menos, con entidades visibles, manipulables o, en su caso, que tienen efectos observables de manera directa.

No se trata de una construcción representacional en donde los objetos y fenómenos de escala pequeña sean equivalentes a los de la escala mesoscópica como usualmente se presenta en modelos o representaciones gráficas de esos objetos y procesos, pues lo que ocurre, por ejemplo, en la escala nanométrica o menor, no se rige ni se explica de acuerdo con algunas leyes físicas que se aplican en escalas mayores, **no es el mundo en pequeño**.

Es por lo anterior que apoyar al alumnado en la construcción de una representación espacio-dimensional de las entidades a escalas –al menos, micro y nanométricas– requiere de procesos didácticos orientados hacia el logro de transformaciones representacionales progresivas, en una aproximación que vaya desde la ubicación dimensional de lo observable hasta lo inobservable. Esta es precisamente la orientación que tiene el conjunto de actividades que se proponen en este libro para docentes y alumnos.

Para el logro de esos procesos transformativos y constructivos representacionales, es posible utilizar diversas aproximaciones o propuestas didácticas que se han desarrollado para apoyar ese tipo de procesos de aprendizaje en el alumnado. A continuación, se presentarán dos de ellas que, de acuerdo con los intereses y experiencia docente del profesorado, le resulten más apropiadas o convincentes.

### APRENDIZAJE PROGRESIVO Y TRAYECTORIAS REPRESENTACIONALES

---

<sup>1</sup> Para tener información sintetizada y analizada sobre diversas investigaciones sobre conceptualización y representación del alumnado se pueden consultar diversos *Handbooks*. Por ejemplo, el Handbook de Lederman y Abell (2014) o el de Mathews (2014).

***El aprendizaje progresivo*** es una propuesta que retoma diversos elementos de la investigación educativa, entre los que se encuentran:

- que el aprendizaje es un proceso cognitivo que requiere de un cierto tiempo de construcción conceptual en el alumnado;
- que no se da de manera espontánea sino que requiere de apoyos que sean correspondientes a las problemáticas de aprendizaje de los propios sujetos;
- contar con procesos de evaluación que den información sobre esas problemáticas y sobre el progreso en el desarrollo del aprendizaje (National Research Council, 2005).

Sobre estas consideraciones generales, se han desarrollado diversas propuestas que van desde currículos completos para niveles escolares hasta propuestas específicas para temas particulares de las disciplinas científicas. De manera general, y retomando las propuestas de Corcoran & Silander (2009) y Metz (2008), los elementos principales que implica llevar a cabo un proceso de enseñanza desde el enfoque del aprendizaje progresivo son:

- *Inmersión en una temática.* Se debe llevar a cabo un conjunto de acciones y propuestas educativas centradas en un determinado tema, de manera que todos los aspectos de aprendizaje –incluidos experimentos, acciones extraclase, discusiones en clase, evaluaciones, entre otros– estén centrados en esa temática de manera convergente e intensiva.
- *No perder las ideas centrales en la práctica.* Esto en correlación con lo anterior, implica que el aspecto central o foco del aprendizaje no se pierda en las acciones complementarias. Por ejemplo, en el caso de experimentos, que las acciones experimentales no se conviertan en el foco de atención en lugar del foco de aprendizaje que se ha fijado.
- *Interrelacionar los conceptos y contenidos con la práctica.* De forma correlativa con el punto anterior, la práctica que se lleve a cabo –sea la de resolución de problemas, de análisis de información, de experimentación o de comunicación– no debe perder de vista que debe estar dirigida al desarrollo conceptual propuesto. Un ejemplo común del cuidado que debe observarse sobre este aspecto es que, frecuentemente, el alumnado elabora alguna presentación poniendo el foco de atención en la estética de la presentación y no en los conceptos o el análisis de los mismos.
- *Tener claro de dónde se parte y a dónde se espera llegar en la comprensión de la temática.* Esto implica conocer las ideas previas de los alumnos, sus posibilidades dado el contexto escolar y, sobre todo, dar el tiempo necesario para alcanzar el logro de aprendizaje propuesto.
- *Considerar como eje central del aprendizaje el descubrimiento y la explicación.* Esto implica que la atención sobre el proceso de aprendizaje debe estar orientado hacia lo que el alumnado logre hacer por sí mismo en la elaboración de explicaciones, y en darse cuenta de los logros en la comprensión de los temas por ellos mismos.
- *Tener claros los niveles de logro en términos progresivos.* Los logros no son, como sabemos, los mismos para todos los individuos y es por ello que un proceso de aprendizaje progresivo debe tener en cuenta el progreso que cada alumno va alcanzando.
- *Socialización del aprendizaje.* Tener en cuenta que debe haber socialización de los logros que va alcanzando el alumnado en actividades colectivas –como seminarios, presentaciones o discusiones grupales–. Esto es, socializar lo desarrollado en el proceso de aprendizaje.

Desde luego que estos aspectos no son secuenciados, sino integrados en el proceso –tal y como se esquematiza en la figura 2.1–, pero que, en su conjunto, van de una menor a una mayor comprensión de los conocimientos científicos.



Figura 2.1. Esquema de un proceso de aprendizaje progresivo (elaboración propia).

**Las trayectorias representacionales** constituyen otra manera de ver el aprendizaje en términos del avance o progreso que los alumnos van obteniendo en su proceso de aprendizaje pero que, en lugar de tomar como eje del aprendizaje a los conceptos, su eje está constituido por las trayectorias y niveles que el alumnado va desarrollando en sus posibilidades de representación del conocimiento científico, en el cual están incluidos los conceptos y los recursos cognitivos que le permiten hacer explícitas sus formas de explicar e inferir sobre el conocimiento que van construyendo (Flores-Camacho *et al.*, 2021). En particular, desde esta perspectiva, se hace notar que el progreso en el aprendizaje del alumnado se evidencia conforme van construyendo representaciones más completas e interrelacionadas y estas se muestran en todas las formas de representación, esto es, en sus formas verbal, simbólica, gráfica, gestual y de acción operacional.

Para dar cuenta del avance en la comprensión del conocimiento científico por el alumnado desde el enfoque representacional, este proceso didáctico implica el establecimiento de niveles de representación. Estos niveles son un indicativo del estado de comprensión que guarda el alumnado con respecto a la temática abordada, pero además indican los procesos de apoyo que son necesarios

por parte del docente. En términos generales, se espera que –en el proceso de aprendizaje, de manera integrada– se alcancen cuatro niveles.

Nivel 1. Representaciones que reflejan lo observado en términos de los componentes físicos de un proceso, sea en forma verbal o pictórica.

Nivel 2. Representaciones que dan cuenta de relaciones entre los componentes de los fenómenos al comprender de la temática, de manera intuitiva y aproximada, que de cuenta de la construcción de explicaciones. Representaciones que requieren de la integración de formas de expresión verbal, gráfica y simbólica.

Nivel 3. Representaciones que establecen relaciones con otras representaciones para la construcción de explicaciones más coherentes y racionales, denotando relaciones causales que son necesarias para comprender la temática. En este nivel, las representaciones implican procesos de construcción que se expresan en forma verbal, gráfica, simbólica y, especialmente, a través de modelos operativos.

Nivel 4. Sistemas representacionales, esto es, que se desarrollen modelos explicativos que representan los elementos básicos de las teorías de la temática y que implican inferencias tanto explicativas como predictivas de manera coherente y suficiente de acuerdo con el nivel educativo del alumnado. Este nivel requiere el desarrollo de habilidades representaciones que pueden integrar las diversas formas de representación tanto verbal, gráfica, simbólica, como con modelos operativos y estructuras teóricas, hasta donde sea pertinente de acuerdo con el nivel de estudios del alumnado.

Estos cuatro niveles se explicitan en la siguiente figura 2.2.



*Figura 2.2. Esquema de los niveles de una trayectoria representacional (elaboración propia).*

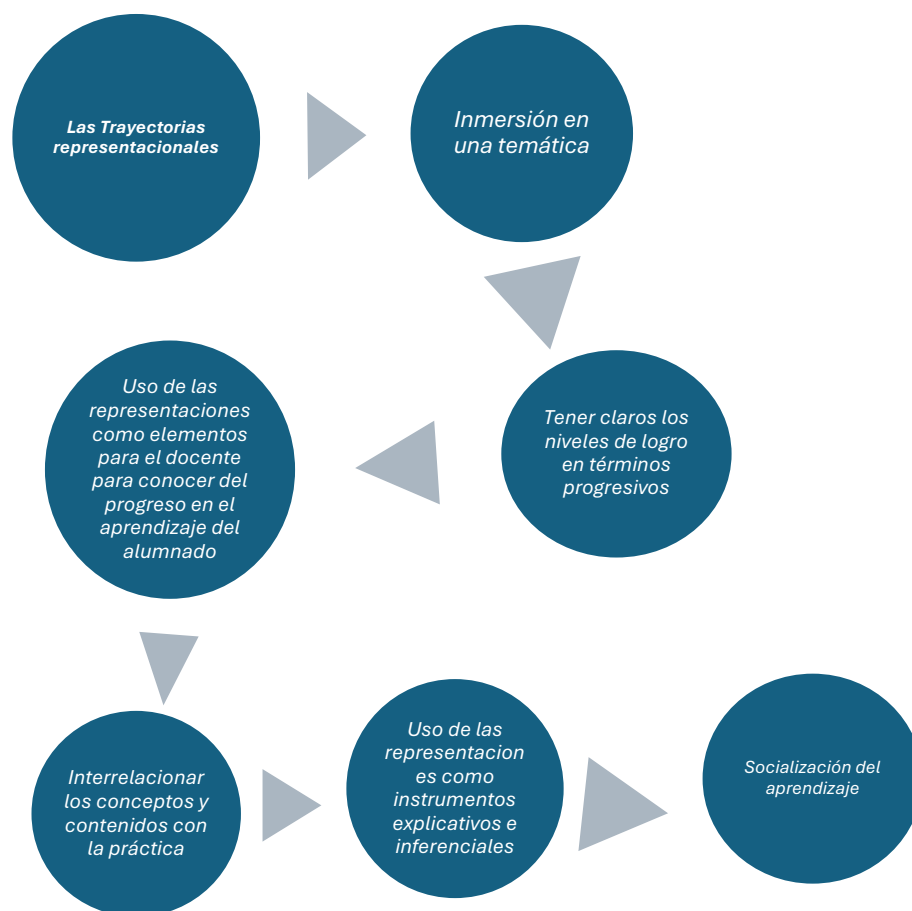


En esta propuesta, están integrados de manera indisociable temática-práctica-sujeto, pues los niveles de representación solo pueden verse a través de lo que cada estudiante representa en forma externa, esto es, la forma en la que representa y explicita sus ideas en alguno o en varios medios y formas de representación.

Las trayectorias representacionales implican que su tránsito entre niveles requieren, como en el aprendizaje progresivo, del tiempo necesario para su desarrollo y de procesos como los siguientes:

- *Inmersión en una temática.*
- *Interrelacionar los conceptos y contenidos con la práctica.*
- *Tener claros los niveles de dónde se parte y los niveles dónde se espera llegar en la comprensión de la temática.*
- *Considerar como eje central del aprendizaje las posibilidades inferenciales y la coherencia en las explicaciones.* Esto es, cómo a partir de sus representaciones cada estudiante elabora sus explicaciones y predicciones en torno a las relaciones que establece entre los elementos representados y su organización para dar una explicación o predicción plausible.
- *Uso de las representaciones como elementos para que el docente pueda conocer del progreso en el aprendizaje del alumnado.* Esto implica que, a través de las representaciones del alumnado, es posible darse cuenta de los elementos específicos que tiene cada estudiante, ya sea porque son suficientes o deficitarios.
- *Socialización del aprendizaje.*

La figura 2.3 muestra de manera esquemática este proceso.



*Figura 2.3. Esquema de la secuencia e integración de los niveles representacionales en un proceso de trayectoria representacional (elaboración propia).*

Si bien –como se ha apuntado– ambos enfoques tienen diversos aspectos en común, difieren en cuanto al proceso en el tiempo. Mientras que el aprendizaje progresivo indica una línea de tiempo de un punto de menor comprensión conceptual hacia otro de mayor, el proceso didáctico es, en todo caso, espiral, pues no indica la dinámica de la progresión.

Por su parte, las trayectorias representacionales implican niveles de logros definidos como los descritos que van desde las posibilidades del alumnado de representar su conocimiento y comprensión del mismo en un nivel descriptivo, centrado en su percepción directa, hasta un nivel más abstracto en el que se requiere representar relaciones complejas, tanto en los elementos de la representación como entre representaciones diversas para constituir o comprender sistemas explicativos como los modelos.

Finalmente, cabe apuntar que, en las dos perspectivas didácticas descritas, las actividades propuestas en el presente libro pueden llevarse a cabo a través de procesos instruccionales específicos como *solución de problemas*, lo cual puede ser aplicado a cada una de las actividades o bien bajo un *proceso de indagación*, en el cuál los docentes pueden integrar varias de las actividades del libro dependiendo de la propuesta indagatoria que establezcan para con sus alumnos.

## ¿CÓMO SE RELACIONAN AMBAS PROPUESTAS CON LAS ACTIVIDADES DE ESTE LIBRO?

Las actividades de este libro han sido elaboradas de manera congruente con un aprendizaje progresivo, sea visto este como desarrollo conceptual o como representacional. Su estructura implica una trayectoria, si bien no necesariamente secuenciada, sí orientada hacia la construcción de la noción y representación espacio-dimensional de objetos y procesos que ocurren en escalas que van de la meso escala a la nano escala. Las actividades en su conjunto implican un proceso inmersivo, pues todas ellas están referidas a la conceptualización y representación de los objetos en escalas pequeñas a través de procesos de medición.

Aunque las actividades se llevan a cabo a través de procesos de medición, en todos los elementos de su estructura didáctica se pone énfasis, en todo momento, a los aspectos representacionales y de comprensión de los tamaños que implican esos procesos de medición. De la misma forma, los elementos de análisis que se van intercalando en las acciones de medición dan cuenta de procesos explicativos y analíticos de lo que se lleva a cabo y de sus implicaciones conceptuales y representacionales.

Adicionalmente, las actividades implican diversas formas de representación que –como han apuntado Gallegos *et al.* (2007)– contribuyen a la construcción de aspectos complejos en la comprensión de la ciencia, como la conceptualización espacio-dimensional que, como lo muestra la investigación que da el motivo de este libro, es necesaria para la comprensión de la ciencia en la escala nanométrica.

Debido a lo anterior, el conjunto de actividades del libro pueden ser enfocadas, organizadas y orientadas didácticamente tanto por el aprendizaje progresivo como por el de trayectorias representacionales de acuerdo con intereses y preferencias de los docentes, y que, si bien se han presentado aquí de forma general, permiten, de acuerdo con los elementos interpretativos y de posibilidades que en la práctica docente cada profesor o profesora tiene, de ser ajustadas a su estilo de enseñanza.

Si bien, como se ha mostrado, la estructura de las actividades es congruente con enfoques centrados en el alumnado y atendiendo a que el aprendizaje no se da de una vez sino bajo procesos cognitivos de mediano plazo con el apoyo docente de manera relevante y continuo, otros enfoques de enseñanza –de preferencia del profesorado– pueden ser posibles de implementar con las actividades de este libro.

## AMPLIFICACIÓN O CÓMO VER LO MUY PEQUEÑO

### **¿Cuál es el propósito de aprendizaje?**

Esta actividad tiene como propósito la construcción de una representación espacio-dimensional de lo que implica observar, desde lo que podemos ver a simple vista hasta objetos que no logramos ver a simple vista pero que se podrán observar cuando es posible ampliarlos. Para ello, se propone determinar los factores de amplificación desde un objeto que podemos ver comúnmente a simple vista hasta verlo en el orden de la nano escala y, de manera correlativa, para dar una idea de lo que los factores de amplificación implican, se llevará a cabo un proceso de amplificación sucesiva con la Tierra vista desde el espacio hasta observar objetos en la escala del orden del metro.

### *¿Cuál es nuestra escala de visión?*

Nuestra visión nos permite ver objetos de tamaños en la escala de los metros. Si una persona coloca, sin mover la cabeza ni los ojos, una regla de un metro frente a sus ojos a la distancia de diez centímetros de su nariz ¿Qué tanto se alcanzará a ver de la regla? ¿Qué números se podrán ver?

Desde luego, al alejar la regla unos veinte centímetros, se verá una sección mayor de la regla y se distinguirán más números ¿Qué números se alcanzarán a ver ahora?

Al respecto, se podría argumentar que también se ven objetos muy grandes como un edificio muy alto o una montaña del orden de kilómetros, como el volcán Popocatepetl. ¿En realidad se ven esos objetos del tamaño que tienen? Si solo pueden verse unos cuantos centímetros de la regla ¿Cómo se puede saber que las montañas son de kilómetros de alto y ancho o que un edificio tiene una altura de decenas de metros? Una discusión en clase podría ser conveniente.

### *¿Por qué interesa ver objetos que no podemos ver a simple vista?*

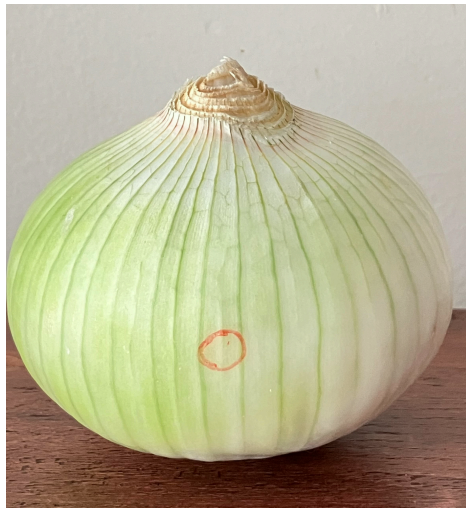
La posibilidad de ver objetos y detalles de objetos que no distinguimos a simple vista tiene su origen en el proceso de refracción de la luz. Cuando la luz pasa de un medio transparente a otro como del aire al agua o del aire a un vidrio, la trayectoria del haz (o en sentido figurado rayos de luz) cambia su trayectoria. Cuando el objeto –por ejemplo, una lente– tiene forma convexa por ambos lados, la imagen que vemos a través de ella está amplificada. Cuántas veces se amplifique depende del radio de curvatura de las superficies de la lente. Seguramente han usado lupas que tienen diferente amplificación ¿En qué situaciones y para qué se usan?

En el siglo XVI, se dieron cuenta que con la combinación de lentes se podía ampliar aún más lo observado. Así se inventaron el microscopio y el telescopio. Con ello, Galileo pudo observar detalles de la Luna y Leeuwenhoek observó microorganismos. No es difícil imaginar lo que ambos instrumentos implicaron para el conocimiento de la biología y de la materia como para el conocimiento del espacio estelar.

Una breve discusión en clase de esas implicaciones sería de utilidad para responder a ¿por qué interesa ver objetos que no podemos ver a simple vista?

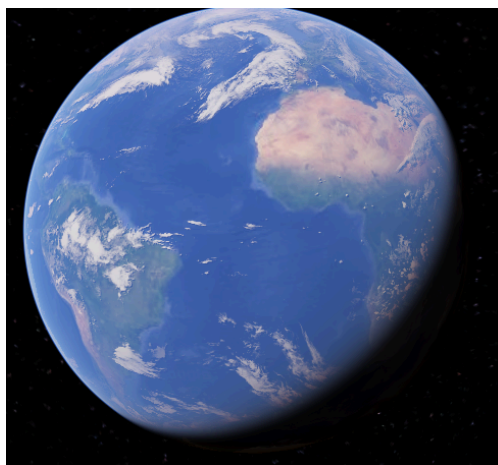
### Qué hacer

Para construir una representación de lo que implica la amplificación que necesitamos para ver objetos cada vez más pequeños, se llevarán a cabo dos acciones en paralelo: en la primera, a partir de una cebolla, veremos su estructura y componentes al ir ampliando una sección marcada con un círculo como se muestra en la figura 3.1. A partir de la imagen obtenida en clase, deberá llevarse a cabo la amplificación como se indica en el procedimiento. Para mayores amplificaciones, se presentan las imágenes correspondientes que se indican en el desarrollo de la actividad. Se deberá especificar el factor de amplificación y su correspondiente expresión en potencias de 10.



*Figura 3.1. Imagen de cebolla (elaboración propia).*

En la segunda parte se utilizará el programa *Google Earth* y, de manera paralela, partiendo de una imagen de la Tierra como la que se muestra en la figura 3.2, que sea aproximada al tamaño de la cebolla. A partir de ella, se irá ampliando con el mismo factor de amplificación para el caso de la cebolla y se describirá el tamaño de lo que se observa en la Tierra y la escala correspondiente en potencias de 10. Como en el caso de la cebolla, se deberá escoger un lugar sobre la superficie de la tierra sobre la que se centrará la amplificación.



*Figura 3.2. Imagen de la Tierra de Google Earth, semejante al tamaño de la cebolla*

### **¿Por qué y para qué hacer esta actividad?**

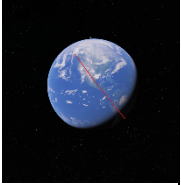
La mayoría de nosotros cuando escuchamos de células, microorganismos, virus, microchips, nanotubos o moléculas sabemos que son entidades muy pequeñas, pero tenemos poca claridad de qué tan pequeñas y cuánto habría que aumentar nuestra capacidad de visualización para poder verlas. Tener una idea espacio-dimensional de lo pequeño que esas entidades son contribuye a nuestra comprensión de la naturaleza. Por ello, esta actividad está planteada con la finalidad de poder tener una visualización, en términos comparativos de los procesos de amplificación, para construirnos una representación de lo que implica comprender el tamaño de esas entidades pequeñas que se encuentran en las escalas de los micrómetros y nanómetros.

### **Desarrollo**

Para el caso de la cebolla, es necesario contar con una de aproximadamente 10 cm de ancho y hacerle una marca de un pequeño círculo de 1 cm de diámetro aproximadamente y fotografiarla como se muestra en la figura 3.1. Para el caso de la Tierra, se utiliza el programa *Google Earth* y se ajusta la imagen de la Tierra hasta que se vea aproximadamente de 10 cm (lo puedes medir con una regla sobre la pantalla) de manera que ambos objetos sean aproximadamente del mismo tamaño; ver la figura 3.2. Una vez lograda esa imagen, entre los datos que proporciona ese programa, se puede saber la distancia respecto al nivel del mar a la que estaría una cámara fotográfica para ver la Tierra de ese tamaño (este dato se localiza en la esquina inferior derecha entre la escala y las coordenadas), se puede imaginar a una persona tomando esa fotografía desde una nave espacial a esa distancia. Con la aplicación de medición del programa *Google Earth* se mide una sección lineal de la superficie de la Tierra de 10 millones de metros, esto es 10 mil kilómetros y anotar qué tanta sección de la Tierra abarca esa medida. Deberá notarse y anotarse cuál sería la escala en metros para ambos casos, expresada en metros y expresada también en potencias de diez.

Para conservar las acciones paralelas, pueden organizarse en tablas como la siguiente:

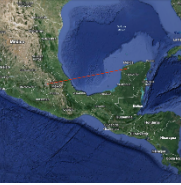
Tabla 1.1 Comparación de tamaños relativos Tierra-cebolla

| Cebolla                                                                           |          |                    |            | Tierra                                                                             |           |                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Imagen                                                                            | Medida m | Potencias de 10    | Ampliación | Imagen                                                                             | Medida m  | Potencias de 10   | Ampliación |
|  | 0.10     | $0.10 \times 10^0$ | 0          |  | 10,00,000 | $0.1 \times 10^8$ | 0          |
| Descripción elementos observables                                                 |          |                    |            | Descripción elementos observables                                                  |           |                   |            |

Es necesario describir lo que se distingue de la estructura o compontes de cada objeto dentro del intervalo de esa medida, es decir 10 cm para la cebolla y 10 millones de metros para la Tierra.

A continuación, para el caso de la cebolla se deberá tomar una fotografía con una cámara de celular con una ampliación de 10 veces, centrando la fotografía en el círculo marcado en la cebolla. De manera correspondiente se deberá hacer una ampliación de la Tierra de manera que se amplíe también 10 veces, cuidando de centrar la imagen en la sección de la Tierra que fue seleccionada y que esta quede al centro para que se pueda medir nuevamente la distancia entre dos puntos que corresponda a un submúltiplo de 10. Para el registro se puede usar la tabla siguiente.

Tabla 1.2. Comparación de tamaños relativos Tierra-cebolla. Ampliación diez veces

| Cebolla                                                                             |          |                       |            | Tierra                                                                              |          |                   |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|------------|
| Imagen                                                                              | Medida m | Potencias de 10       | Ampliación | Imagen                                                                              | Medida m | Potencias de 10   | Ampliación |
|  | 0.010    | $0.10 \times 10^{-1}$ | 10         |  | 1,00,000 | $0.1 \times 10^7$ | 10         |
| Descripción elementos observables                                                   |          |                       |            | Descripción elementos observables                                                   |          |                   |            |

Como siguiente paso, se continuará con el mismo proceso, pero ahora se proporcionan imágenes de la cebolla amplificadas de 10 en 10 veces. Se deberá hacer lo mismo con la Tierra. Es conveniente elegir un lugar conocido o preferido de la Tierra e ir centrando las ampliaciones en torno a, por ejemplo, una ciudad para que conforme se va ampliando la imagen puedan distinguirse objetos como casas, marcas o personas.

Tabla 1.3. Comparación de tamaños relativos Tierra-cebolla. Ampliación cien veces

| Cebolla |          |                 |            | Tierra |          |                 |            |
|---------|----------|-----------------|------------|--------|----------|-----------------|------------|
| Imagen  | Medida m | Potencias de 10 | Ampliación | Imagen | Medida m | Potencias de 10 | Ampliación |

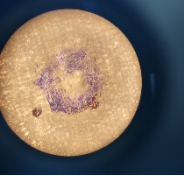
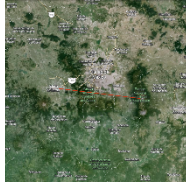
|                                                                                   |        |                       |     |                                                                                   |         |                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------|-----------------------|-----|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------------|-----|
|  | 0.0010 | $0.10 \times 10^{-2}$ | 100 |  | 100,000 | $0.1 \times 10^6$ | 100 |
| Foto microscopio                                                                  |        |                       |     |                                                                                   |         |                   |     |
| Descripción elementos observables                                                 |        |                       |     | Descripción elementos observables                                                 |         |                   |     |

Tabla 1.4. Comparación de tamaños relativos Tierra-cebolla. Ampliación mil veces

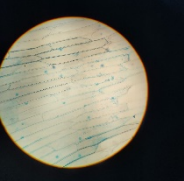
| Cebolla                                                                           |          |                       |            | Tierra                                                                             |          |                   |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------|-----------------------|------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|------------|
| Imagen                                                                            | Medida m | Potencias de 10       | Ampliación | Imagen                                                                             | Medida m | Potencias de 10   | Ampliación |
|  | 0.000,10 | $0.10 \times 10^{-3}$ | 1,000      |  | 10,000   | $0.1 \times 10^5$ | 1,000      |
| Descripción elementos observables                                                 |          |                       |            | Descripción elementos observables                                                  |          |                   |            |

Tabla 1.5. Comparación de tamaños relativos Tierra-cebolla. Ampliación diez mil veces

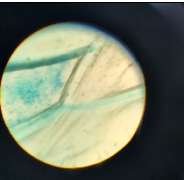
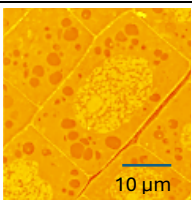
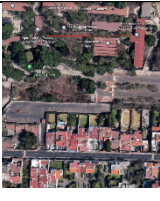
| Cebolla                                                                             |           |                       |            | Tierra                                                                               |          |                   |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|------------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|------------|
| Imagen                                                                              | Medida m  | Potencias de 10       | Ampliación | Imagen                                                                               | Medida m | Potencias de 10   | Ampliación |
|  | 0.000,010 | $0.10 \times 10^{-4}$ | 10,000     |  | 1,000    | $0.1 \times 10^4$ | 10,000     |
| Descripción elementos observables                                                   |           |                       |            | Descripción elementos observables                                                    |          |                   |            |

Tabla 1.6. Comparación de tamaños relativos Tierra-cebolla. Ampliación cien mil veces

| Cebolla                                                                             |           |                       |            | Tierra                                                                              |          |                   |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------|------------|
| Imagen <sup>2</sup>                                                                 | Medida m  | Potencias de 10       | Ampliación | Imagen                                                                              | Medida m | Potencias de 10   | Ampliación |
|  | 0.000,001 | $0.10 \times 10^{-5}$ | 100,000    |  | 100      | $0.1 \times 10^3$ | 100,000    |
| Descripción elementos observables                                                   |           |                       |            | Descripción elementos observables                                                   |          |                   |            |

<sup>2</sup> Micrografía de fuerza atómica de la célula de meristemo de cebolla cortesía del Dr. Luis Felipe Jiménez García y de la Dra. María de Lourdes Segura Valdez del Laboratorio de Neurobiología Celular del Dpto. de Biología Celular de la Facultad de Ciencias, UNAM.



Como se podrá notar, para llegar a observar moléculas de la cebolla se requiere de ampliar cien millones de veces, esto implica llegar hasta la escala de los nanómetros (nm), pasando por los micrómetros ( $\mu\text{m}$ ). Esta ampliación es la misma que, como se podrá notar, se requiere para ver un objeto un poco menor a un metro, desde una distancia de un millón de metros o mil kilómetros lejos de la Tierra. **En el anexo 1 se muestran los prefijos de múltiplos y submúltiplos de las unidades del Sistema Internacional de Unidades.**

### ¿Qué analizar?

En una sesión en clase o por equipos se deberá llevar a cabo una discusión sobre las siguientes preguntas y escribir las conclusiones o consideraciones a las que se lleguen.

- ¿Qué tan pequeño habían pensado, previo a la actividad, que es un objeto cuando oían alguna referencia a la nanociencia o nanotecnología?
- ¿Consideran que la comparación que se llevó a cabo con las ampliificaciones requeridas en el *Google Earth* para ver desde lejos de la Tierra, un objeto en la escala de metros ha sido útil para imaginar lo que implica esa misma cantidad de ampliificación para observar objetos en las escalas micro y nano?
- ¿Cómo se explicaría a otras personas que implica lo pequeño que es un objeto a nano escala?

### Algo más

¿Qué hay más allá de la nano escala?

Los objetos a nano escala, aunque parezca extraño, son aún muy grandes para otras entidades de la materia como los átomos y partículas como los protones, neutrones y electrones e incluso hay entidades más pequeñas como los cuarks. Sin embargo, de esos objetos no es posible más que hacer estimaciones y mediciones indirectas de sus dimensiones: con excepción de algunos átomos que pueden “observarse” con microscopios de efecto túnel<sup>3</sup>, no es posible observar ninguna de esas otras partículas.

Para generar una idea de qué tanto más sería necesario amplificar la escala de observación, se puede llevar a cabo, en conjunto con los integrantes de la clase, una búsqueda de información y completar las siguientes tablas, así como llevar a cabo una discusión en clase<sup>4</sup>. Dependiendo de la información que consigan, será el átomo que utilizarán como datos para completar las tablas

Tabla 1.7. Tabla para la dimensión del átomo.

| Átomo de:   |                 |            |
|-------------|-----------------|------------|
| Medida en m | Potencias de 10 | Ampliación |
|             |                 |            |

<sup>3</sup> Para saber sobre los tipos de microscopios y tipos de imágenes que permiten tener dimensiones a escala atómica, sugerimos la lectura Martín Gago, J. A. (2009). Microscopía para el estudio de materiales y láminas delgadas, <https://www.researchgate.net/publication/267306323>.

<sup>4</sup> Sugerimos la lectura del artículo Medina, J. (2001). Dimensiones y curiosidades de los átomos, *Conciencia Tecnológica*, 18, 15-17. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94401805>.

Tabla 1.8. Tabla para la dimensión del núcleo del átomo

| Núcleo del átomo de:              |                 |            |
|-----------------------------------|-----------------|------------|
| Medida en m                       | Potencias de 10 | Ampliación |
|                                   |                 |            |
| Descripción elementos observables |                 |            |
|                                   |                 |            |

Tabla 1.9. Tabla para la dimensión del protón

| Protón                            |                 |            |
|-----------------------------------|-----------------|------------|
| Medida en m                       | Potencias de 10 | Ampliación |
|                                   |                 |            |
|                                   |                 |            |
| Descripción elementos observables |                 |            |
|                                   |                 |            |

Tabla 1.10. Tabla para la dimensión del electrón

| Electrón                          |                 |            |
|-----------------------------------|-----------------|------------|
| Medida en m                       | Potencias de 10 | Ampliación |
|                                   |                 |            |
| Descripción elementos observables |                 |            |
|                                   |                 |            |

- ¿Cuánta ampliación se requeriría si se pudiera observar cada uno de esos objetos?

## MEDICIÓN DE CUERPOS PEQUEÑOS

### ¿Cuál es el propósito de aprendizaje?

En la actividad previa, el propósito es construir una representación por comparación de un proceso de ampliación, desde una escala de observación cotidiana, hasta llegar a observar objetos a escalas pequeñas. Sin embargo, esta comparación se llevó a cabo de manera simulada, esto es, sin hacer las observaciones y mediciones de manera directa. Llevar a cabo ese proceso de ampliación de manera experimental implica no solo conocer cómo se puede hacer, sino también construir habilidades y representaciones de cómo la ampliación permite conocer procesos y estructuras de los objetos, lo que contribuye a comprenderlos y dimensionarlos en sus tamaños reales.

### *Medidas que hacemos comúnmente*

Es común haber medido el largo, ancho o alto de objetos que nos son cotidianos, para lo que usualmente se usan reglas cuyas graduaciones son menores a la del tamaño del objeto. Por ejemplo, se mide la longitud de un mueble para saber si cabe en el lugar en el que se quiere colocar o se miden las dimensiones de un terreno para la construcción de una casa. Esto lo hacemos con una regla, un flexómetro o un medidor de ultrasonido con los que se pueden medir varios metros y cuya graduación más pequeña son los milímetros. Esto es, una milésima de metro. Cuando se requiere una medición más precisa de un objeto pequeño o para hacer algún objeto de precisión, se utiliza un calibrador Vernier que tiene una graduación en décimas de milímetro. Sin embargo, no es usual medir objetos más grandes como tampoco más pequeños.

Esta actividad se enfocará en los objetos pequeños y si bien es probable que se haya utilizado algún instrumento como el microscopio, probablemente solo ha sido para observar, pero no para medir el tamaño de lo observado.

Una discusión en clase de lo que han medido y cómo lo han hecho sería útil para esta actividad.

### Qué hacer

En toda medición se requiere un objeto sobre el cual comparar la dimensión que se quiere medir. En las medidas cotidianas este objeto es el metro o bien alguna de sus subdivisiones; centímetro o milímetro y, en algunos casos, como con el Vernier que tiene un dispositivo movable con una subescala que permite medir hasta las décimas de milímetro. La figura 4.1 muestra instrumentos comunes para medir dimensiones longitudinales.



Figura 4.1. Instrumentos para medir longitudes o distancias: flexómetro, regla, cinta métrica, vernier o calibrador y medidor electrónico de distancias (elaboración propia).

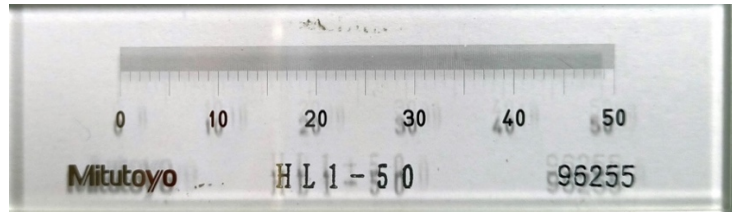
Sin embargo, para medir objetos más pequeños, no tenemos objetos con los cuales compararlos de manera directa. Pero sí es posible construir una forma de comparación amplificando uno de esos objetos. A estos objetos que nos permiten comparar para medir se les denomina usualmente *objetos o elementos de referencia* o testigo.

A continuación, se presenta cómo se elaboró para esta actividad un elemento de referencia o testigo. Para ello, se utilizó: Regla graduada en décimas de milímetro ( $10^{-4}$  m) y un microscopio para determinar factores de ampliación.

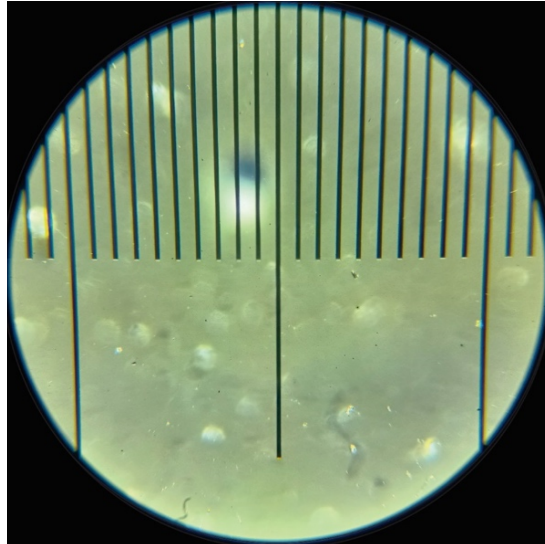
#### *Obtención de las dimensiones del cuerpo de referencia o testigo*

Se utilizó una regla de precisión de 50 mm, graduada en décimas de milímetro (marca Mitutoyo) —que se muestra en la figura 4.2 y a la que se le tomaron fotografías a través del microscopio—. Estas reglas se usan para mediciones de precisión con un error menor a 2 micrómetros.

Las figuras 4.3, 4.4 y 4.5 muestran la escala vista a través de tres objetivos del microscopio (4x, 10x, 40x) con los cuales se puede determinar diversos factores de ampliación. Dicho factor se aplicará a la fotografía de la muestra a la que se desea determinar su tamaño real, de acuerdo con el objetivo empleado al tomar su fotografía. Para poder comparar las fotografías en la pantalla o bien en una impresión en papel de las muestras con las de la escala, el campo de observación del microscopio (circulo negro) que delimita las imágenes deben medir lo mismo que el campo de observación con el que se tomó la imagen del objeto de referencia, en este caso de la escala de la regla.



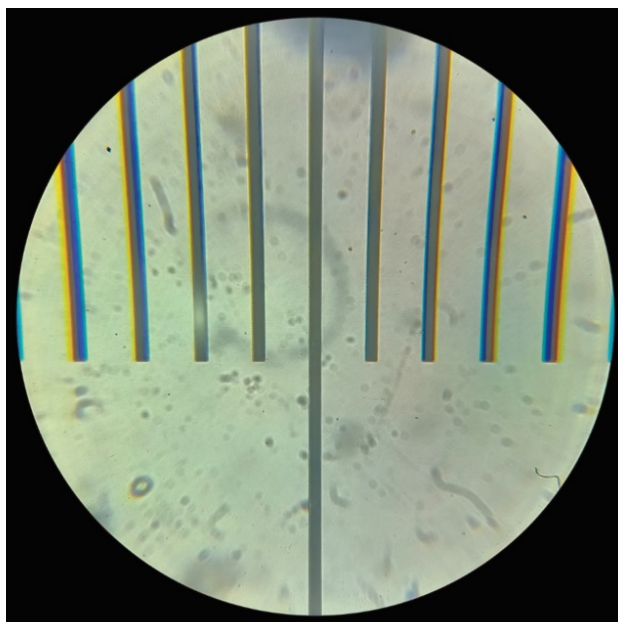
*Figura 4.2. Regla para determinar la referencia:  
Escala en base de vidrio para calibración<sup>5</sup> (elaboración propia).*



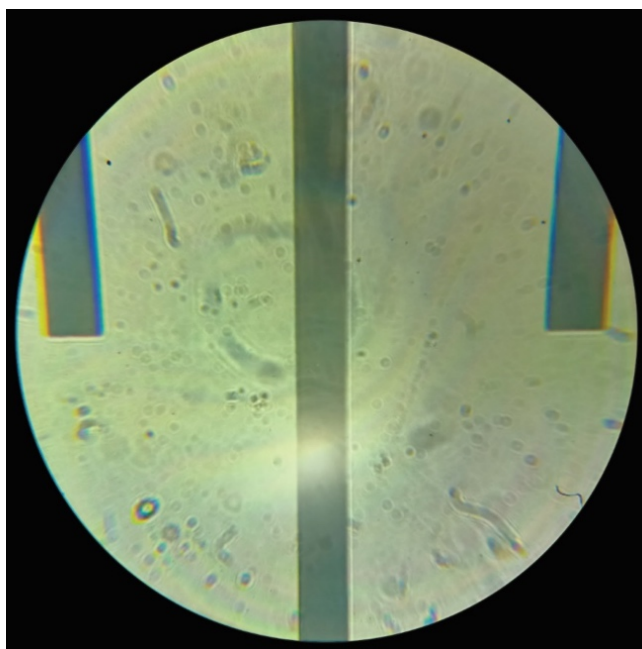
*Figura 4.3. Imagen de la escala al microscopio con objetivo de 4x.  
Las líneas largas están separadas un milímetro, mientras que las líneas cortas  
están separadas una décima de milímetro (elaboración propia).*

---

<sup>5</sup> Fotografía proporcionada por el Grupo de Ingeniería de Precisión y Metrología (Laboratorio de metrología) del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).



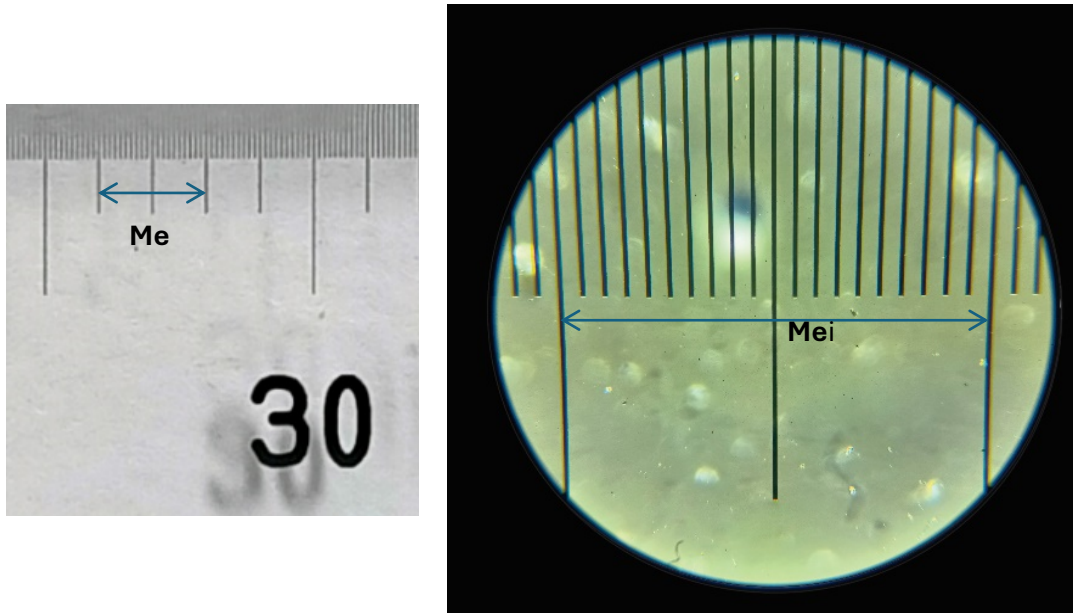
*Figura 4.4. Imagen de la escala al microscopio con objetivo de 10x (elaboración propia).*



*Figura 4.5. Imagen de la escala al microscopio con objetivo de 40x (elaboración propia).*

En las figuras 4.3, 4.4 y 4.5, la distancia entre dos líneas es de una décima de milímetro ( $0.1 \text{ mm} = 0.0001 \text{ m}$ ), las líneas largas corresponden al milímetro y las cortas a las divisiones de décimas de milímetro. Las líneas en la parte superior de las imágenes se observan curvadas debido a un efecto de las lentes del microscopio. Nótese que la distancia entre líneas de las tres imágenes (4.3, 4.4 y 4.5) va creciendo debido a que aumenta la ampliación.

Para poder utilizar esas imágenes como elemento de referencia o testigo, deberá determinarse el factor de ampliación en ellas. Para determinar el factor de ampliación ( $Fa$ ) entre dos líneas de la regla, cuya distancia real (una décima de milímetro) –que denominaremos  $Me$ –, se debe medir la distancia al centro de la fotografía tomada a través del microscopio, lo que constituye la medida  $Mei$ , como se muestra en la figura 4.6. Para ello debe tomarse la medida al centro de la imagen para evitar la deformación que se observa cerca de sus orillas. La medida de la distancia entre dos de ellas se hace al centro de las líneas o en ambas orillas del mismo lado, ya sean a la izquierda o a la derecha.



*Figura 4.6. Porción de dos milímetros de la regla ( $Me$ ), que se amplifica al proyectar la fotografía tomada cuando se observa a través del microscopio ( $Mei$ ) (elaboración propia).*

El factor de ampliación se define por la proporción que hay entre ambas medidas y se determina por el cociente:

$$Fa = Mei / Me$$

El valor del factor de ampliación depende de cuál sea el tamaño final de la imagen de la fotografía tomada a través del microscopio con que se trabaje para calcularla. Por esto, las fotografías de la escala y de las muestras deben de ser del mismo tamaño. En este caso, se tiene que el campo circular que delimitan las imágenes es del mismo tamaño y corresponde a 10 cm.

El factor de ampliación  $Fa$  no debe confundirse con la ampliación del microscopio. La primera corresponde a la ampliación final que se obtiene del objeto cuando su fotografía se proyecta en la pantalla o se imprime, mientras que la segunda corresponde a la ampliación de la imagen debida a las cualidades ópticas de las lentes que conforman el objetivo y el ocular.

Si en lugar de escala de una regla se tiene un objeto de dimensiones conocidas, como elemento de referencia o testigo, el proceso es el mismo y el factor de amplificación se determina de la misma manera.

El factor de amplificación no es más que el factor de proporcionalidad entre dos cantidades.

Un ejercicio simple para dar cuenta de la proporción entre dos medidas es encontrar la proporción entre el grueso o ancho y el largo de un lápiz que se tenga a mano.

### **¿Por qué y para qué hacer esta actividad?**

Los procesos de medición permiten representarnos a través de los objetos reales sus dimensiones espaciales y saber a simple vista, por ejemplo, que tan pequeños son unos de otros. Sin embargo, cuando se trata de objetos muy pequeños que apenas distinguimos o incluso que no podemos ver, la representación que hacemos de las dimensiones ya no nos proporciona una idea fiable de qué tan pequeños son unos en relación a otros. Medirlos y determinar procesos para ello contribuye a la construcción de la representación de los objetos pequeños. Además, conocer cómo poder medir objetos pequeños ayuda a comprender el porqué del diseño de aparatos y procesos, su función y utilidad, aspecto relevante para comprender elementos y facetas de las mediciones en la ciencia y la tecnología a escala pequeña.

### **Desarrollo**

Se propone la medición del grosor de un cabello, un hilo de telaraña y el tamaño de una célula de cebolla o de elodea. Para ello, se utilizarán los materiales que se describen enseguida y las imágenes proporcionadas en la sección previa para determinar, por medio del factor de amplificación, el tamaño de los objetos medidos.

#### **Material:**

- Microscopio óptico con objetivos 4x, 10x y 40x
- 3 juegos de portaobjetos y cubreobjetos
- Teléfono celular con cámara (también puede usarse una cámara web)
- Soporte universal con nueces y pinza de tres dedos o trípode con sujetador para cámara o celular
- Computadora (en caso de usar una cámara web)
- Alambre de calibre pequeño
- Muestra de cabello
- Muestra de hilo de telaraña
- Muestra de células de elodea o de cebolla

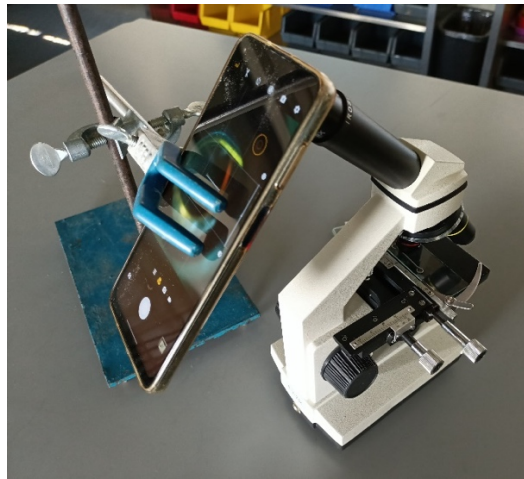
#### *Preparación de muestras*

Para tener las muestras, se deberá colocar un cabello, el hilo de telaraña y las células de cebolla o elodea en un portaobjetos de manera que queden fijas; si es necesario, se puede usar un cubreobjetos. El alambre no requiere de ser colocado sobre un portaobjetos. Las muestras preparadas y el alambre se irán colocando en la platina de microscopio.

Para tomar las fotografías se puede iniciar con el objetivo de menor amplificación. Antes de tomar las fotografías, se debe ajustar el enfoque del microscopio visualmente de acuerdo con



cada objetivo hasta obtener las imágenes nítidas de las muestras, procurando que estas queden centradas en el campo visual. Para tomar las fotografías, se puede montar en el microscopio la cámara del celular o una cámara web. La lente de la cámara se deberá centrar y alinear con el ocular del microscopio hasta obtener una imagen nítida y completa del campo del microscopio en la pantalla. Debe cuidarse que la cámara del celular no enfoque automáticamente al ocular y de no mover la cámara cuando se cambie el objetivo del microscopio. Las figuras 4.7 y 4.8 ilustran una forma de llevar a cabo el montaje para el caso del celular y la cámara web, respectivamente.



*Figura 4.7. Montaje de teléfono celular colocado al frente del ocular para tomar fotografías (elaboración propia).*

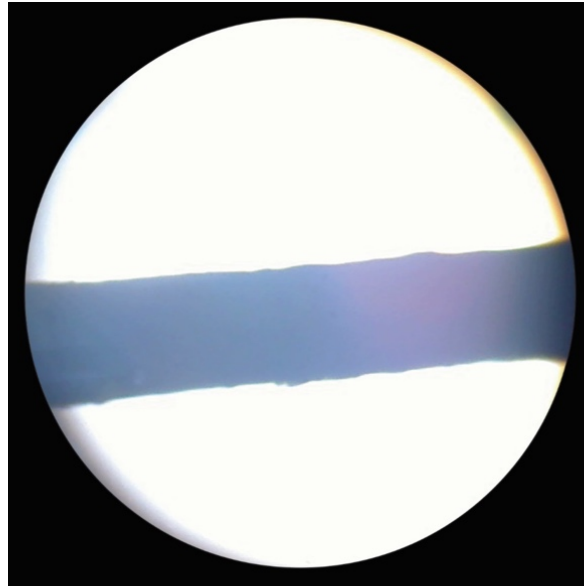


*Figura 4.8. Montaje de la cámara web frente al ocular para tomar fotografías (elaboración propia).*

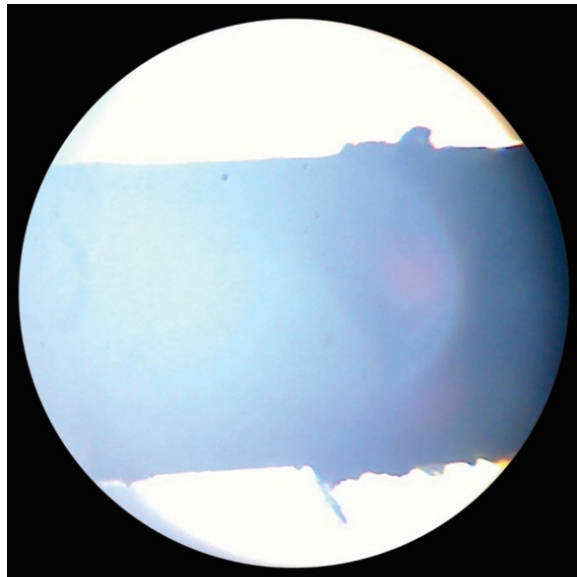
### *Procedimiento*

Se deberán tomar las fotografías de las muestras puestas al microscopio, para obtener imágenes como las que se muestran en las figuras 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12. La regla vista al microscopio de las

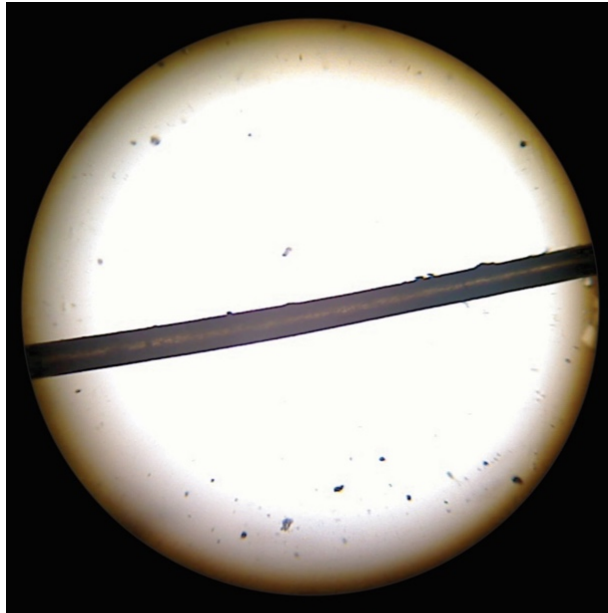
figuras 4.3, 4.4 y 4.5 podrá utilizarse para comparar las dimensiones con las imágenes obtenidas de las muestras y obtener sus dimensiones con el factor de amplificación.



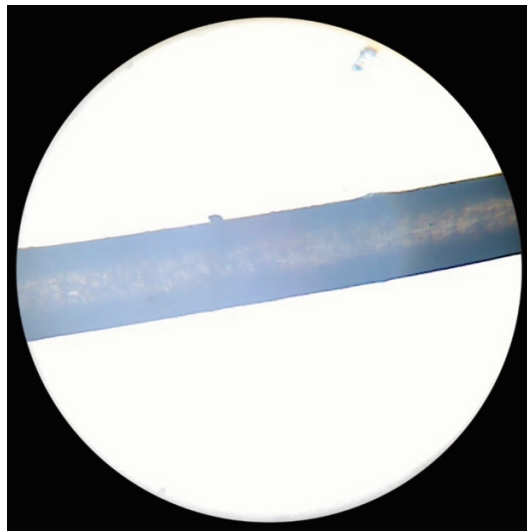
*Figura 4.9. Alambre, tomado con el objetivo 4x (elaboración propia).*



*Figura 4.10. Alambre, tomado con el objetivo 10x (elaboración propia).*



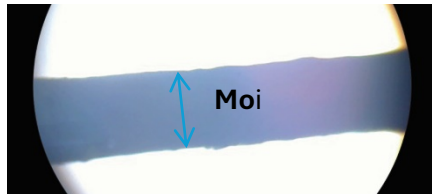
*Figura 4.11. Cabello humano, tomado con el objetivo 4x (elaboración propia).*



*Figura 4.12. Cabello humano, tomado con el objetivo 10x (elaboración propia).*

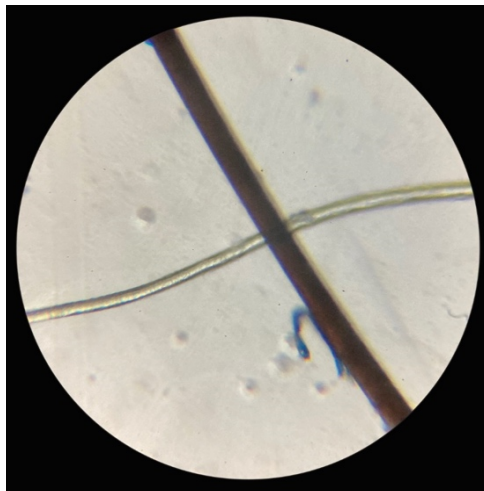
El ancho del alambre y del cabello también se puede medir con el Vernier. El círculo negro que delimita el campo de observación del microscopio es de 10 cm e igual para las tres fotografías tomadas del microscopio.

A partir de la fotografía, proyectada en una pantalla o impresa, el ancho del alambre o del cabello se deben medir perpendicularmente, como se muestra en la figura 4.13, asignando a esta medida la expresión *Moi*.



*Figura 4.13. La medición del ancho del objeto en la fotografía (Moi) se hace perpendicularmente al objeto (elaboración propia).*

Este proceso se puede seguir para determinar el grosor del hilo de telaraña y de la célula de la elodea, como se muestran en las figuras 4.14 y 4.15, utilizando el factor de amplificación que se obtiene con la escala de la regla correspondiente a la amplificación del objetivo del microscopio utilizado.



*Figura 4.14. Cabello e hilo de telaraña vistos con objetivo de 10x<sup>6</sup>. El círculo negro que delimita el campo de observación del microscopio es de 10 cm e igual para las dos fotografías tomadas del microscopio. (Cortesía de los alumnos Aurora Ahumada Lemus y Christopher Yael Lazcano Tovar).*

---

<sup>6</sup> Fotografía proporcionada por Violeta de la Aurora Ahumada Lemus y Christopher Yael Lazcano Tovar, estudiantes de la carrera de Física de la Facultad de Ciencias (FC) de la UNAM.

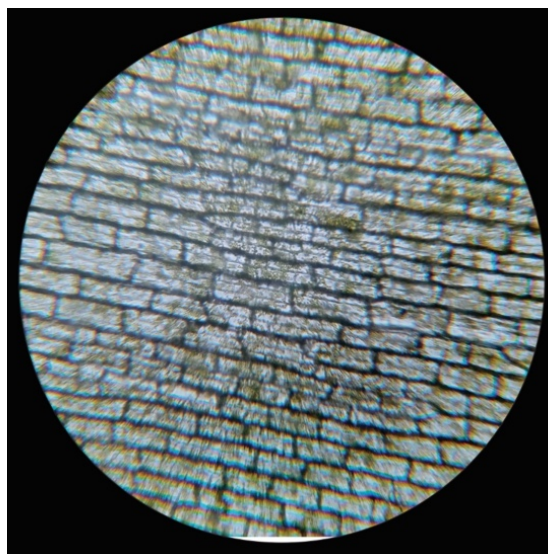


Figura 4.15. Célula de elodea vista con objetivo de 10x. El círculo negro que delimita el campo de observación del microscopio es de 10 cm (elaboración propia).

### ¿Cuánto miden las muestras?

En las fotografías que se obtuvieron, se mide el ancho de los objetos para determinar su magnitud real aprovechando la proporción con respecto del objeto de referencia. El factor de ampliación del objeto de referencia y su inverso se encuentran registrados en las dos últimas columnas de la Tabla 2.1. En la columna “Dimensión”, se indica el número de rayas de la parte de la escala que se considera como medida de referencia y cuya magnitud se expresa en la columna “Medida *Me*”. El número de rayas depende del objetivo que se emplea, ya que cuando el objetivo da más ampliación, su campo de observación se reduce. Por esto, el número de rayas es menor para objetivos de mayor ampliación, como se puede observar en las figuras 4.3, 4.4 y 4.5. En la columna “Medido en la pantalla: *Mei*” se indica la distancia entre el número de rayas seleccionadas para cada objetivo cuando se proyecten en pantalla o se impriman.

Tabla 2.1. Factores de ampliación de la escala de referencia para los distintos objetivos del microscopio (elaboración propia).

| Objeto                       | Dimensión                 | Objetivo | Medida <i>Me</i>             | Medido en la pantalla: <i>Mei</i> | Proporción directa: $Fa = Mei/Me$ | Proporción inversa: $1/Fa$ |
|------------------------------|---------------------------|----------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Objeto de referencia: Escala | Distancia entre 21 líneas | 4x       | $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ | $7.4 \times 10^{-2} \text{ m}$    | $74/2 = 37$                       | $2/74 = 0.027$             |
|                              | Distancia entre 9 líneas  | 10x      | $8 \times 10^{-4} \text{ m}$ | $7.9 \times 10^{-2} \text{ m}$    | $79/0.8 = 98.75$                  | $0.8/79 = 0.0101$          |
|                              | Distancia entre 3 líneas  | 40x      | $2 \times 10^{-4} \text{ m}$ | $8 \times 10^{-2} \text{ m}$      | $80/0.2 = 400$                    | $0.2 / 80 = 0.0025$        |

En los resultados de las medidas que se realicen de las muestras, es importante no dejar de indicar el aumento del objetivo del microscopio que se empleó al tomar la fotografía, como se

muestra en la Tabla 2.2. Esto para asociar la fotografía correspondiente con el factor de amplificación que se requiere emplear para calcular la dimensión real de los objetos.

Tabla 2.2. Tabla de llenado las mediciones de las muestras obtenidas en las fotografías al microscopio.  
(Elaboración propia)

| Objeto           | Dimensión | Objetivo | Medida del objeto en la pantalla:<br><i>Moi</i> | Medida real calculada<br>$Mo = Moi/Fa$                                      |
|------------------|-----------|----------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Alambre          | Ancho     | 4x       | $2.1 \times 10^{-2} \text{ m}$                  | $2.1 \times 10^{-2} \text{ m} \times 0.027 = 5.68 \times 10^{-4} \text{ m}$ |
|                  |           | 10x      |                                                 |                                                                             |
| Cabello          | Ancho     | 4x       | $5 \times 10^{-3} \text{ m}$                    |                                                                             |
|                  |           |          |                                                 |                                                                             |
| Hilo de telaraña | Grosor    |          |                                                 |                                                                             |
| Célula de Elodea | Largo     |          |                                                 |                                                                             |
|                  |           |          |                                                 |                                                                             |

La medida de la magnitud desconocida del objeto, como se puede apreciar, se calcula multiplicando la proporción inversa del factor de amplificación por la magnitud de la medida directa del objeto obtenida en la imagen de la fotografía a través del microscopio. Este resultado se anotará en la columna “Medida real calculada:  $Mo = Moi/Fa$ ” de la Tabla 2.2.

En general, la magnitud calculada es menor que la del objeto de referencia. Se puede apreciar cómo el orden de magnitud ha descendido de  $10^{-3}$  del ancho del alambre a entre  $10^{-4}$  y  $10^{-5}$  en el caso del cabello humano, el hilo de la telaraña y las células de elodea como se podrá apreciar en las medidas que hayan obtenido.

### ¿Qué analizar?

Acostumbrados a medir dimensiones de longitud de objetos cotidianos con reglas o cintas métricas, parece que medir consiste simplemente en comparar la proporción de la magnitud del objeto que se desea medir con el del objeto de medida. Para ello, el objeto con el que se mide debe estar calibrado, a su vez, con un objeto patrón de referencia universal para garantizar que toda regla o cinta que se use para medir dará el mismo resultado.

Sin embargo, medir objetos muy pequeños o muy grandes no resulta de simplemente comparar con un patrón de medida como puede notarse en esta actividad donde se requieren desarrollar procesos e instrumentos que no son de comparación directa (como el microscopio) y elaborar los factores de amplificación. La conferencia internacional de pesas y medidas publicó en 2008 un documento sobre el vocabulario en el que propone lo siguiente:

Medición:<sup>7</sup> Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud (JCGM, 2000, 2012).

<sup>7</sup> Traducción libre de: “measurement: process of experimentally obtaining one or more quantity values that can reasonably be attributed to a quantity” [Inglés] “mesurage, m mesure, f: processus consistant à obtenir expérimentalement une ou plusieurs que l'on peut raisonnablement attribuer à une grandeur” [Frances]. Publicado en JCGM, 2000, 2012, International vocabulary of metrology / Vocabulaire international de metrologie, la tercera edición de la publicación bilingüe en inglés y francés, p 16. Disponible en línea desde: < <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications> > [acceso el 9 de mayo de 2024].

De acuerdo con esta definición, la medición es un proceso que lleva a determinar un valor numérico, lo que describe mejor lo realizado en la actividad en la que se utilizaron procesos matemáticos y desarrollos tecnológicos.

Una discusión en clase a partir de una búsqueda por equipos, de mediciones con instrumentos especializados, ayudará a comprender las dificultades que la medición puede presentar.

El procedimiento realizado permitió determinar el valor, inicialmente desconocido, de la magnitud de un objeto ( $Mo$ ) que se desea medir, a través de establecer relaciones de proporcionalidad, utilizando un factor de amplificación ( $Fa$ ) que se obtuvo entre la medida de la escala ( $Me$ ) con el tamaño de su imagen ( $Mei$ ) fotografiada a través del microscopio:

$$Fa = Mei / Me$$

Este factor de amplificación está asociado a la ampliación que proporciona el microscopio aunado a la amplificación que da la imagen impresa o proyectada en pantalla de la fotografía del objeto.

Este factor de amplificación fue usado en imágenes de diversos objetos cuyas dimensiones eran desconocidas, de manera que la proporción entre el tamaño de la imagen del objeto  $Mo_i$  y el tamaño del objeto  $Mo$  es igual al factor de amplificación  $Fa = Mo_i / Mo$ . Esta doble igualdad del factor de amplificación permite calcular el tamaño del objeto de acuerdo con la siguiente relación:

$$Mo = Mo_i / Fa = Mo_i \times Me / Mei$$

### **Algo más**

El procedimiento experimental realizado en esta actividad ha permitido medir objetos mayores a  $10\ \mu\text{m}$ . Para medir objetos más pequeños se requiere de instrumentos más precisos como el microscopio electrónico o el microscopio de efecto túnel. Con esos instrumentos se pueden conocer las dimensiones de entidades como un óvulo humano, una bacteria, un virus, un cromosoma, el ancho de la molécula de ADN, la molécula de agua, la base de un cristal de cloruro de sodio (sal común) e incluso el tamaño de átomos como el carbono.

Una discusión en clase a partir de una búsqueda por equipos sobre las características de esos microscopios y del tipo de imágenes que con ellos se obtienen, ayudará a comprender las dificultades que la medición puede presentar. ¿Se usará en un microscopio electrónico un elemento de referencia como el que se utilizó en esta actividad?

## ¿ES POSIBLE MEDIR OBJETOS PEQUEÑOS SIN AMPLIFICAR SU IMAGEN?

### ¿Cuál es el propósito de aprendizaje?

En las actividades previas se ha podido medir objetos pequeños a través de la ampliación de imágenes de ellos obtenidas con un microscopio y su comparación con una escala. Para formar una imagen se requiere que el objeto (si no tiene luz propia) reemita la luz que incide en él y esa luz reemitida, al pasar por una lente o un juego de lentes como en el microscopio, al refractarse permite ampliar su imagen. Este procedimiento tiene, sin embargo, un límite. Este límite está determinado por las capacidades máxima de ampliación de los microscopios y su resolución o capacidad de distinguir dos objetos próximos, el cual, a su vez, está relacionado con la longitud de onda de la luz. La luz visible, por su parte, no tiene una longitud de onda infinitamente pequeña, sino tiene un determinado valor.

¿Se podrá formar una imagen de un objeto si este es del tamaño o más pequeño que la longitud de onda de la luz? Una discusión en clase sobre esta pregunta es conveniente.

Hay otros fenómenos o procesos que ocurren con la luz que no están relacionados con ampliar imágenes pero que también permiten conocer el tamaño de objetos pequeños, en este caso, cercanos a la longitud de onda de la luz. Estos procesos son la difracción y la interferencia. En esta actividad se analizará cómo, a través de ambos procesos, es posible conocer tanto la longitud de onda de la luz con la que se esté trabajando como el tamaño de los objetos pequeños que producen ambos fenómenos.

### Qué hacer

Los fenómenos de difracción e interferencia ocurren en todo tipo de ondas. Ocurren en el sonido, en las ondas superficiales en un medio como el agua, en las microondas, en la luz, en los rayos X, etc. La manera en cómo ocurren y qué se observa de ellos puede ilustrarse con las ondas superficiales en el agua, para, con ello, determinar las relaciones matemáticas entre longitud de onda y tamaño de los objetos que producen el fenómeno, para, posteriormente, utilizarlas para el caso de la luz.

#### *La difracción de ondas superficiales en el agua*

En la figura 5.1, se muestra una imagen de ondas superficiales en agua en un pequeño estanque, usualmente denominado *cuba* o *tanque de ondas*, en el que se pueden producir patrones de ondas de manera regular, es decir, con frecuencia constante, lo que permite observar su amplitud y su longitud de onda.





*Figura 5.1. Fotografía donde se observan frentes de onda paralelos y aproximadamente rectos de las ondas en el agua en una cuba de ondas (elaboración propia).*

Si colocamos una fuente de luz que parpadea a la misma frecuencia con la que se producen las ondas sobre ese estanque, podemos ver una proyección de las ondas formada por franjas luminosas y oscuras. También se pueden observar tomando un instante de un video, cuando hay una fuente de luz sobre la cuba de ondas como se muestra en la figura 5.2. La distancia que hay entre los centros de las franjas luminosas o bien entre los centros de las franjas oscuras es la longitud de onda  $\lambda$ . ¿Por qué?



*Figura 5.2. Patrón de ondas proyectadas sobre una superficie debajo de la cuba de ondas, obtenido con la cámara de un celular. En la figura se indica la longitud de onda (elaboración propia).*

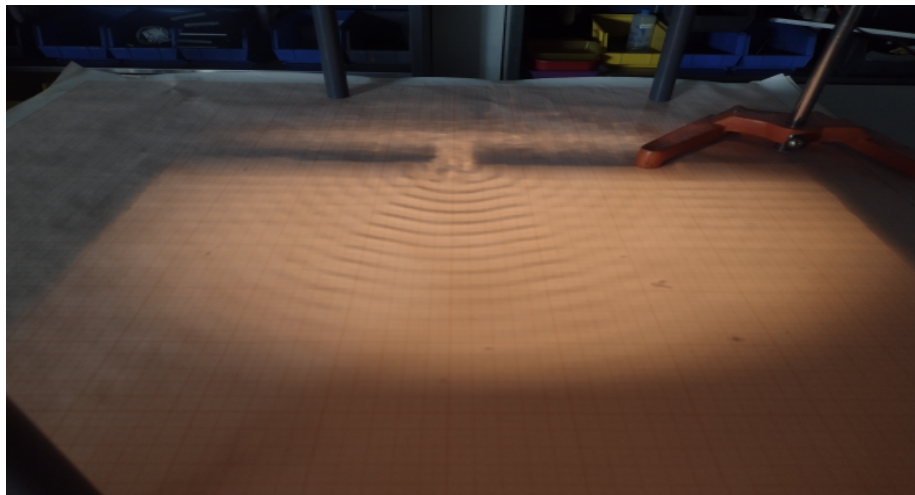
### *Difracción*

La difracción es un proceso que ocurre cuando el frente de onda pasa por un objeto o una abertura y lo que se observa es que las ondas iniciando con el frente plano se curvan como se observa en la figura 5.3.



*Figura 5.3. Imagen de la difracción por curvatura de un frente de onda plano cuando pasa por un objeto (elaboración propia).*

Cuando el objeto o la abertura por la que pasa el frente de onda es cercano al tamaño de la longitud de onda, la onda que se genera tiene forma de un abanico de ondas que tiene franjas en las que no se observan ondas y franjas en las que sí, como se muestra en la figura 5.4.



*Figura 5.4. Imagen del patrón de difracción producido por una abertura (elaboración propia).*

A partir de la figura 5.4, es posible trazar líneas que pasen por el centro de las franjas y hacer que se intersecten con una perpendicular a la franja central, con lo que será posible medir la distancia de la abertura  $d$  y conocer la longitud de onda  $\lambda$  o viceversa, medir la longitud de onda y determinar la distancia de la abertura. En este caso, ambos pueden medirse directamente porque tanto la longitud de onda como la abertura son del orden de los centímetros. Las líneas diagonales que pasan por los centros de las franjas forman un ángulo  $\theta_n$  según el orden que tengan respecto a

la primera línea central. Sin embargo, se puede encontrar una relación matemática entre ambas magnitudes que podrá utilizarse para cuando los tamaños sean tan pequeños que no podamos medirlos directamente. En la figura 5.5 se muestra la imagen de la figura 5.4 con los trazos descritos.

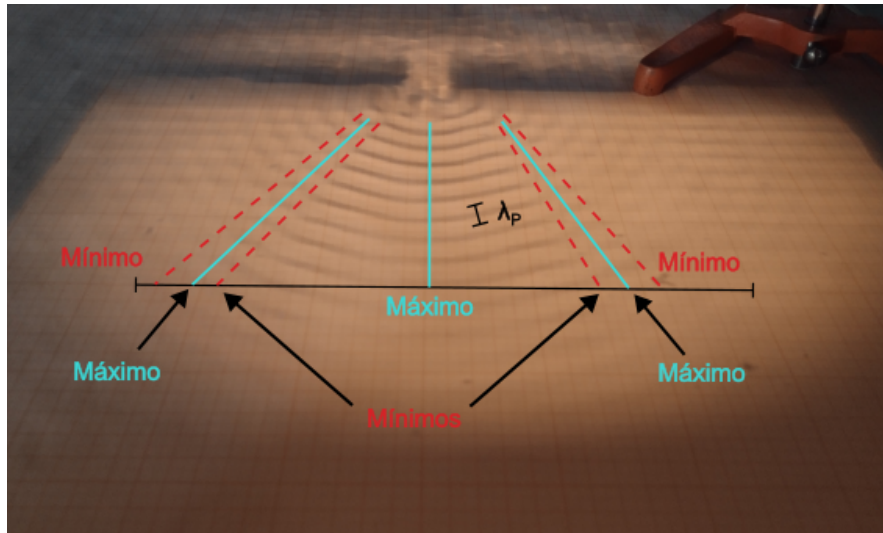


Figura 5.5. Patrón de difracción con trazo de líneas que indican dónde se forman ondas en la superficie denominada como máximo y dónde no se forman denominado mínimo (elaboración propia).

De consideraciones geométricas (pueden verse en el anexo 2 o cualquier libro de óptica), se obtiene para las franjas oscuras la relación

$$d = n \lambda / \sin \theta_n$$

donde  $n$  va tomando los valores 1, 2, 3, ..., de manera consecutiva para las líneas de la franja sin ondas, de manera que 1 es para la primera franja, 2 para la segunda y así sucesivamente. De esta forma, si ponemos una abertura u objeto y se forma el patrón de difracción, podemos saber la longitud de onda simplemente encontrando el ángulo que hay entre la línea central (la franja central con ondas) y la línea que determina la primera línea de la franja sin ondas o franja oscura. Así, para el caso que aquí se ilustra se tiene que:

$$\lambda = d \sin \theta_n / n$$

Que para el caso que ilustra la fotografía es  $\lambda_p = 1.6 \text{ cm}$  (aproximadamente).

Debe notarse que lo que se mide en la fotografía no es el valor real de las ondas y la abertura por la que pasan en la superficie del agua, pues no se está midiendo directamente sobre la superficie del agua, pues, al ser proyectadas a cierta distancia de la superficie, hay un factor de amplificación, de manera que se mide la longitud de onda proyectada  $\lambda_p$ , como se muestra en las figuras 5.2 y 5.5. El factor de amplificación se determina con la siguiente figura 5.6.

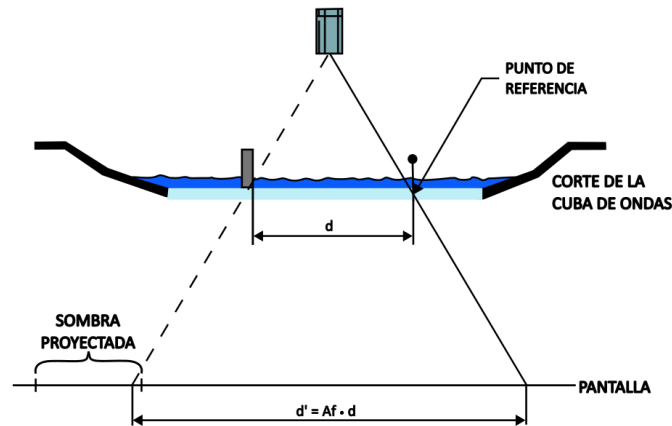


Figura 5.6. Esquema para calcular el factor de amplificación (elaboración propia).

Tomando en cuenta el factor de amplificación, la longitud de onda medida es  $\lambda = 0.8$  cm (aproximadamente).

### La difracción en la luz

Con la luz, la difracción ocurre de la misma manera que con las ondas superficiales en el agua. Cuando pasa un frente de onda de luz por una rendija u objeto del orden de la longitud de onda de la luz que incide, se produce un patrón de zonas o franjas luminosas y oscuras. Como en el caso de la imagen de las ondas en el agua (figura 5.5) en el que se traza una línea perpendicular para determinar las franjas con y sin ondas, en el caso de la luz se puede colocar una pantalla donde se proyectan zonas iluminadas y oscuras como se muestra en la figura 5.7.

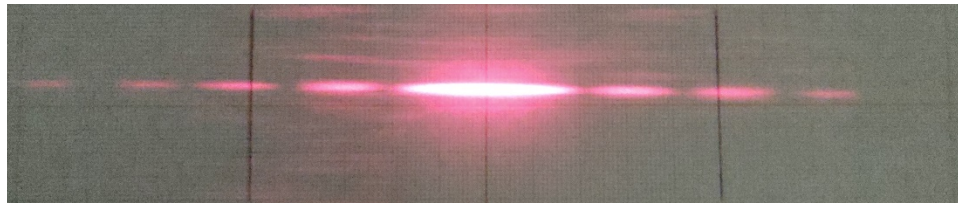


Figura 5.7. Patrón de difracción al pasar la luz láser por una rendija (elaboración propia).

Se propone que en clase se analice la semejanza entre la figura 5.7 y la figura 5.5. ¿Es posible representar lo que se observa en la figura 5.7 con un dibujo que muestre los frentes de onda de la luz de manera semejante a lo observable en la figura 5.5?

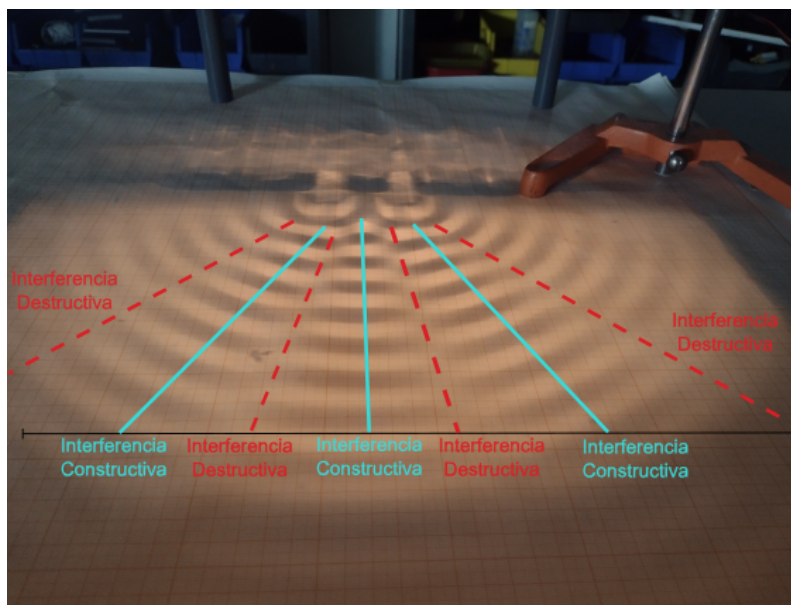
Debido a la similitud geométrica de lo que ocurre con las ondas de la luz con las superficiales en el agua, la ecuación que relaciona el tamaño de la abertura u objeto y la longitud de onda de la luz es la misma, es decir, la ecuación que toma en cuenta las zonas o franjas oscuras es:

$$d = n \lambda / \sin \theta_n \quad \text{con } n = 1, 2, 3, \dots$$

De manera que, conociendo la longitud de onda de la luz, en este caso de luz roja, es posible determinar el tamaño de la abertura  $d$  que produce la difracción.

### *La interferencia de la luz*

Otro fenómeno ondulatorio que nos permite hacer mediciones sin que sea a partir de imágenes, es la interferencia. Este proceso ocurre cuando los frentes de onda coinciden en un mismo espacio y tiempo y ocurre un proceso de superposición de las ondas. Para ver cómo ocurre este proceso, es ilustrativo verlo en ondas superficiales en el agua. En este caso, se hará pasar un frente de onda por dos rendijas o aberturas de manera que se tendrá la superposición de dos frentes de onda que han sido difractados. Lo que se observa en la figura 5.8 es el resultado de ese proceso de superposición. ¿Qué diferencias y semejanzas se encuentran con lo observado en el caso de la difracción por una sola abertura?



*Figura 5.8. Patrón de interferencia de ondas superficiales en el agua al pasar por dos rendijas (elaboración propia).*

Si este proceso lo hacemos ahora con luz, como el caso de hacer pasar una luz láser por dos pequeñas rendijas como se muestra en la figura 5.9 y se proyecta en una pantalla, se obtendrá un patrón de interferencia como el que se muestra en la figura 5.10.



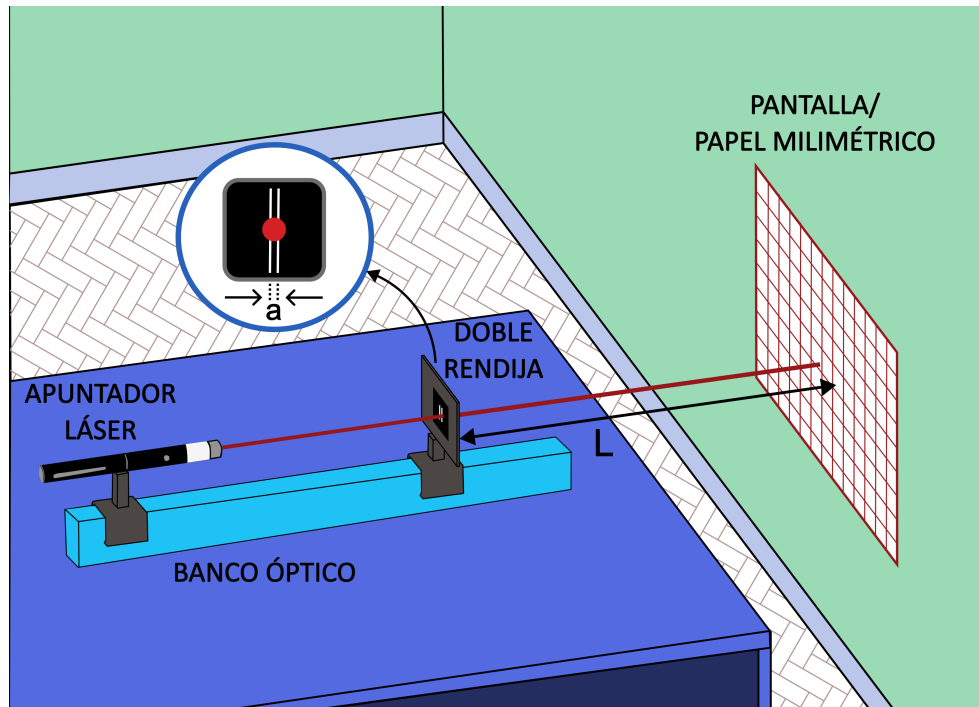


Figura 5.9. Disposición de los elementos experimentales.  
 En el círculo se muestra la doble rendija de frente,  
 el punto rojo ilustra la luz láser incidiendo en las rendijas.  
 Los centros de las rendijas están separados la distancia  $a$  (elaboración propia).

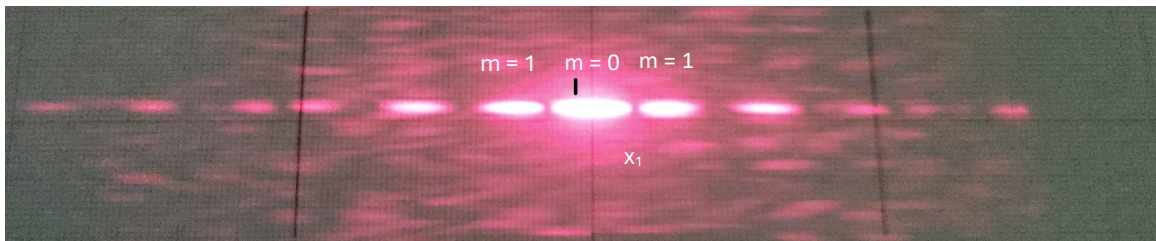


Figura 5.10. Patrón de interferencia producido al pasar el láser por una doble rendija.  
 Se señalan las dos bandas laterales luminosas de orden  $m = 1$ ,  
 que en este caso son las únicas que se obtienen en la interferencia  
 de las bandas luminosas centrales (elaboración propia).

El patrón de difracción mostrado en la figura 5.7 fue producido por una de las rendijas con las que se obtuvo el patrón de la figura 5.10 que es con las dos rendijas (ambas de las mismas dimensiones). ¿Qué semejanzas y diferencias encuentras entre ambas imágenes? ¿Estas diferencias y semejanzas son comparables a los patrones de difracción e interferencia con las ondas superficiales en el agua?

Una discusión en clase sobre las preguntas precedentes sería de utilidad para la comprensión de ambos procesos.

Con el proceso de interferencia en la presente actividad se determinará la longitud de onda de la luz láser utilizada.

### ¿Por qué y para qué hacer esta actividad?

Cuando los objetos a medir están más allá de las posibilidades de medición directa o amplificada, como lo que ocurre con los microscopios, cómo se ha descrito, hay procesos en la naturaleza que permiten inferir, a partir de sus efectos, las dimensiones de las entidades que interaccionan. Este es el caso de la medición por procesos de difracción e interferencia. Pero para poder utilizarlos, es necesario comprender cómo ocurren y cómo con ellos se pueden establecer las mediciones. Es por ello que en esta actividad el porqué y para qué hacerla se responde con el conocimiento de cómo medir, primero la longitud de onda de luz que se utilice y, con ello, estar en posibilidad de hacer mediciones de diferentes objetos. Otra respuesta complementaria a la anterior es que, en los procesos que ocurren a escalas pequeñas, las mediciones precisas que se requieren como medir películas delgadas de materiales utilizan procesos de interferencia que, en esencia, son como el que aquí se desarrollará.

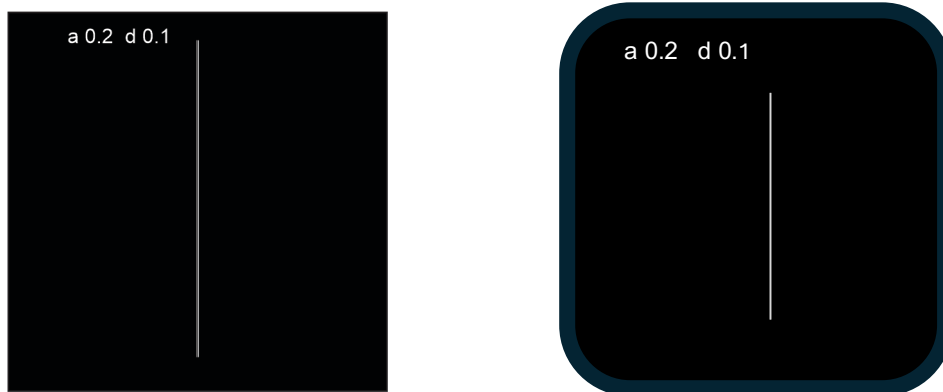
### Desarrollo

Para medir la longitud de onda de la luz láser que se utilice, se requerirá contar con:

- Un láser (luz roja)
- Una pantalla oscura con dos rendijas (muy pequeñas y cercanas)
- Un banco óptico (si el laboratorio no cuenta con uno puede improvisarse uno con elementos comunes como una tabla de madera o un tubo o perfil recto)
- Un soporte para el láser
- Un soporte para la pantalla con las rendijas
- Una pared o pantalla donde proyectar la imagen
- Regla en milímetros
- Papel milimétrico
- Cámara de celular

#### *Elaboración de la pantalla con rendijas*

Si se cuenta con un banco óptico con aditamentos, es posible que también se cuente con una pantalla con rendijas para observar los procesos de difracción e interferencia. En ese caso deberá utilizarse la que proporciona el laboratorio escolar. De no ser así, se puede aprovechar la imagen que se muestra en la figura 5.11, imprimiéndola en un acetato transparente, en impresora láser.



*Figura 5.11. Trazo de líneas paralelas para la elaboración de pantalla con rendija (elaboración propia).*

Las dimensiones de la rendija proporcionada en la figura 5.11 son: ancho de cada rendija de  $d = 0.1 \text{ mm}$  y distancia entre los centros de las rendijas  $a = 0.2 \text{ mm}$ . De esta forma se contará con una doble rendija con las proporciones adecuadas para llevar a cabo el proceso de interferencia de la luz.

#### *Medición de la longitud de onda de la luz del láser*

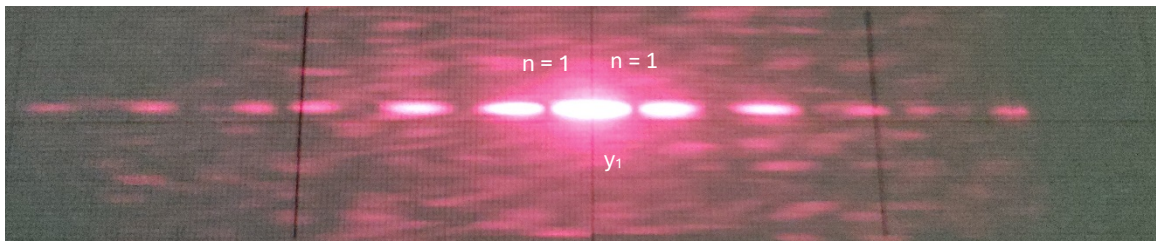
Una vez obtenida la pantalla con la doble rendija, se procede a llevar a cabo un arreglo experimental como el de la figura 5.9. La pantalla donde se proyecta la imagen debe tener un papel milimétrico para facilitar las mediciones que se harán sobre esa pantalla.

Para determinar la longitud de onda  $\lambda$  de la luz láser, se numeran los centros de las zonas brillantes que están en la banda central a partir del centro de esta banda. La numeración se inicia con la zona iluminada central asignándole el valor de cero. Esta numeración es doble, una para el lado izquierdo y otra para el derecho. Se deberá medir la distancia  $x$  entre el centro de la zona iluminada central y el centro de una de las siguientes zonas iluminadas o brillantes, como se ilustra en la figura 5.10. Para este caso la longitud de onda se puede determinar por la ecuación:

$$\lambda = a x_m / m L \quad (m = 1, 2, \dots)$$

En la que  $a$  es la distancia entre rendijas;  $L$ , la distancia de la pantalla con las rendijas a la pantalla donde se proyecta el patrón de interferencia; y  $x_m$ , la distancia desde la zona central brillante a los centros de la  $m$ -ésima zona brillante.

También es posible llevar a cabo las mediciones sobre los centros de las zonas oscuras del patrón de interferencia como se muestra en la figura 5.12.



*Figura 5.12. Patrón de interferencia de la luz láser al pasar por una doble rendija. Se muestran las dos zonas oscuras laterales a la banda central de orden  $n = 1$ , que en este caso son las únicas que se obtienen en la interferencia de las bandas luminosas centrales (elaboración propia).*

En este caso, la ecuación que se utiliza tiene una ligera variación que corresponde a  $\frac{1}{2}$  del número entero que da cuenta de la zona oscura.

$$\lambda = a y_n / (n - \frac{1}{2}) L$$

¿Por qué hay una diferencia de  $\frac{1}{2}$  en el valor de los números consecutivos a diferencia de cuando se toman las zonas brillantes? Una discusión en clase sería conveniente.



### ¿Qué analizar?

Los patrones de difracción y de interferencia, como los observados, ocurren cuando la luz interactúa con objetos pequeños, por ello no son observables cotidianamente, aunque en ciertas condiciones comunes sí los observamos como cuando una luz intensa pasa por una malla muy fina como el tejido de una tela o también cuando se observan colores en una mancha de aceite o en una película jabonosa, si bien no se ven como los patrones obtenidos en los libros, si corresponden a los mismos procesos de difracción e interferencia.

Se sugiere que en clase se comente y, de preferencia, se lleven a cabo acciones para observar ambos casos. ¿Cuál consideran se debe a difracción y cuál a interferencia? Una discusión en clase sería conveniente.

De lo llevado a cabo se pudo observar cómo, a partir de los propios procesos que ocurren con la luz, es posible medir su longitud de onda y, en su caso, conociendo esta, medir, por ejemplo, la distancia entre las rendijas o incluso el ancho de la rendija. Una pregunta posible es para qué medir la longitud de onda de la luz si se puede consultar una tabla de longitudes de onda de una fuente confiable en Internet. ¿Qué se puede replicar al respecto? ¿Por qué no se pueden utilizar los valores de la tabla para hacer mediciones?

Cuando se llevan a cabo mediciones, es necesario tener los valores más precisos posible. En el caso de utilizar un láser como el que se usó en la actividad, esto se puede conseguir midiendo la longitud de onda como aquí se hizo, o bien si el fabricante proporciona el valor de esa longitud de onda.

En todo caso, la reflexión sobre la actividad podrá centrarse en cómo se pueden medir objetos pequeños siempre y cuando no sean más pequeños que la longitud de onda de la luz utilizada.

### Algo más

¿Qué tanto es más pequeña la luz de un láser de color verde que la del rojo?

En la figura 5.13 se muestra el patrón de interferencia de la luz de un láser de color verde obtenido por el experimento de doble rendija. El patrón de interferencia se proyecta sobre una pantalla de papel milimétrico. La distancia desde las rendijas de difracción a la pantalla es  $L = 3.73 \text{ m}$ , el ancho de las rendijas es de  $0.12 \text{ mm} = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}$  y la distancia entre ellas es  $a = 0.16 \text{ mm} = 1.6 \times 10^{-4} \text{ m}$ . ¿Cuál es valor de la longitud de onda de esta luz verde? ¿En cuánto difiere con respecto de la luz roja? ¿Cuál es el tamaño mínimo que se podría medir con este láser?



*Figura 5.13. Patrón de interferencia por doble rendija con láser de color verde (elaboración propia).*



## **MEDICIÓN DE PARTÍCULAS PEQUEÑAS POR DIFRACCIÓN: CÉLULAS DE CEBOLLA**

### **¿Cuál es el propósito de aprendizaje?**

Los efectos obtenidos como la difracción y la interferencia de la luz debido al tamaño pequeño de sus longitudes de onda permiten conocer las dimensiones de objetos cercanos a esas longitudes de onda. En el caso del láser, que tiene una longitud de onda definida para cada color, resulta de gran utilidad, pues se obtienen patrones de difracción fáciles de identificar y medir. Para continuar con la exploración de objetos pequeños y construir una representación espacio-dimensional de esos objetos, esta actividad propone medir esos objetos utilizando un patrón de difracción producido con láser que tiene la ventaja de que las mediciones se obtienen de manera relativamente sencilla, así como las operaciones matemáticas que involucra.

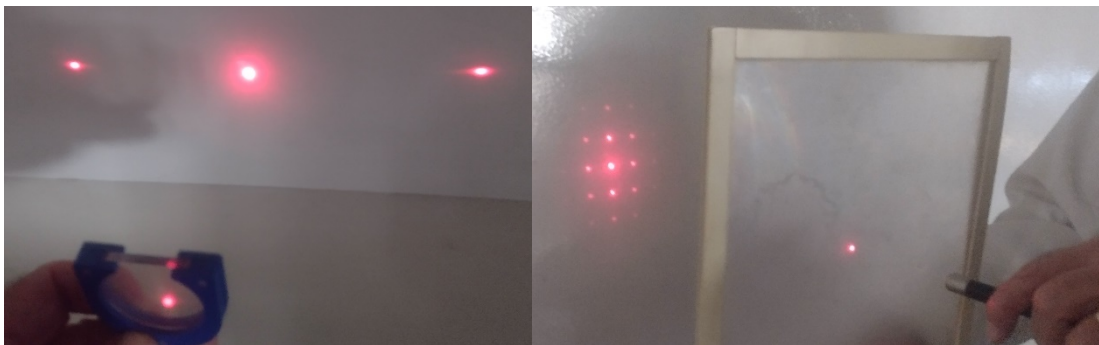
### **Qué hacer**

Como se ha visto de la actividad previa, la difracción de la luz ocurre cuando un obstáculo pequeño se interpone en su trayectoria produciendo zonas de interferencia constructiva y destructiva, esto es zonas oscuras y zonas iluminadas en forma de un patrón regular. La separación de esas zonas y la distancia a la que ocurre la difracción está determinada por la magnitud del objeto, lo que permite determinar sus dimensiones.

La forma del patrón de difracción dependerá de la forma del objeto. Un objeto muy pequeño de forma esférica producirá un patrón circular, si su forma es un tanto irregular pero que pueda aproximarse a una esfera, producirá también un patrón aproximadamente circular, mientras que si su forma es una abertura cuadrada producirá patrones en línea recta ortogonales. Algunos ejemplos se muestran en la figura 6.1.



A)



B)

C)

*Figura 6.1. Patrones de difracción producidos con un láser cuando pasa por  
A) un cabello; B) una rejilla múltiple vertical y  
C) una rejilla múltiple cuadriculada (elaboración propia).*

Las fotografías de la figura 6.1 en particular, B y C, corresponden a objetos pequeños que podemos distinguir o medir con un Vernier y se forman al pasar la luz por rendijas extremadamente delgadas y cercanas (pueden tener entre 500 y 1000 ranuras por milímetro). Sin embargo, con la difracción también es posible medir el tamaño de objetos o entidades más pequeñas que ya no vemos y, por lo tanto, no podemos medir directamente. Esos objetos, como en la segunda actividad, podrán medirse con un microscopio siempre y cuando se cuente con un factor comparativo conocido, esto es, contar con el factor de amplificación. Como se ha visto con la luz, y en este caso con luz láser, no se requiere contar con factores de amplificación y directamente se puede estimar el tamaño de objetos pequeños.

En esta actividad se determinará el tamaño aproximado de una célula de cebolla, pasando luz láser y generando un patrón de difracción<sup>8</sup>. El orden de magnitud obtenido podrá compararse con lo reportado en la primera y segunda actividad. Una vez determinado cómo obtener los datos del patrón de difracción obtenido, se pueden conocer las dificultades y el proceso que deben realizarse para determinar el tamaño de esos objetos y podrán medirse otros, como las partículas de tinta de un marcador o algunos otros objetos pequeños que se decida son interesantes de saber sus dimensiones.

### **¿Por qué y para qué hacer esta actividad?**

Una primera razón es que en los procesos de aprendizaje contar con diversas formas de aproximarse, en este caso la representación y conceptualización de lo que implican las entidades muy pequeñas como una célula, es relevante, pues se van estableciendo diversas formas de estimar y construirse una visión espacio-dimensional de los objetos.

La segunda es desarrollar habilidades para diversas formas de medición que permiten corroborar que las mediciones por procesos diferentes son equivalentes, pero que presentan ventajas diversas, por ejemplo, medir objetos que en otro proceso se harían muy complejos. Asimismo, con los métodos ópticos es posible medir objetos aún más pequeños, inmesurables con un microscopio óptico.

### **Desarrollo**

---

<sup>8</sup> En este caso se llevará a cabo un proceso de difracción de Fraunhofer, que se obtiene cuando el objeto que produce la difracción está lejos de la fuente de luz.

Esta actividad requiere de contar con la preparación de una epidermis de cebolla, a la cual se le puede poner tinte para tener objetos que no sean transparentes y pueda llevarse a cabo la difracción. Por ello, se deberá contar con los siguientes materiales:

- Epidermis de cebolla entintada con azul de metileno
- Un láser (puede ser de luz roja o verde)
- Cinta métrica
- Un banco óptico (si el laboratorio no cuenta con uno, puede improvisarse uno con elementos comunes como una tabla de madera o un tubo recto)
- Un soporte para el láser
- Un soporte para la muestra
- Una pared o pantalla donde proyectar la imagen
- Papel milimétrico
- Una cámara de celular

#### *Preparación de la epidermis de la cebolla*

Para la preparación temporal de la epidermis de cebolla y hacer la observación al hacerlo pasar por el láser, se deberá:

- Retirar la primera hoja o capa externa que forma la cebolla, identificar en su cara interna la epidermis (el tejido transparente que recubre la hoja) y retirarlo con cuidado, evitando que se pliegue o rompa. Se recomienda que se obtenga una muestra de un  $\text{cm}^2$  aproximadamente.
- Colocar esta muestra, extendida y sin pliegues, al centro de un portaobjetos.
- Colocar una gota de azul de metileno sobre la muestra, en una dilución de 30/70 (30 partes de azul de metileno por 70 partes de agua).
- De ser necesario, retirar con un papel el exceso de líquido por uno de los bordes del tejido.
- Colocar un cubreobjetos sobre la muestra

#### *Montaje para medir*

El láser se debe colocar en un extremo del banco óptico; y cerca del otro extremo, la muestra de la cebolla. La luz láser debe incidir al principio, al centro de la muestra entintada. El banco óptico es para asegurar que el láser y la muestra están alineadas y, si es necesario desplazarlas, para que ese alineamiento no se pierda. Si no se cuenta con el banco, es posible improvisar uno siempre y cuando se garantice que el alineamiento se conserve. La figura 6.2 muestra algunas posibilidades de bancos improvisados.

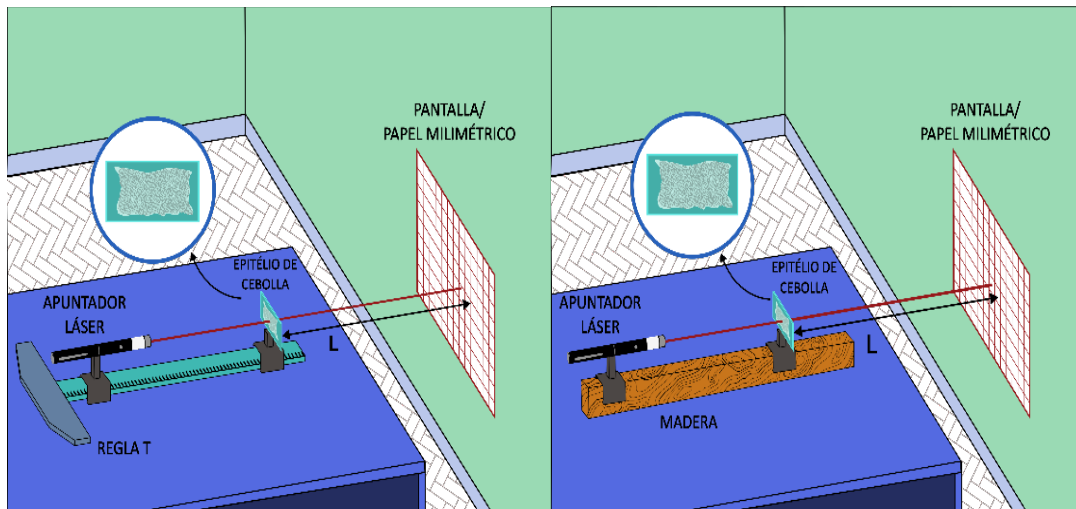


Figura 6.2. Diversas maneras de montar el banco óptico (elaboración propia).

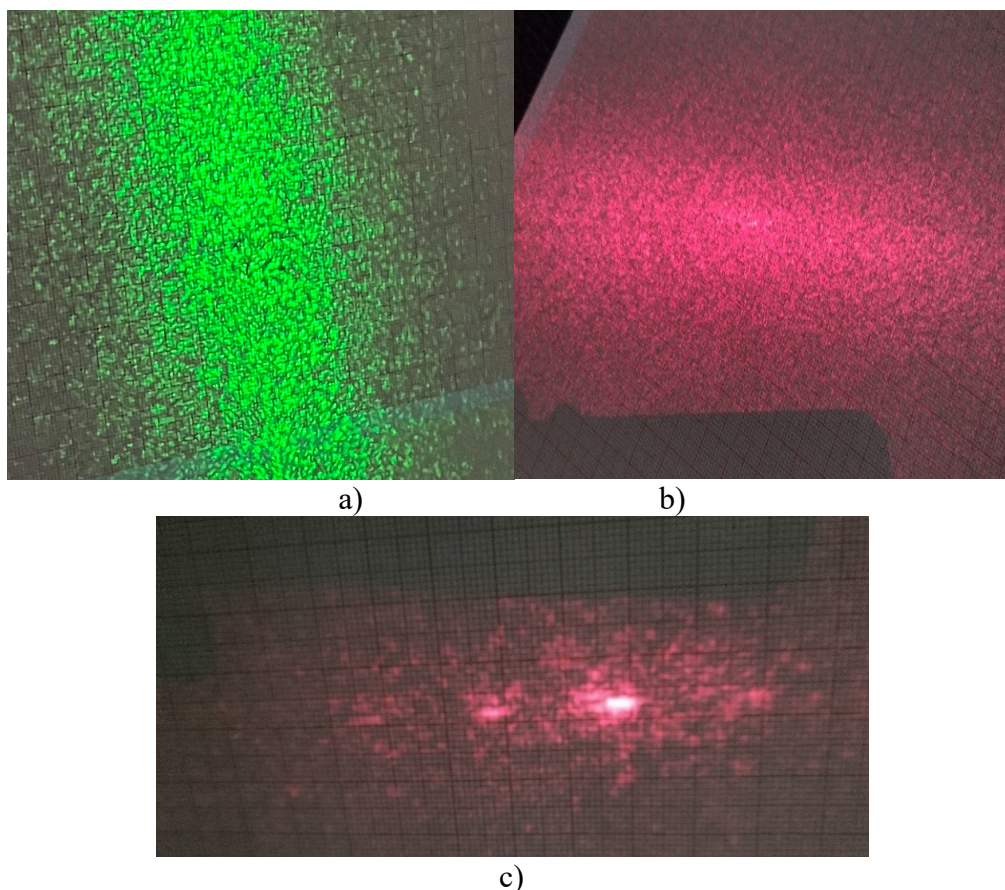
La figura 6.3 muestra cómo debe quedar el arreglo en que se indican las posiciones del láser, la muestra y la pantalla. Esta última –que bien puede ser una pared o una cartulina–, a ella deberá adherírsele papel milimétrico para poder medir las distancias de los patrones o patrón (zonas brillantes y oscuras) de difracción observado.



Figura 6.3. Arreglo experimental. La muestra está a 1 m de láser y al fondo, a más de 2.70 m se encuentra la pantalla con papel milimétrico (elaboración propia).

Se deberá medir con la mayor precisión posible la distancia  $L$  de la muestra a la pantalla de observación. Lo más probable es que, al principio, no se observen más que manchas con motas luminosas y oscuras. Es posible imaginar que si solo tuviéramos en la muestra una célula, sería prácticamente imposible atinarle con el láser, por ello deberá moverse lentamente la muestra de manera que se pueda ir barriendo la superficie donde se encuentra la epidermis de la cebolla hasta que se observe en la pantalla alguno de los patrones parecidos a los que se muestran en la figura 6.4.





*Figura 6.4. Posibles patrones de difracción de láseres verde y rojo al pasar por una muestra de epidermis de cebolla. Patrones a) y b) correspondientes a patrones de partículas; c) patrón correspondiente a patrones de rendijas (elaboración propia).*

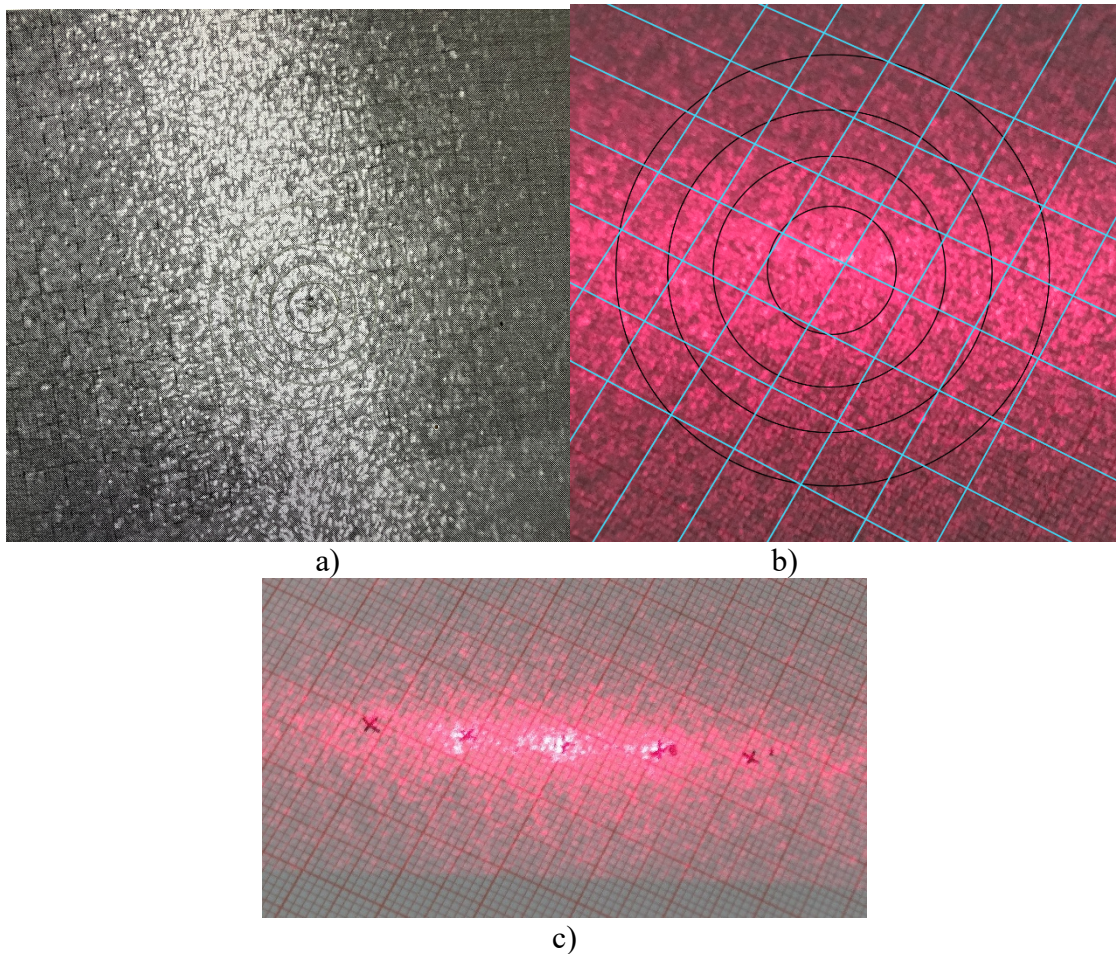
Deberá tenerse cuidado de no modificar la distancia del láser a la muestra ¿Por qué?

Una discusión en clase en torno a por qué esa distancia quede fija sería conveniente.

Para poder medir, se pueden llevar a cabo dos procesos. Uno, si lo que se observa en la pantalla sobre el papel milimétrico son de manera clara círculos concéntricos alrededor de un punto luminoso, como las fotografías a) y b) de la figura 6.4, se puede medir sobre el papel la distancia radial  $x_m$  de las zonas oscuras (así se pueden notar más claramente) como la que se muestra en a) de la figura 6.4. Si es difícil ver las zonas oscuras y brillantes, es conveniente tomar con la cámara del celular varias fotografías hasta obtener una donde el patrón de difracción se note mejor. Las fotografías también sirven como registro de la actividad.

Las fotografías se podrán imprimir y, localizando las zonas oscuras que se vean más parecidas a círculos, se podrá trazar con un compás los círculos completos alrededor del punto luminoso central como se muestra en a) de la figura 6.5. Esto facilitará la medición, pues las zonas oscuras del patrón de difracción se distinguen más fácilmente y se tiene de fondo la escala milimétrica del papel, con lo que se podrá medir la distancia del centro del círculo –punto brillante– al centro de la zona oscura; otra opción es repasar las zonas oscuras sobre la imagen electrónica con un color diferente y, apoyados con la escala del papel milimétrico, determinar los radios de los

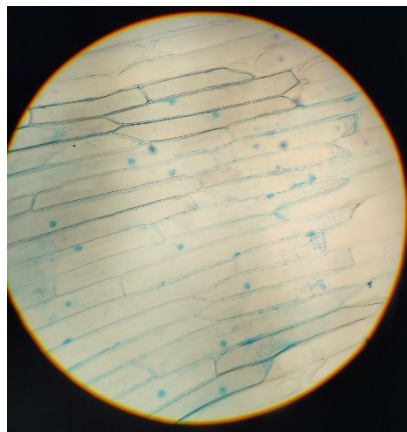
anillos, como se observa en la fotografía b) de la figura 6.5. Si la primera zona oscura no se distingue bien, se puede utilizar la distancia a la segunda zona oscura.



*Figura 6.5. Patrones de difracción a) y b) circulares trazados en papel;  
c) patrón tipo rendija (elaboración propia).*

Es probable que se requiera de un pequeño tiempo para distinguir el patrón de difracción. Debido a la complejidad de la muestra de la epidermis de cebolla, también es posible obtener patrones como el que se observa en la imagen c) de la figura 6.4. Para medir en este segundo caso, se sigue el modelo de difracción por una rejilla para determinar la distancia entre rendijas, la imagen probablemente se produce por un efecto de difracción cuando la luz pasa a través del tejido de células ordenadas y alineadas, como un conjunto de bloques alineados y superpuestos, como se muestra en la figura 6.6, de manera que el resultado calculado se aproxime en promedio al ancho de las células.





*Figura 6.6. Muestra de tejido de células de la piel de cebolla vistas al microscopio, donde se muestran alineadas y ordenadas como las de los ladrillos en una pared (elaboración propia).*

*¿Cuánto miden las células de la cebolla?* Para determinar el tamaño aproximado del objeto que produce la difracción observada, se debe utilizar el modelo matemático adecuado al patrón obtenido.

En el caso de obtener un patrón de círculos, como los que se observan en las imágenes a) y b) de la figura 6.3, estos se deben a que el objeto tiene forma esférica o se aproxima a ella –como puede– una sección de la célula, un pequeño grupo de células de la cebolla, de modo que se utiliza la siguiente ecuación:

$$d = m\lambda L / x_m$$

En esta ecuación,  $d$  es el tamaño del objeto que produce la difracción,  $m$  es un valor constante y  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz que se utiliza<sup>9</sup>.

El valor de  $m$  cambia dependiendo de la zona que se toma en cuenta en el patrón de difracción observado. Así, si se toma la primera zona, su valor es 1.22, si se toma la segunda zona oscura es 2.233 y una tercera es 3.238. Si en lugar de tomar las zonas o franjas oscuras se toma las iluminadas, entonces, la segunda zona brillante (la que no es el centro del círculo)  $m$  tendrá el valor de 1.635 y la segunda de 2.679. (Valores tomados de FECEIA, física experimental IV<sup>10</sup>).

El valor de  $m$  está relacionado con cómo va variando la intensidad luminosa del patrón de difracción; por ello, conforme se va alejando del centro, la intensidad va disminuyendo.

Debido a que en los patrones de difracción obtenidos las zonas o franjas oscuras e iluminadas no están bien delimitadas y el objeto no tiene forma regular, será conveniente tomar al menos la medida de dos zonas oscuras (o claras) y obtener el promedio.

<sup>9</sup> La ecuación general para el caso de un objeto circular es  $d \sin\theta = m\lambda / 2$ . Esta ecuación se obtiene de consideraciones geométricas que consideran el tamaño del objeto, el ángulo que hay desde ese objeto hasta una de las zonas en el patrón de difracción que se forma en la pantalla y también de consideraciones de la intensidad de la luz en el patrón de difracción. Los libros de óptica –como el Hecht o el Rossi (ver referencia al final)– detallan cómo se obtiene la ecuación utilizada. Como en la medida que se hizo el ángulo es muy pequeño, se considera  $\sin\theta = x_m / L$ .

<sup>10</sup> FECEIA [www.fceia.unr.edu.ar/fisicaexperimentalIV/](http://www.fceia.unr.edu.ar/fisicaexperimentalIV/).

Los valores de la longitud de onda dependen del color del láser utilizado. Los más comunes son el rojo y el verde. No todos los láseres son iguales pero sus valores de longitud de onda son muy aproximados. Las longitudes de onda del láser utilizado se encuentran en la etiqueta que tiene y son las que deben utilizarse. Solo en caso de no contar con la etiqueta, se pueden utilizar valores de apuntadores láser muy comunes.

Rojo = 650 nm  
Verde = 532 nm

En la tabla 4.1 se pueden colocar y organizar los datos:

Tabla 4.1. Difracción por una partícula. Mediciones correspondientes a las zonas circulares oscuras (elaboración propia).

| Distancia de la muestra a la pantalla $L = m$ |                        |                            | Longitud de onda $\lambda = m$ |                                      |
|-----------------------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Zona o franja oscura                          | Radio del anillo $x_m$ | Valores                    | Tamaño del objeto (m)          | Tamaño del objeto en potencias de 10 |
| Primera zona<br>$m = 1.22$                    |                        | $1.22\lambda L / 2 x_m =$  | $d =$                          |                                      |
| Segunda zona<br>$m = 2.233$                   |                        | $2.233\lambda L / 2 x_m =$ | $d =$                          |                                      |
| Tercera zona<br>$m = 3.238$                   |                        | $3.238\lambda L / 2 x_m =$ | $d =$                          |                                      |
|                                               |                        |                            | $d_{promedio} =$               |                                      |

Si se observan zonas luminosas y oscuras alineadas con un punto brillante al centro, como el que se observa en la imagen c) de la figura 6.3, lo más probable es que se deba a un patrón de rejilla de difracción formado por el tejido de células de cebolla, como el que se observa en la figura 6.6, en este caso, se emplea la siguiente ecuación:

$$d = m \lambda L / x_m \quad \text{donde } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

donde  $d$  es la distancia entre las rendijas de la rejilla,  $x_m$  la distancia de las zonas luminosas respecto a la zona central  $m = 0$ ,  $L$  es la distancia de la muestra a la pantalla sobre la que se proyecta el patrón de difracción y  $m$  corresponde al número de zona brillante a ambos lados (izquierda y derecha, o arriba y abajo) de la zona central donde incidiría la luz si no hubiera muestra. Aprovechando esta ecuación, se hace la comparación entre la rejilla y el tejido de la cebolla, donde se supone hipotéticamente que la distancia entre rejillas será equivalente al ancho de las células de cebolla.

Es conveniente revisar en clase la consideración de esta suposición y cómo justificarla para que permita estimar el ancho medio de las células de la muestra del tejido.

En este caso los datos se pueden presentar en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Difracción por una rejilla. Mediciones correspondientes a las zonas brillantes alineadas (elaboración propia).

| Distancia de la muestra a la pantalla $L = m$ | Longitud de onda $\lambda = m$ |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|
|-----------------------------------------------|--------------------------------|

| Zona brillante<br>m                     | Posición de la zona<br>brillante<br>$x_m$ | Valores<br>$m \lambda L / x_m$ | Ancho<br>rendijas<br>d<br>entre | Ancho<br>rendijas en potencia<br>de 10<br>entre |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|
| Segunda zona a la<br>izquierda<br>m = 2 | $x_m =$                                   | $2 \lambda L / x_m$            | d =                             |                                                 |
| Primera zona a la<br>izquierda<br>m = 1 | $x_m =$                                   | $1 \lambda L / x_m$            | d =                             |                                                 |
| Zona brillante central<br>m = 0         | $x_m = 0$                                 |                                |                                 |                                                 |
| Primera zona a la<br>derecha<br>m = 1   | $x_m =$                                   | $1 \lambda L / x_m$            | d =                             |                                                 |
| Segunda zona a la<br>derecha<br>m = 2   | $x_m =$                                   | $2 \lambda L / x_m$            | d =                             |                                                 |
|                                         |                                           |                                | d Promedio =                    |                                                 |

**¿Qué analizar?** Tanto la medición con el microscopio de las células como con el patrón de difracción formado al pasar el láser por las células son mediciones aproximadas, pues en ambos casos hay varios factores e incertidumbres que, en mediciones más precisas, habrá que tomar en cuenta, así como hacer mayor cantidad de mediciones para obtener datos estadísticos que ayuden a minimizar errores.

Probablemente se obtuvieron datos del tamaño de la cebolla que no son iguales, sino aproximados, pero todos ellos en la escala de las micras ¿Cómo puede explicarse eso?

Para guiar la discusión en clase, se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Por qué son posibles dos modos diferentes de patrones de difracción, a qué se deben?
- ¿Qué se puede estar midiendo con ellas?
- ¿Serán las células de la cebolla todas del mismo tamaño?
- De no ser así, ¿qué se debe esperar al medir con el microscopio o con el láser?
- Si se repite la medición con otra muestra de células o se localiza otra región en epidermis de la cebolla ¿se espera que las mediciones sean exactamente iguales?

Como se habrá notado, las imágenes que se obtienen no son discos bien definidos y, sobre todo, aparecen muchas manchas o motas, al igual que en la banda con zonas brillantes y oscuras. Esto tiene que ver con el tipo de luz que emite el láser que es coherente<sup>11</sup> (no como la luz de un foco o la lámpara de un celular que emite luz que no es coherente). Por otro lado, la muestra de la cebolla, como podrá notarse, no tiene una sola célula, sino diversas células e incluso algunos otros fragmentos de diverso origen. Cuando pasa el haz del láser por todos ellos, se producen muchos patrones de difracción que coinciden y como la luz es coherente da lugar a multitud de interferencias. ¿Cómo explicarían esto las imágenes moteadas que observas?

<sup>11</sup> La luz es coherente en el tiempo cuando, en un cierto intervalo de tiempo, la onda que incide en un punto, por ejemplo, de una pantalla, corresponde al mismo punto de la onda. De esta forma, si incide una cresta de la onda en la pantalla, la siguiente cresta incidirá siempre en un mismo intervalo de tiempo. Esto hace que la luz láser tenga bien definida la frecuencia en la que se emite y propaga. El láser también tiene coherencia espacial, lo que hace que la luz no se disperse y, por ello, se propaga como un estrecho haz de luz, siempre del mismo tamaño.

### Algo más

¿Se podría usar la difracción de la luz del láser para medir otros objetos del orden de las micras?

La condición para medir otros objetos por este proceso de difracción de Fraunhofer es poner algún obstáculo o abertura muy pequeña. Así, cualquier objeto –como los leucocitos o la hemoglobina de la sangre– permiten obtener patrones de difracción como la figura 6.7, que corresponde a sangre obtenida de un corte de carne de res



*Figura 6.6. Patrón de difracción de una muestra de sangre (elaboración propia).*

¿A qué tamaño corresponde el objeto de ese patrón de difracción?

Se pueden presentar en clase algunas ideas de pequeños objetos, de los que les gustaría conocer su tamaño y, de ser posible, llevar a cabo algunas mediciones de las que consideren más interesantes.

## PELÍCULAS DELGADAS ¿CÓMO MEDIRLAS?

### ¿Cuál es el propósito de aprendizaje?

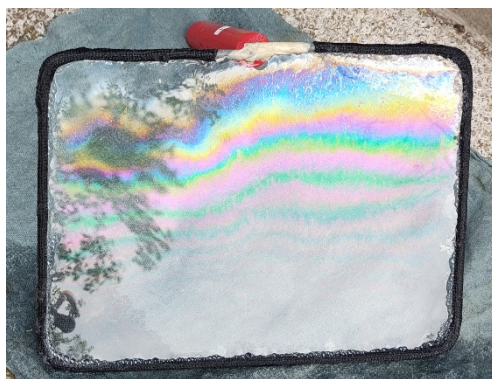
Como se ha podido apreciar, con los fenómenos de la luz es posible medir objetos de dimensiones pequeñas. Uno de estos objetos son las películas delgadas y sus efectos ópticos pueden verse, al menos, en situaciones cotidianas, por ejemplo; en una pompa de jabón y en los colores que se forman en el piso que tiene una mancha de algún tipo de aceite. La medición de estas películas delgadas no es posible llevarla a cabo con un microscopio óptico, pero sí por medio de la interferencia que ocurre cuando se superponen las ondas de luz. De hecho, el efecto de observar colores en el jabón y en el aceite se debe al proceso de interferencia, aunque, en este caso, debido a la superposición de las ondas que se reflejan en las dos superficies de la película. ¿Cuáles son las superficies de la película en las que la luz se refleja? ¿De qué grosor de las superficies depende la interferencia observada?

Como en la actividad anterior, esta actividad permite medir objetos pequeños sin contar con una imagen de él.

### Qué hacer

En la actividad donde se mide la longitud de onda del láser pudo apreciarse un patrón de interferencia tanto en las ondas superficiales en el agua como al pasar la luz láser por un par de rendijas. En ese caso, la luz que se superpone para formar el patrón de interferencia procede de dos fuentes, una por cada abertura o rendija, que en el espacio donde coinciden se suman ambos haces de luz produciendo zonas iluminadas y oscuras. En el caso de las superficies delgadas, la interferencia se producirá por luz que se refleja en superficies cuyo grosor es muy delgado, de manera que las ondas reflejadas por la superficie interior y exterior de la película se superponen y forman esos patrones de zonas iluminadas y oscuras. Como en el caso de la difracción, en la interferencia si el grosor de la película es igual o menor a la longitud de onda ya no se observará ningún efecto. Con la luz no se pueden medir objetos más pequeños que su longitud de onda.

En una película de jabón, la interferencia se observa como franjas de colores. Este efecto es debido a que la luz que incide sobre la película es luz blanca que está compuesta por luz de diversas longitudes de onda, de manera que, al reflejarse en la superficie exterior e interior de la película y superponerse las ondas, sus longitudes de onda no coinciden, sino que están desplazadas por fracciones de longitud de onda, formando franjas con los diversos colores, como se muestra en la figura 7.1.

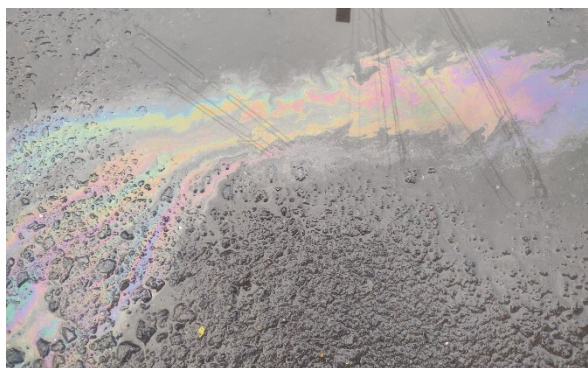
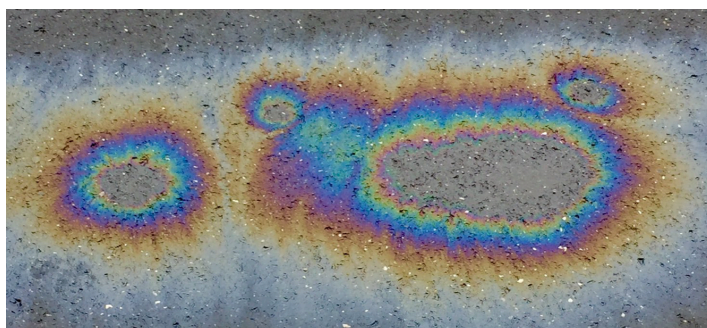


*Figura 7.1. Patrón de interferencia de la luz en una película de jabón (elaboración propia).*

¿Cómo se esperaría que se observara ese patrón de interferencia si en lugar de luz blanca fuera luz de un solo color? ¿Dónde se consideraría que la película es más delgada y por qué?

Sería conveniente discutir estas preguntas en clase.

En una película de aceite, el efecto es el mismo, se forma un patrón de interferencia generado con luz blanca, como se muestra en la figura 7.2.

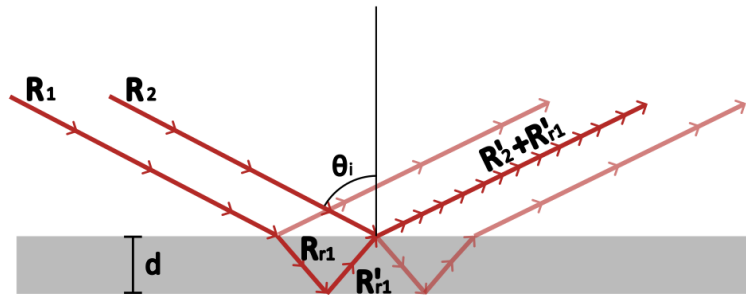


*Figura 7.2. Patrón de interferencia de luz blanca en una película de aceite en el piso.*

*Arriba es de lubricante de mecanismos doméstico;  
abajo, aceite automotriz en el piso mojado (elaboración propia).*

Para medir lo delgado de una película, se pueden establecer relaciones relativamente sencillas cuando se obtiene un patrón de interferencia de luz monocromática donde se tienen bandas oscuras y brillantes como las de la actividad 5. En esta actividad se utilizará de nuevo la luz láser para obtener dicho patrón.

Como se ha descrito, el patrón de interferencia se forma cuando las luces proveniente de la superficie externa e interna de la película delgada se superponen, formando un patrón de interferencia que puede observarse en una pantalla. La figura 7.3 muestra de manera esquemática este proceso.



*Figura 7.3. Los rayos de luz  $R_1$  y  $R_2$  inciden en la superficie superior de la película delgada. Parte del  $R_1$  se transmite dentro de la película  $R_{r1}$  y se refleja en la superficie interior  $R'_{r1}$  para salir de la película en el punto donde incide  $R_2$  el cual se refleja parcialmente en la superficie exterior  $R'_2$ .  $R'_2 + R'_{r1}$  se superponen, formando el patrón de interferencia de la película delgada (elaboración propia).*

### ¿Por qué y para qué hacer esta actividad?

Las películas delgadas tienen gran diversidad de aplicaciones tecnológicas: en energía, en sensores y otros componentes electrónicos, en pantallas, en CD o DVD, etc., y medir sus dimensiones, en especial el espesor es importante para esas aplicaciones. Los materiales de las que están hechas son muy diversos dependiendo de su aplicación.

Una búsqueda de información y discusión en clase sobre las aplicaciones que tienen sería conveniente.

Algunas de esas películas delgadas tienen un grosor de dimensiones muy pequeñas, además muchas de ellas son transparentes o translúcidas y no se pueden medir con ningún dispositivo óptico –como el microscopio–. Sin embargo, dadas sus aplicaciones, es importante conocer su grosor. Nuevamente nos encontramos con un caso de medición de una entidad pequeña que no podemos medir por medio de generar una imagen de ella, pero que sí es posible hacerlo a través de un fenómeno de la luz como la interferencia.

### Desarrollo

Esta actividad requiere elaborar una película delgada para obtener un patrón de interferencia con luz láser, la cual es monocromática. Es posible tener una película con la cual se puede obtener un patrón de interferencia con una película de jabón, pero resulta que, como muestra la experiencia común, no duran lo suficiente y en cualquier momento se rompe la película. Por ello se elaborará una con aceite –este puede ser comestible o un lubricante casero o para automóvil–.

### Materiales:

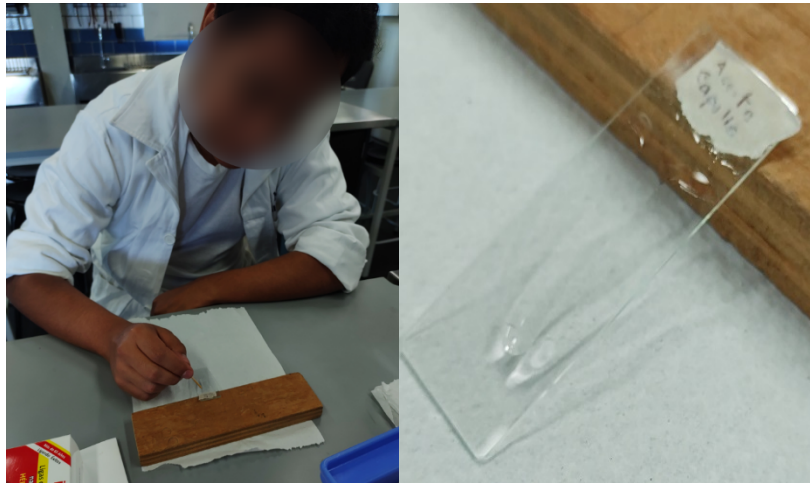
- Película de aceite sobre un portaobjetos o cubreobjetos
- Un láser (puede ser de luz roja o verde)
- Cinta métrica



- Un banco óptico o columna universal con pinzas (si el laboratorio no cuenta con alguno, puede improvisarse uno con elementos comunes –como una tabla de madera o un tubo recto–)
- Un soporte para láser
- Un portaobjeto y cubreobjeto limpio
- Dos soportes para la muestra (pueden ser dos lápices del mismo grosor)
- Una lente convergente (lupa) de  $f + 50$  o  $+ 100$
- Una pared o pantalla donde proyectar la imagen
- Papel milimétrico
- Hoja o cartón negro para actuar de fondo
- Cámara de celular

#### *Obtención de una película de aceite*

Una manera de obtener la película es la siguiente: sobre un portaobjetos o un cubreobjetos se deberá colocar una línea de aceite con un gotero a lo ancho del vidrio cerca de una de sus orillas. Posteriormente, posicionarla de manera inclinada o vertical para que el aceite escurra a lo largo del vidrio y esperar de 15 a 30 minutos. Una ventaja de este procedimiento es que la película que se obtiene se puede utilizar incluso algunos días después, aunque también puede ocurrir que, después de mucho tiempo, la película se quiebre y no pueda apreciarse el patrón de interferencia adecuado. El procedimiento se ilustra en la figura 7.4.



*Figura 7.4. Preparación de la película delgada.  
Se colocan una o dos gotas de aceite en el portaobjetos  
y se deja que escurran (elaboración propia).*

#### *Montaje para medir*

En este caso, la luz láser debe incidir sobre la película con un ángulo de inclinación pequeño con respecto a la normal del portaobjetos, para obtener un patrón de interferencia, que consistirá de bandas brillantes y oscuras. Esto puede hacerse de forma vertical u horizontal y dependerá del arreglo que se haga en función de espacio disponible. A continuación, en la figura 7.5 se muestra un posible arreglo. Conviene colocar la muestra arriba de una superficie negra y separada de esta



con uno o dos soportes para evitar que el reflejo del láser con otras superficies interfiera en el fenómeno a observar.

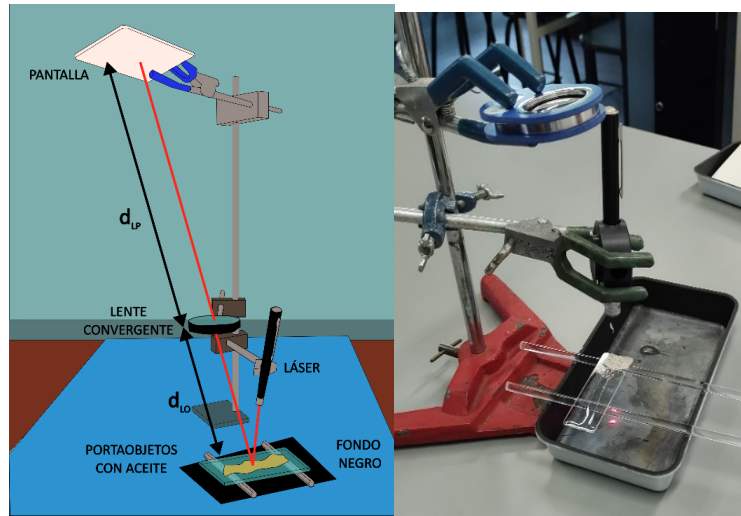


Figura 7.5. Arreglo experimental. A la izquierda, esquema del arreglo; y a la derecha, detalle de colocación del láser, la muestra y el lente (elaboración propia).

Al observar el patrón de interferencia obtenido al hacer incidir la luz sobre la superficie del aceite en el vidrio (portaobjetos o cubreobjetos) y amplificar con la lente convergente, se verá más de un patrón. Uno de ellos se deberá a que también se forma un patrón de interferencia por la reflexión de la cara superior e interior del objeto de vidrio. ¿Por qué?

Una discusión en clase sería conveniente.

Para saber cuál es el patrón debido a la película de aceite, deberá obtenerse el patrón de interferencia del portaobjeto o cubreobjeto limpio e identificar el tamaño de las franjas brillantes y oscuras que se obtienen. Un patrón de interferencia obtenido con un (portaobjeto/cubreobjeto) se muestra en la figura 7.6. Debe cuidarse de reproducir las mismas condiciones de incidencia de la luz, esto es, tiene que preservarse el ángulo de incidencia y la lente convergente en el mismo lugar.

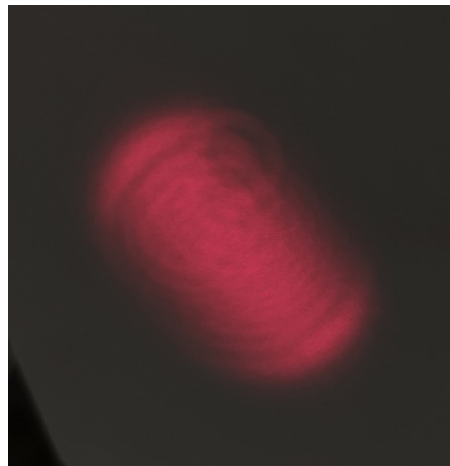
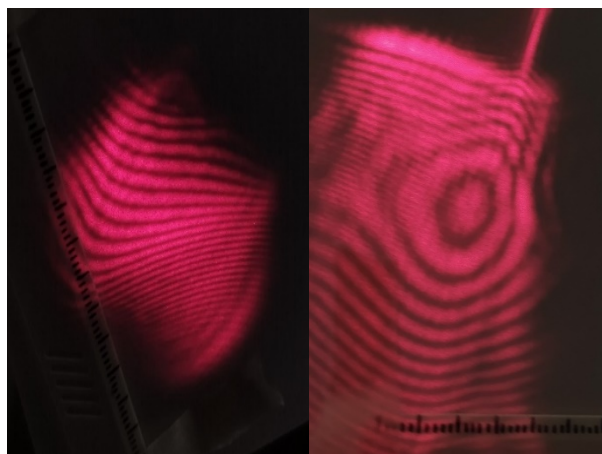


Figura 7.6. Ejemplo de patrón de interferencia de un portaobjeto (elaboración propia).

Una vez, determinado el patrón debido al medio de soporte de la película delgada, se deberá hacer incidir la luz láser sobre la película de aceite y obtener su patrón de interferencia que podrá notarse por ser diferente de el del medio de soporte. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 7.7.



*Figura 7.7. Patrones de interferencia. Se observa el patrón de interferencia de la película delgada por diferencia de tamaño y separación de las franjas oscuras y brillantes (elaboración propia).*

Sobre el patrón obtenido, se deberá observar que se formen franjas oscuras y brillantes nítidas y lo más separadas posible. Las franjas más separadas indican menor grosor y las franjas más juntas o que se superponen indican mayor grosor de la película.

#### *¿Cuánto mide la película delgada del aceite?*

En este caso, el patrón de interferencia es formado por la reflexión de la luz en dos superficies: la externa de la película delgada y la interna, a diferencia de un patrón de interferencia producido por dos aberturas como en la actividad 5. En la película, la reflexión sobre la superficie externa ocurre en el aire, cuyo índice de refracción es 1 y no va a influir en los cálculos que hay que hacer. Sin embargo, la luz que pasa por la película de aceite se refleja en su superficie interior para nuevamente salir de la película y refractarse, como se muestra en la figura 7.3, por lo que hay que tener en cuenta el índice de refracción del aceite utilizado.

En general, los índices de refracción a temperatura entre 20 y 40°C de los aceites son muy cercanos. Por ejemplo, en el aceite de máquina de coser es de 1.466<sup>12</sup>; en aceites lubricantes automotrices van de 1.466 a 1.469<sup>13</sup> y en aceites comestibles son también muy cercanos; maíz, 1.465; soya, 1.466; girasol, 1.465<sup>14</sup>. Si se utiliza un aceite lubricante como con los patrones que aquí se ejemplifican, se toma el valor de índice de refracción  $n = 1.466$ .

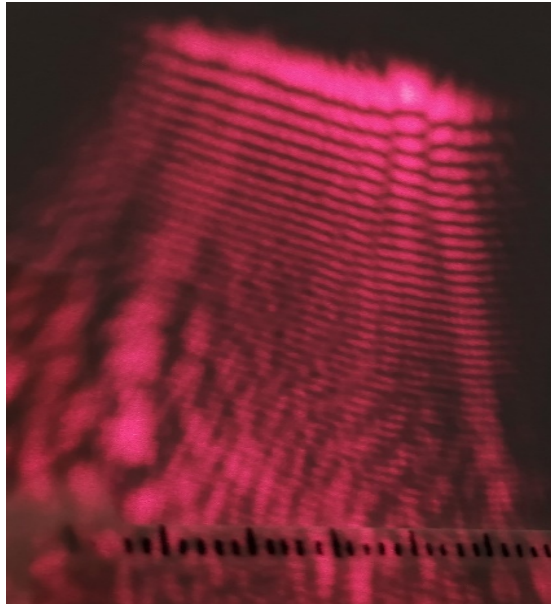
Lo que hay que observar en este caso es que el patrón de interferencia formado por la película delgada se vea como un conjunto de franjas luminosas. Puede ser que se observe una

<sup>12</sup> Valor obtenido de <https://soltronic.es/producto/aceite-para-maquinas-de-coser/>.

<sup>13</sup> Valores obtenidos de Corella, F. (2016). Caracterización de aceites de motor por sus propiedades ópticas, Universidad de Monte Morelos, <https://dspace.um.edu.mx/bitstream/handle/20.500.11972/1167/Trabajo%20de%20titulación%20de%20Francisco%20David%20Corella%20Jiménez.pdf?sequence=1>.

<sup>14</sup> Mettler Toledo, <https://www.mt.com/mx/es/home/library/applications/lab-analytical-instruments/refractive-index-of-oils-and-fats-aoac-92108.html>.

primera franja más gruesa y las sucesivas van reduciendo su grosor de modo que la distancia entre franjas brillantes y oscuras sea cada vez menor, aunque en algunos casos es posible que llegue a ser regular, esto es, la distancia entre franjas se mantiene constante, lo que depende de la uniformidad de la película. También ocurre que la intensidad luminosa de las franjas brillantes se va reduciendo, como se observa en la figura 7.8.



*Figura 7.8. Imagen centrada en el patrón de interferencia debido a la película de aceite. Las franjas superiores son más gruesas y brillantes que las inferiores (elaboración propia).*

El grosor de la película se puede determinar por la relación en la que se producen las franjas oscuras

$$d_m = m \lambda / 2 n \quad \text{donde } m = 1, 2, 3 \dots$$

lo cual indica que las bandas oscuras son múltiplos de  $\lambda / 2 n$ , cuando  $m = 1$  corresponde a la banda oscura que se encuentra entre las dos primeras bandas luminosas. La relación en la que se producen las franjas brillantes es

$$d_m = (2m + 1) \lambda / 4n \quad \text{donde } m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

la cual indica que las bandas brillantes son múltiplos de  $\lambda / 4 n$ . Para tomar el valor de  $m = 1$ , se deberá observar, en la exploración de pasar el láser por diversas regiones de la película, donde se muestren las franjas más gruesas, brillantes y lo más espaciadas entre sí, al igual que las franjas oscuras, pues la intensidad luminosa que se observa está estrechamente relacionada con el grosor de la película.

¿Por qué debe cumplirse esta condición para  $m = 1$  y no para  $m = 2$  o  $m = 3$ ?  
Una discusión en clase sería conveniente.

Si se utiliza el mismo láser que en las actividades previas, puede usarse el valor obtenido de la longitud de onda de la luz, o bien, utilizar el valor para  $\lambda$  que indica el fabricante.

Con esos datos, es posible calcular el grosor  $d$  de la película de aceite.

Si el patrón de interferencia es nítido y las franjas oscuras y brillantes no se traslapan, es debido a que se está en la región más delgada de la película. Sin embargo, con este proceso básico de medición, lo que podríamos tener es un estimado del grosor. Para ello, deben utilizarse los primeros cuatro números del factor  $m$  en las ecuaciones para la interferencia constructiva y destructiva. Para ello, se puede utilizar la tabla siguiente:

Tabla 5.1. Cálculo de grosor de película delgada de lubricante doméstico (elaboración propia).

| Patrón de interferencia      | Valor de $k$ | Valores                | Grosor de la película (m) | Grosor en potencias de 10 |
|------------------------------|--------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Patrón de franjas oscuras    | $m = 1$      | $1 \lambda/2n =$       | $d = 221.6\text{nm}$      |                           |
|                              | $m = 2$      | $2 \lambda/2n =$       |                           |                           |
|                              | $m = 3$      | $3 \lambda/2n =$       |                           |                           |
| Patrón de franjas brillantes | $m = 0$      | $(0 + 1) \lambda/4n =$ | $d = 110.8 \text{ nm}$    |                           |
|                              | $m = 1$      | $(2 + 1) \lambda/4n =$ | $d = 332.5\text{nm}$      |                           |
|                              | $m = 2$      | $(4 + 1) \lambda/4n =$ |                           |                           |
|                              | $m = 3$      | $(6 + 1) \lambda/4n =$ |                           |                           |

Nota: El valor de la longitud de onda del láser rojo considerado en estos cálculos es de 650 nm

En esta tabla se puede apreciar que el grosor de la película donde se localiza la primera banda oscura está entre los valores calculados para la primera ( $m = 0$ ) y segunda bandas ( $m = 1$ ) luminosas.

Si se empleara un láser cuya longitud de onda fuese más pequeña, por ejemplo, un láser con luz de color verde, ¿se podría medir una región de la película más delgada de lo que se puede medir con el láser de luz roja?

Se sugiere discutir en clase por qué sí o por qué no.

La reducción de las distancias entre las franjas  $\Delta x_m$  se debe al incremento en el ángulo  $\alpha$  que existe entre las dos superficies de la película de aceite a lo largo de su escurrimiento.

Esta distancia está determinada por la ecuación

$$\Delta x_m = x_{m+1} - x_m = (d_{m+1} - d_m) / \alpha = \lambda / (2 n \alpha) \quad \text{donde } m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

En la ecuación se aprecia que la separación entre franjas es inversa al ángulo; de modo que, entre mayor ángulo es menor la distancia. Este ángulo se va incrementando a lo largo del escurrimiento de la gota de aceite, como se esquematiza en la siguiente figura 7.9.

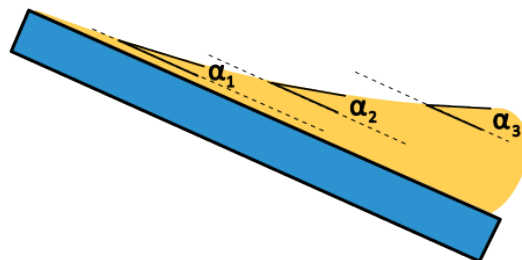


Figura 7.9. Al irse escurriendo la gota de aceite, la inclinación de la superficie que hace contacto con el aire se va incrementando a lo largo de su escurrimiento (elaboración propia).

Este efecto también se puede observar en películas de jabón que se escurren, solo que la película es iluminada con luz blanca, de manera que se producen bandas de colores.

### ¿Qué analizar?

Como podrá notarse, la observación de colores como en una burbuja o película de jabón, o bien, en manchas de aceite, se debe a que ocurre un proceso de interferencia de la luz con la condición de que el grosor de la película de jabón o de aceite sea cercana a la longitud de onda de la luz.

Tomando en cuenta la actividad inicial (Capítulo 3), ¿con qué dimensión se compara el grosor de estas películas? Una discusión en clase sería conveniente.

Las mediciones que se han llevado a cabo por interferencia en esta actividad –y por difracción en la actividad precedente– son mediciones que nos dan valores estimados, lo anterior debido a que se han llevado a cabo de forma simple con instrumentación que no es de alta precisión. Sin embargo, nos da un valor cercano que permite tener una clara idea espacio-dimensional de magnitudes del orden de los nanómetros. Hay instrumentos de interferometría, esto es, basados en la interferencia de la luz, que miden de manera precisa el grosor de las películas delgadas.

### Algo más

Hay diversas formas de observar patrones de colores por interferencia, lo que hay que lograr es una película delgada. El reto que se propone es encontrar tres formas adicionales a las aquí descritas de producir un patrón de interferencia con luz blanca. ¿Tendrán una explicación y dimensiones como las que se obtuvieron en esta actividad?



*Figura 7.10. Colores en asfalto mojado (elaboración propia).*

La figura 7.10 fue tomada en el asfalto mojado y presenta unas gotas muy peculiares. ¿Podrías explicar por qué se ven de diferentes colores? y ¿por qué sus colores son casi uniformes en cada gota?

## **LA ESCALA NANO: ¿CÓMO MEDIRLA?**

### **¿Cuál es el propósito de aprendizaje?**

Si bien no es posible observar objetos más pequeños que unas decenas de micras con las posibilidades de amplificación de un microscopio óptico y los patrones de difracción que se han obtenido de actividades precedentes, sí es posible seguir construyendo una representación espacio-dimensional de objetos aún más pequeños, a través de imágenes y sus escalas. Dichas imágenes son construidas mediante la interacción electromagnética entre el objeto y los instrumentos con las que se obtienen, como son los microscopios electrónicos y los microscopios de fuerza atómica. Por ello, se espera que la medición que pueda hacerse por medio de esas imágenes permita reconocer algunas características de esos objetos y contribuya a dar continuidad con el proceso de dimensionar lo muy pequeño y tener idea de lo que significa su orden de magnitud en relación con los objetos cotidianos.

### **Qué hacer**

Con las actividades previas, ha sido posible hacer mediciones de objetos muy pequeños que no podemos ver pero que, relativamente, aún son grandes comparados con otros mucho más pequeños. Los instrumentos como el microscopio óptico o las técnicas simples con láser no permiten medir esos objetos de dimensiones menores a la longitud de onda de la luz. Por ello, se han desarrollado diversos instrumentos como el Microscopio de Fuerza Atómica (MFA), el Microscopio Electrónico y otros más que se describirán más adelante. Estos equipos de observación y medición no son asequibles fácilmente. Por ello, la actividad consistirá en estimar los tamaños de diversos objetos con imágenes y sus escalas de medición obtenidas con esos microscopios y que se presentan en esta actividad para seguir explorando objetos cada vez más pequeños.

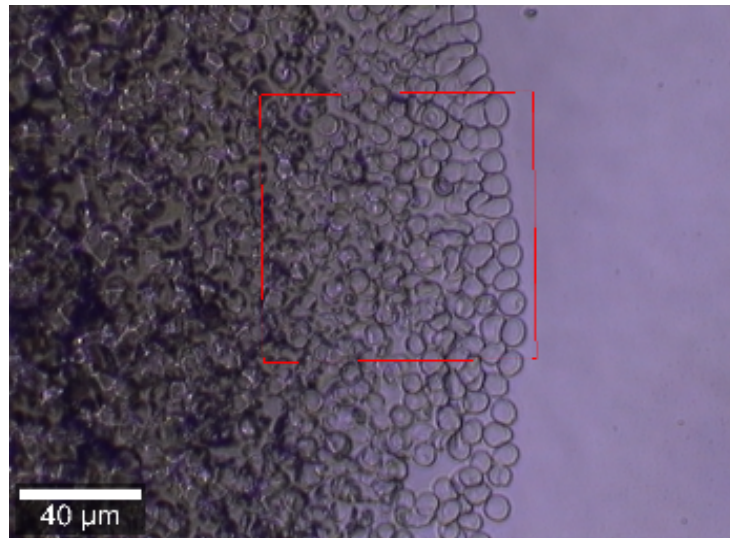
### **¿Por qué y para qué hacer esta actividad?**

Con esta actividad se completará la incursión a los objetos muy pequeños hasta aquellos de los cuales solo es posible obtener cierto tipo de imágenes por medios indirectos, como es a través de ciertas propiedades de la interacción de la materia. Estas imágenes, sobre las cuales se podrán medir algunas características de los objetos pequeños, apoyarán la comprensión de lo que implica, en términos de tamaño, de lo más pequeño detectable que se puede traducir en una imagen, y que se encuentra en las escalas nano y Ångström.

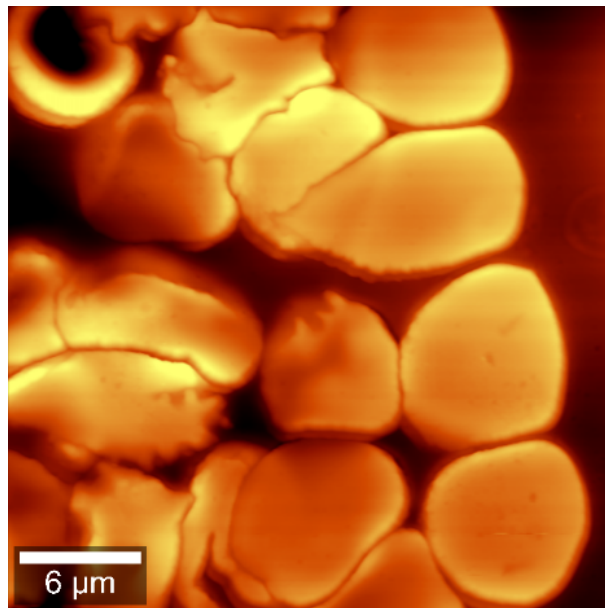
### **Desarrollo**



En las figuras siguientes se presentan algunos objetos de magnitudes más pequeñas a  $10\ \mu\text{m}$ . En ellas aparecen las escalas con las cuales se puede estimar el tamaño aproximado de dichos objetos. En las figuras 8.1 y 8.2, se presentan imágenes de eritrocitos o glóbulos rojos de sangre humana seca. La primera imagen (figura 8.1) es una fotografía tomada con un microscopio óptico de reflexión con un recuadro de  $90 \times 90\ \mu\text{m}$ , la segunda imagen (figura 8.2) tiene mayor resolución y muestra una pequeña sección dentro del recuadro que se observa en la figura 8.1, tomado por medio de un barrido más fino con un Microscopio de Fuerza Atómica (MFA).



*Figura 8.1. Eritrocitos con un microscopio óptico, utilizando un objetivo de 20 x, el recuadro mide  $90 \times 90\ \mu\text{m}$  (Cortesía M. en C. José Guadalupe Bañuelos Muñetón, del ICAT)*



*Figura 8.2. Eritrocitos con mayor resolución, tomados por el Microscopio de Fuerza Atómica dentro del recuadro de la figura 6.1. (Cortesía M. en C. José Guadalupe Bañuelos Muñetón, del ICAT).*

Aprovechando el factor de escala que aparece en la segunda imagen, se puede estimar el tamaño de un eritrocito. Se puede medir el diámetro de varios de ellos y hacer una estimación promedio de su diámetro. Hay que llevar a cabo esta estimación con al menos 6 de estos eritrocitos y calcular el diámetro promedio. El resultado se puede ubicar en la siguiente tabla 6.1.

Tabla 6.1. Medida de los eritrocitos (elaboración propia).

| Escala | Factor de amplificación | Medida promedio de los Eritrocitos | Medida en potencias de 10 |
|--------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------|
|        |                         |                                    |                           |

¿En qué intervalo se puede ubicar lo que mide el diámetro de un glóbulo rojo de sangre humana?, ¿cuál es su orden de magnitud?

Los discos que nos permiten escuchar música y ver películas han sido posibles con el desarrollo de diversas tecnologías. Los discos LP (Long Play) se prensan en acetato por medio de surcos muy pequeños con el registro de formas ondulatorias en ellos. Estos surcos son muy pequeños y las formas que tienen a simple vista no los podemos distinguir. La figura 8.3 muestra una ampliación de los surcos y figuras interiores de un LP.

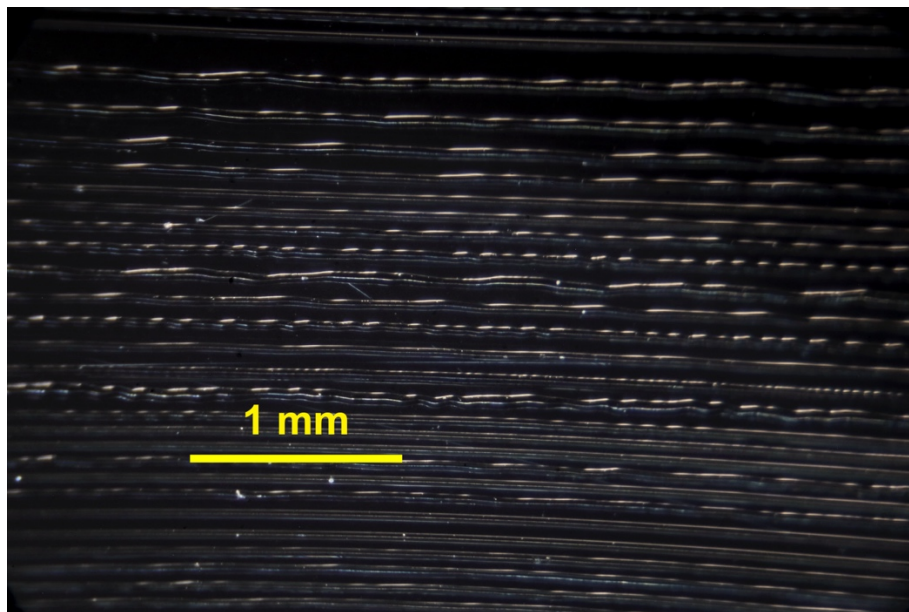


Figura 8.3. Surcos y sus formas de un LP  
(cortesía del Fís. Héctor Covarrubias Martínez).

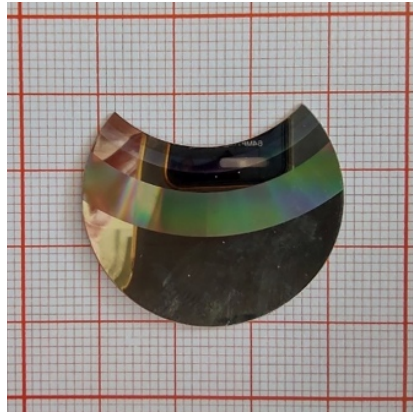
De la imagen de la figura 8.3 y con el factor de escala que indica, ¿Cuánto mide el ancho de los surcos?, ¿por qué hay surcos más anchos que otros y de distintas formas sinuosas?

Determinar la medida en metros de al menos cuatro surcos y discutir en clase qué implican en la escucha de la música, sus cambios de forma y tamaño.

Posterior al LP, con el láser se desarrollaron los formatos DC, DVD y *Blu-ray* para almacenar la información en discos de policarbonato con superficie reflejante, como el segmento de un disco compacto de la figura 8.4. En la imagen de la figura 8.5, se aprecia un conjunto de surcos alineados de una fracción de un disco DVD tomadas con Microscopio de barrido de Fuerza



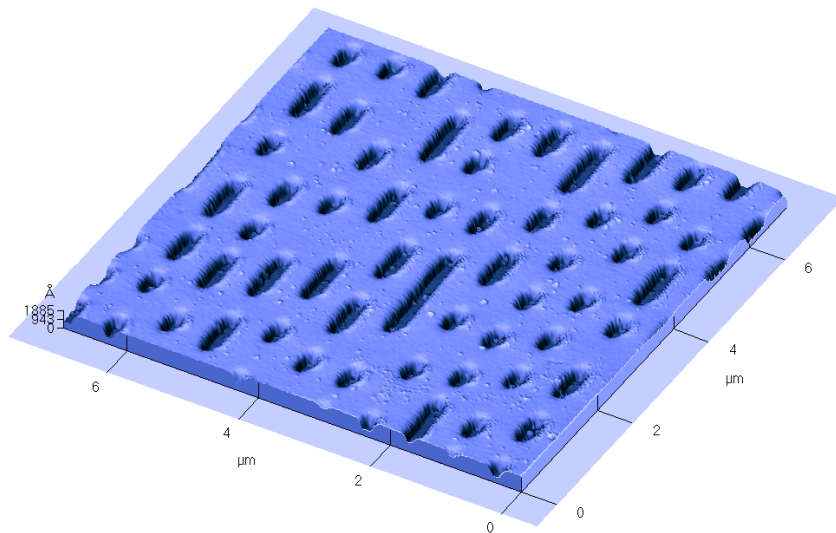
Atómica, los surcos son del mismo ancho, pero de largos diferentes. La imagen cubre un área de  $7 \times 7 \mu\text{m}$ .



*Figura 6.4. Muestra de una pequeña sección de un máster de disco compacto (cortesía del M. en C. José Guadalupe Bañuelos Muñetón, del ICAT).*

Aprovechando la escala que indica el tamaño de la imagen de la figura 8.5, se puede estimar el ancho y largo de los surcos. ¿Cuánto mide el ancho y el largo de los surcos en el DVD? ¿Cuál es su orden de magnitud? ¿Son comparables el ancho de los surcos en el LP con los del DVD? ¿Cuál es la magnitud de su diferencia? ¿Qué implica en términos de almacenamiento de información esa diferencia?

Una discusión en clase de las magnitudes obtenidas y de las implicaciones que plantean las preguntas precedentes sería conveniente.



*Figura 8.5. Micrografía de un Disco de Video Digital (DVD) obtenida por microscopia de fuerza atómica. La imagen tiene un largo y ancho de  $7 \mu\text{m}$  (cortesía del M. en C. José Guadalupe Bañuelos Muñetón del ICAT).*

Los valores inferiores a las micras también pueden obtenerse con el Microscopio Electrónico. Un interesante ejemplo de ello son las imágenes de los virus como el SARS-CoV-2 causante de la pandemia de la COVID-19. En la figura 8.6 se muestra una micrografía tomada por medio de un microscopio electrónico. En él, se observan las extensiones que tiene el virus sobre su superficie, como si fuese una corona.

¿Cuánto mide un virus de SARS-CoV-2? ¿Cuál es su orden de magnitud?

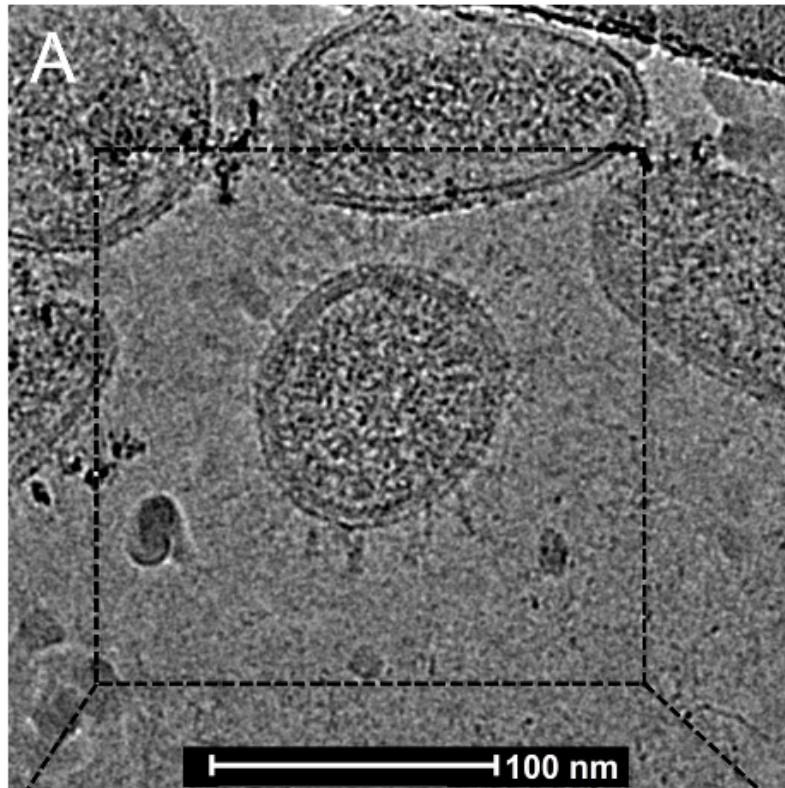
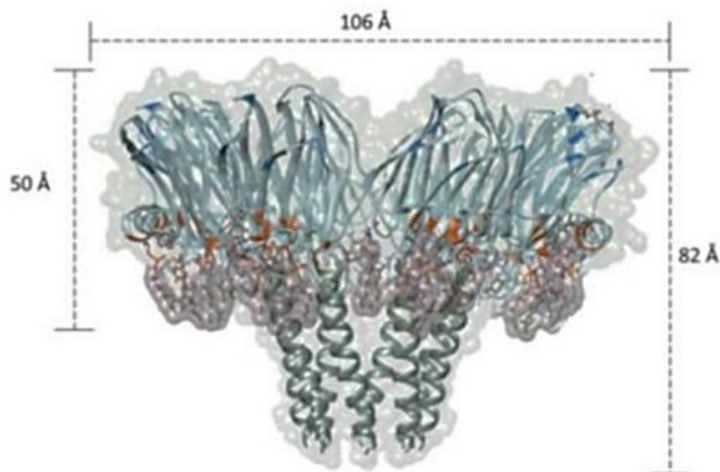


Figura 8.6. Imagen del virus de SARS-CoV-2 tomada en microscopio electrónico<sup>15</sup>, (Chuang et al., 2020).

Más reciente, se han desarrollado sistemas de cómputo que permiten analizar, diseñar y visualizar modelos de moléculas tanto simples como complejas. Un ejemplo es una biomolécula de actinoporina<sup>16</sup>, la cual es una proteína tóxica de la anémona marina. Su modelo se muestra en la figura 8.7. El sistema de cómputo dimensiona esta proteína en un ancho poco mayor de 10 nm y altura de 8.2 nm.

<sup>15</sup> Viral Architecture of SARS-CoV-2 with Post-Fusion Spike Revealed, <https://doi.org/10.1101/2020.03.02.972927>. [Acceso: 23 de abril de 2024].

<sup>16</sup> Ramírez Carreto, Miranda-Zaragoza y Rodríguez-Almanza (2020). Actinoporins: From the Structure and Function to the Generation of Biotechnological and Therapeutic Tools, *Biomolecules*, 10, 539. Doi:10.3390/biom10040539.



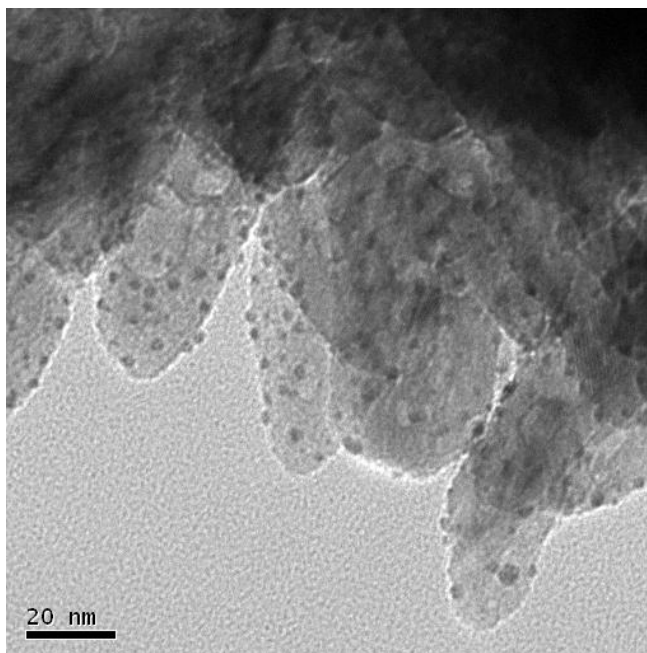
*Figura 8.7. Poro formado por una toxina de anémona (cortesía de la Dra. Claudia Rodríguez Almaz, del ICAT).*

Para las mediciones de moléculas, es conveniente utilizar diversas técnicas. Una de ellas es la espectroscopía Raman<sup>17</sup> y el Microscopio de Fuerza Atómica. Con ello, se puede detectar la distribución de las moléculas y átomos.

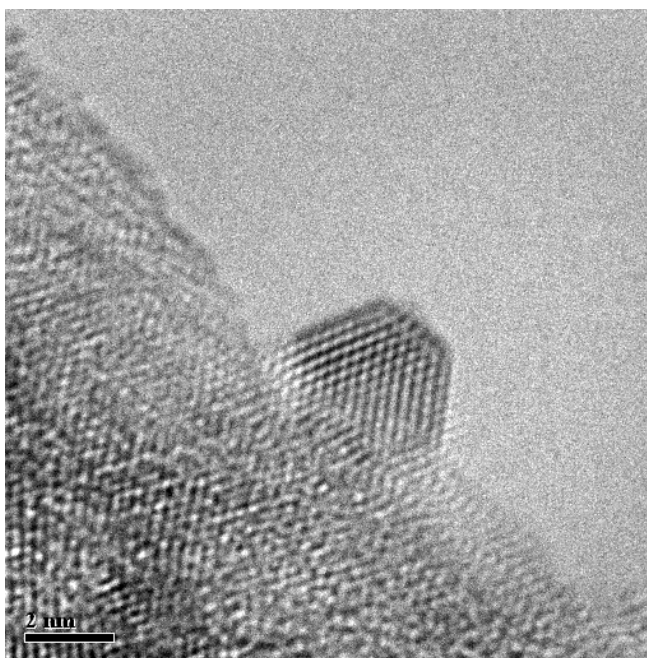
En las figuras 8.8 y 8.9, se pueden observar arreglos atómicos en las partículas de oro que se encuentran en un soporte o sustrato de óxido de titanio. Las nanopartículas de oro se pueden distinguir, ya que son más pequeñas y típicamente presentan estructuras semi-cubo-octaedrales o en forma de icosaédros.

---

<sup>17</sup> La espectroscopía Raman es una técnica que permite determinar las vibraciones de las moléculas cuando la luz, al incidir sobre ellas, es primero absorbida y después re-emitida, pero a una frecuencia diferente a la que incidió. Estas variaciones en la frecuencia de la luz permiten conocer sobre la estructura y composición de las moléculas.



*Figura 8.8. Nanopartículas de oro (pequeños gránulos) en soporte de óxido de titanio, tomadas con un microscopio electrónico (cortesía del Dr. Rodolfo Zanella Specia, del ICAT).*



*Figura 8.9. En esta imagen (de mayor resolución) se pueden observar los arreglos atómicos de una nanopartícula de oro. Puede distinguirse la forma geométrica (icosaedro) de la nanopartícula y los planos en los que se ordenan los átomos (cortesía del Dr. Rodolfo Zanella Specia, del ICAT).*

Para una mejor comprensión del arreglo de los átomos de oro que forman la nanopartícula de la figura 8.9, se considera conveniente comparar su forma con las de los poliedros regulares cuboctaedro e icosaedro, los cuales pueden encontrarse en la Internet o libros de geometría.

Como podrá notarse, es posible con el microscopio electrónico obtener imágenes de planos atómicos que están por debajo de un nanometro. ¿En qué escala se encuentran?

A partir de la figura 8.9, se deberá determinar la longitud de los lados de la nanopartícula y también la distancia entre las líneas de los planos atómicos. En la siguiente tabla 6.2, se pueden inscribir las medidas obtenidas a partir de las imágenes.

Tabla 6.2. Medidas de los lados de la nanopartícula de oro y distancia entre líneas de los arreglos de sus átomos (elaboración propia).

| Escala | Factor de amplificación | Longitud de los lados de la nanopartícula | Distancia entre los planos de arreglos moleculares | Medidas en potencias de 10 |
|--------|-------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|
|        |                         |                                           |                                                    |                            |

De los objetos a los que se ha podido determinar su tamaño, se puede hacer una lista por orden de mayor a menor y escribir su orden de magnitud en potencias de diez. Los datos se pueden organizar en la tabla 6.3:

Tabla 6.3. Objetos ordenados de acuerdo con su tamaño (elaboración propia).

| Objeto | Medida | Orden de magnitud |
|--------|--------|-------------------|
|        |        |                   |
|        |        |                   |
|        |        |                   |
|        |        |                   |
|        |        |                   |

### ¿Qué analizar?

Con excepciones de la figura 8.1 de los eritrocitos, la fotografía de la figura 8.3 del disco LP en que las imágenes son obtenidas con un microscopio óptico y una cámara fotográfica, y la fotografía del CD de la figura 8.4, las demás imágenes son obtenidas con microscopios electrónicos y de fuerza atómica. Sin embargo, con estos microscopios no se observan los objetos como en el microscopio óptico, las imágenes que se obtienen son mediciones de propiedades y comportamiento eléctrico y electromagnético de la materia de esos objetos y que se reconstruyen en formas de imágenes que podemos ver a través de procesos de cómputo en los cuales, incluso, es posible asignarles color para identificar determinadas características de la materia.

Se propone que, con el apoyo de los docentes, se lleve a cabo una discusión en clase acerca de por qué no es posible ver objetos del orden o más pequeños de la longitud de onda de la luz visible. Una idea base es considerar qué se requiere para ver la imagen de un objeto y si los objetos del orden de la longitud de onda o más pequeños podrían o no formar una imagen.

### Algo más

Para conocer sobre la historia y funcionamiento de los microscopios electrónicos, se recomienda la lectura de acceso libre de José Reyes Gasca (2020) sobre la historia de la microscopía electrónica

que narra desde sus ideas originales hasta su desarrollo actual, poniendo énfasis en México. Para una historia más general y breve de la microscopía, se encuentra el escrito de Rodríguez de la Concha, López y Vilchis (2023), *El microscopio bajo mis manos: breve historia, funcionamiento y aplicaciones de la microscopía* y, para conocer un poco más de los procesos de medición, se recomienda el artículo de Rivera y Arenas-Alatorre (2019).

## PARA FINALIZAR

El conjunto de actividades de este libro ha sido elaborado para apoyar al alumnado de bachillerato, pero no exclusivamente para que construyan en su concepción espacio-dimensional una representación que les permita ubicar, en términos relativos, las dimensiones de objetos no observables más que con instrumentos como el microscopio o medibles a partir de procesos como los de interferencia y difracción.

El punto de partida de las actividades ha sido el factor de amplificación que se requiere para poder llegar a observar o medir esas entidades u objetos en la escala micrométrica y nanométrica. A partir de la comprensión de lo que implica el factor de amplificación, se plantearon diversas actividades que implican el uso de formas distintas de medición para llegar a la escala nanométrica. Para dicha escala, es necesario otro tipo de instrumentación y formas de medición, como es el caso de moléculas y planos atómicos. Sin embargo, a partir de la ubicación de objetos micrométricos, se construye a través del factor de amplificación una ubicación relativa dimensional con respecto a entidades micrométricas, como las células de la cebolla o las películas delgadas de una mancha de aceite.

Debido a la importancia del proceso de amplificación para la medición y observación de objetos a escalas muy pequeñas es recomendable asegurarse de su comprensión por parte del alumnado. Se pueden llevar a cabo, si el docente lo considera necesario, actividades extra o previas como elaborar algún dibujo de una figura geométrica como un cubo y pedir al alumnado que lo amplifiquen por un cierto factor o bien utilizar una lupa y proyectar una imagen de una figura conocida y medir su ampliación al ser proyectada entre otras actividades sencillas. Lo relevante es que el alumnado comprenda como el factor de amplificación permite pasar de una escala a otra mediante un proceso de ampliación dimensional.

Este proceso representacional requiere del alumnado, el desarrollo de procesos cognitivos con los cuales pueda ubicar espacialmente objetos ordenados por sus dimensiones y la conceptualización de un proceso de amplificación que va mucho más allá de lo cotidiano. Esta interrelación entre amplificación y ordenamiento dimensional requiere de una construcción conceptual y representacional que implica un proceso *intensivo* e *immersivo*, así como de un cierto tiempo de construcción por parte del alumnado que, desde luego, no se agota en una o dos sesiones de clase y que, aún y cuando las actividades propuestas se lleven a cabo, el proceso de construcción continuará en otros contextos y situaciones escolares y extraescolares.

Para que este proceso constructivo pueda llevarse a cabo, los docentes deberán enfatizar, en diversos momentos del desarrollo de las actividades, que los alumnos representen verbal y gráficamente los objetos que están midiendo o comparando con tamaños relativos entre ellos o con otros objetos conocidos y que les son comunes. Para ello, los docentes pueden aplicar algún



cuestionario<sup>18</sup> o preguntas indicadoras, con las cuales los estudiantes puedan elaborar sus representaciones. Por ejemplo, solicitando la elaboración de dibujos, maquetas o series ordenadas de objetos y sus escalas correspondientes, entre otras posibilidades que la experiencia de los docentes les sugiera.

Adicional a este proceso de construcción conceptual y representacional espacio-dimensional que se plantea con el conjunto de actividades, este libro tiene también la intención de reintroducir en el bachillerato lo relevante de los procesos de medición para el desarrollo de habilidades y competencias para el aprendizaje y valoración de las ciencias experimentales. Esto debido al notorio abandono que, en la enseñanza de las ciencias, se ha tenido sobre los procesos de medición y que son relevantes no por la medición en sí, sino por sus implicaciones en la comprensión que la medición y la experimentación han tenido en el desarrollo de las ciencias, contribuyendo así a una mejor comprensión de la Naturaleza de la Ciencia.

Si bien es deseable que el conjunto de actividades que se desarrollan en el libro se lleve a cabo en la escuela, es también comprensible que, dadas las características de los cursos y demanda curricular, no sea posible llevarlas todas a cabo. En este caso, se sugiere al profesorado no omitir la primera y la última actividad (numeral 3 y 8, respectivamente) y llevar a cabo al menos una de las actividades de medición, que podrá seleccionar de acuerdo con sus intereses, el de los alumnos y las posibilidades que la escuela ofrezca.

Cabe hacer notar que todas las actividades de medición han sido elaboradas considerando los elementos mínimos que los laboratorios de bachillerato usualmente tienen de manera regular e, incluso, algunas de ellas pueden llevarse a cabo en algún salón de clase. De manera que estas puedan realizarse en distintos escenarios escolares e incluso extraescolares, en donde los materiales e instrumentos no sean un impedimento para llevarlas a cabo.

---

<sup>18</sup> Un cuestionario que puede servir de base es el descrito en Flores-Camacho *et al.*, (2023) en la revista *Mundo Nano*, de la UNAM, la cual es de libre acceso.

## REFERENCIAS

- Adadan, E., Akaygun, S. & Sanyal, A. (2017). Size-dependent properties of matter: Is the size of a pill important? *Science Activities*, 54(3-4), 86-95.
- Centro Nacional de Metrología (2003). *Sistema Internacional de Unidades (SI)*, Publicación técnica CNM-MMM-PT-003, CENAM, México, <https://www.cenam.mx/publicaciones/> [último acceso: agosto de 2024].
- Corcoran, T. & Silander, M. (2009). Instruction in high schools: The evidence and the challenge. *The Future of Children: America's High Schools*, 19, 157-183
- Corella, F. (2016). *Caracterización de aceites de motor por sus propiedades ópticas*, Universidad de Monte Morelos (tesis). 20Francisco%20David%20Corella%20Jiménez.pdf?sequence=1, [último acceso: julio de 2024].
- Chuang, L., Yang, Y., Yuanzhu, G., Chenguang, S., Bin, J., Congcong, L., Xian, T., Jinli, W., Xiaomin, M., Weilong, L., Shuman, X., Yingxia, L., Jing, Y., Jing, W., Zheng, L., Zheng, Z., Peiyi, W., y Lei, L. (2020). Viral Architecture of SARS-CoV-2 with Post-Fusion Spike Revealed. <https://doi.org/10.1101/2020.03.02.972927>. [último acceso: abril de 2024].
- FECEIA (s.f.). [www.fceia.unr.edu.ar/fisicaexperimentalIV/](http://www.fceia.unr.edu.ar/fisicaexperimentalIV/), [último acceso: julio de 2024].
- Flores, F., Gallegos, L. y Vega, E. (1983). *Experiencias en la Cuba de Ondas. Manual de experimentos para el profesor*. Centro de Instrumentos UNAM (Actual Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología).
- Flores, F., Tovar, Ma. E., y Gallegos, L. (2003). Representation of the cell and its processes in high school students: an integrated view. *International Journal of Science Education*, 25(2), 269-286.
- Flores-Camacho, F., Gallegos-Cázares, L, Garritz, A., y García, A. (2007). Incommensurability and multiple models: Representations about structure of matter in undergraduate chemistry students. *Science & Education*, 16 (6-7), 775-800.
- Flores-Camacho, F., Calderón-Canales, E., García-Rivera, B., Gallegos-Cázares, L. y Baez, A. (2021). Representational trajectories in the understanding of Mendelian genetics, *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(8), 1-17.
- Flores-Camacho, F., Vega-Murguía, E., Cruz-Cisneros, J. M. y Gallegos-Cázares, L. (2023). Retos y perspectivas para la enseñanza de las nanociencias y nanotecnología en el bachillerato, *Mundo Nano*, 17(32), 1e-32e.
- Gago M., J. A. (2009). Microscopía para el estudio de materiales y láminas delgadas. <https://www.researchgate.net/publication/267306323>, [último acceso: agosto de 2024].

- Gallegos, L., García, A. y Calderón, E. (2007). Estrategias de enseñanza y cambio conceptual, en F. Flores y J. I. Pozo (Eds.) *Cambio conceptual y representacional en el aprendizaje y la enseñanza de la ciencia*, Antonio Machado Libros, pp. 239-252.
- García-Rivera, B., Gallegos-Cázares, L., Flores-Camacho, F. y Báez Islas, A. (2023). Modelos parciales posibles de la herencia genética en estudiantes de bachillerato, *Investigacoes em Ensino de Ciencias*, 28(3), 148-169.
- Google-Earth, Google.org [último acceso: mayo de 2024].
- Guzman de E. y Sanjay, N. (2019) Refining student's explanations of an unfamiliar physical phenomenon-microscopic friction. *Research on Science Education*, 49, 1177-1211.
- Hecht, E. (2003). *Óptica*. Madrid. Pearson/Addison Wesley.
- JCGM (2000, 2012). *International vocabulary of metrology / Vocabulaire international de metrologie*, p. 16. <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications>, [último acceso: mayo de 2024].
- Lederman, N. G. y Abell, S. K. (2014). *Handbook of Research on Science Education*, Vols. I y II, Routledge.
- Magana, A. J., Brophy, S. P. y Bryan, L. A. (2012). An integrated knowledge framework to characterize and scaffold size and scale cognition (FS2C), *International Journal of Science Education*, 34(14), 1281-2203.
- Matthews, M. R. (2014). *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science Teaching*, Vols. I, II y III. Springer.
- Medina, J. (2001). Dimensiones y curiosidades de los átomos, *Ciencia y Tecnología*, 18, 15-17.
- Mettler Toledo (2024). <https://www.mt.com/mx/es/home/library/applications/lab-analytical-instruments/refractive-index-of-oils-and-fats-aoac-92108.html>, [último acceso: mayo de 2024].
- Metz, K. (2008). Narrowing the gulf between the practices of science and the elementary school classroom. *Elementary School Journal*, 109, 138-161.
- Moebs, W., Ling, S. J. y Sanny, J. (2021). *Física Universitaria*, Vol. 3, Texas, OpenStax.
- National Research Council (2005). *Systems for state science assessment*. M. R. Wilson y M.W. Bertenthal (Eds.) National Academy Press.
- Ramirez Carreto, Miranda-Zaragoza y Rodríguez-Almanza (2020). Actinoporins: From the Structure and Function to the Generation of Biotechnological and Therapeutic Tools, *Biomolecules*, 10, 539. doi:10.3390/biom10040539.
- Reyes, J. (2020). Breve reseña histórica de la microscopía electrónica en México y el mundo, *Mundo Nano*, 13(25), 79-100.
- Rivera, M., Arenas-Alatorre, J. (2019). De los micrómetros a los picómetros: evolución de las técnicas de microscopía para el estudio de nanomateriales, *Mundo Nano*, 12(23), 1e-25e.
- Rodríguez de la Concha, G., López, G. y Vilchis, N. (2023). El microscopio bajo mis manos: breve historia, funcionamiento y aplicaciones de la microscopía, *CIENCIA, ergo sum*, 30(3), e213, 1-16.
- Rossi, B. (1965). *Optics*. Massachusetts, Addison Wesley.
- Smith III, J., Heuvel-Panhuizen, M., & Teppo, A. (2011). Learning, teaching and using measurement: introduction to the issue, *Mathematics Education*, 43, 617-620.
- Soltronic (2024). <https://soltronic.es/producto/aceite-para-maquinas-de-coser/>, [último acceso: 12 de julio de 2024].

Vega-Murguía, E., Flores-Camacho, F., Cruz-Cisneros, J. M. y Gallegos-Cázares, L. (2024). Ubicación espacio dimensional de la nano escala en alumnos de bachillerato, VII *Símposio Internacional de Enseñanza de las Ciencias, SIEC 2024* (en prensa).

## ANEXO 1

Prefijos de múltiplos y submúltiplos de las unidades del Sistema Internacional de Unidades.

Esta tabla se basa en el documento oficial del acuerdo internacional sobre pesas y medidas.

| Nombre | Símbolo | Valor      |   |                                   |
|--------|---------|------------|---|-----------------------------------|
| yotta  | Y       | $10^{24}$  | = | 1 000 000 000 000 000 000 000 000 |
| zetta  | Z       | $10^{21}$  | = | 1 000 000 000 000 000 000 000     |
| exa    | E       | $10^{18}$  | = | 1 000 000 000 000 000 000         |
| peta   | P       | $10^{15}$  | = | 1 000 000 000 000 000             |
| tera   | T       | $10^{12}$  | = | 1 000 000 000 000                 |
| giga   | G       | $10^9$     | = | 1 000 000 000                     |
| mega   | M       | $10^6$     | = | 1 000 000                         |
| kilo   | k       | $10^3$     | = | 1 000                             |
| hecto  | h       | $10^2$     | = | 100                               |
| deca   | da      | $10^1$     | = | 10                                |
| deci   | d       | $10^{-1}$  | = | 0,1                               |
| centi  | c       | $10^{-2}$  | = | 0,01                              |
| mili   | m       | $10^{-3}$  | = | 0,001                             |
| micro  | $\mu$   | $10^{-6}$  | = | 0,000 001                         |
| nano   | n       | $10^{-9}$  | = | 0,000 000 001                     |
| pico   | p       | $10^{-12}$ | = | 0,000 000 000 001                 |
| femto  | f       | $10^{-15}$ | = | 0,000 000 000 000 001             |
| atto   | a       | $10^{-18}$ | = | 0,000 000 000 000 000 001         |
| zepto  | z       | $10^{-21}$ | = | 0,000 000 000 000 000 000 001     |
| yocto  | y       | $10^{-24}$ | = | 0,000 000 000 000 000 000 000 001 |

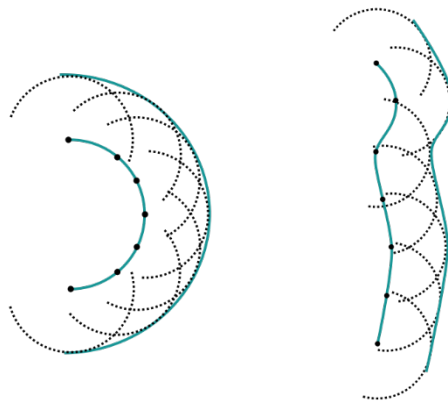
El kilogramo es la única unidad del Sistema Internacional cuyo nombre y símbolo, por razones históricas, incluye un prefijo. Los nombres y símbolos para múltiplos y submúltiplos decimales de la unidad de masa se forman adjuntando el nombre y símbolo del prefijo a la unidad “gramo” y al símbolo de la unidad “g”, respectivamente. Por ejemplo,  $10^{-6}$  kg se escribe como miligramos, mg, no como microkilogramos,  $\mu$ kg.

## ANEXO 2<sup>19</sup>

### *Difracción por una rendija*

El fenómeno de difracción en una rendija se puede explicar con el principio de Huygens-Fresnel, el cual dice que:

Cada punto en un frente de onda en propagación sirve como fuente de trenes de ondas esféricas secundarias de tal modo que, al cabo de cierto tiempo, el frente de onda será la envolvente de estos trenes de ondas. Por otro lado, si la onda que se propaga tiene una frecuencia  $\nu$ , y se transmite por el medio a una velocidad  $V_f$ , entonces los trenes de ondas secundarios tendrán la misma frecuencia y velocidad (Hecht, 2000, p. 105).



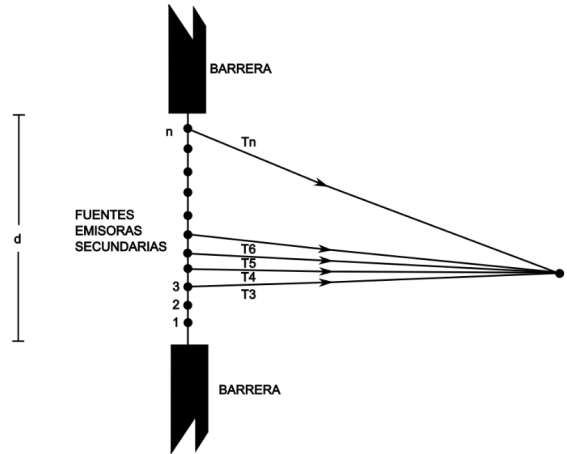
*Figura A2.1 Principio de Huygens-Fresnel para diferentes frentes de ondas (elaboración propia).*

De esta forma, los puntos de un frente de onda actúan como fuentes emisoras secundarias de ondas y los efectos que se observan delante de ese frente de onda se deberán al resultado de la suma o interferencia de las ondas. Esto se ilustra en la figura A2.1.

---

<sup>19</sup> Anexo elaborado por el alumno XXX becario del proyecto.

Este principio se aplica también a cualesquier porción de onda que incide perpendicularmente; por ejemplo, sobre la apertura de una rendija, como se muestra en la figura A2.2. Si el frente de la onda es plano, se puede considerar que a lo ancho de la rendija hay  $n$  fuentes puntuales secundarias, como se ilustra en la figura A2.2.



*Figura A2.2. Superposición de ondas en un punto P posterior a la abertura (elaboración propia).*

Como se puede apreciar en la figura A2.2, como resultado de la superposición de las  $n$  ondas emitidas por las fuentes secundarias en un punto P delante de la abertura, se tiene la expresión.

$$A[\cos \cos wt + \cos \cos (wt + \phi) + \cos \cos (wt + 2\phi) + \cdots + \cos (wt + (n - 1)\phi)]$$

Donde la diferencia de fase  $\phi$  se debe al tiempo de retardo que hay entre cada fuente generadora para alcanzar el punto P, debido a que todas las fuentes emiten en fase.



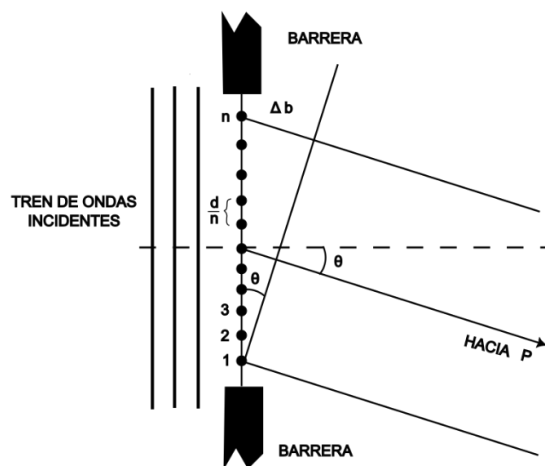


Figura A2.3. Frente de onda producido en dirección  $P$  y ángulo  $\theta$  (elaboración propia).

Como se muestra en la figura A2.3, el punto  $P$  se encuentra en una dirección  $\theta$  con respecto a la normal de las fuentes secundarias. Al emitir las  $n$  fuentes en fase, se produce un nuevo frente de onda con dirección  $\theta$  con respecto a la línea que une todas las fuentes, es decir, al frente de onda original. Por tanto, se producirá una diferencia de recorrido aproximada a  $\Delta b$ , que es  $\Delta b = d \sen \theta$ . Dado que la velocidad de la onda es  $v = \frac{\lambda}{T}$ , la diferencia de recorrido lo realiza con el tiempo de retraso:

$$\Delta t = \frac{\Delta b}{v} = \frac{d \sen \theta}{v} = \frac{T d \sen \theta}{\lambda}$$

Por lo tanto:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{d \sen \theta}{\lambda}$$

Lo que implica una diferencia de fase  $\phi = 2\pi \frac{\Delta T}{T}$ , de manera que si la diferencia es una longitud de onda, es decir, existe un retraso de tiempo igual al periodo, no hay diferencia de fase, es decir,

$$\phi = 2\pi = 360^\circ$$

Por consiguiente, la diferencia de fase entre la primera fuente secundaria y la  $n$ -ésima es:

$$n\phi = 2\pi \frac{d \sen \theta}{\lambda}$$

Por lo que la diferencia de fase entre cada fuente secundaria es:

$$\phi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{n \lambda}$$

donde  $\frac{d}{n}$  es la distancia entre cada fuente.

Si se suman vectorialmente en el punto P todas las contribuciones, como la diferencia de fase es constante entre cada fuente secundaria, la suma vectorial de amplitudes  $A_n$  se alinea alrededor de un círculo de radio  $r$  como se muestra en la figura A2.4.

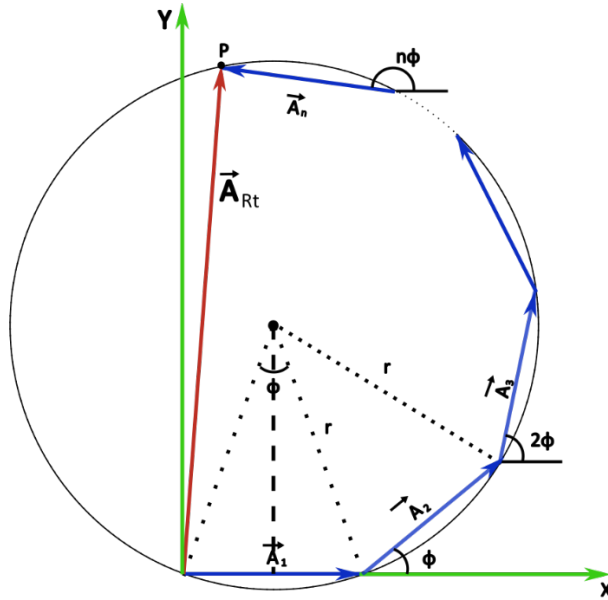


Figura A2.4. Suma vectorial de contribuciones hacia el punto P (elaboración propia).

De la figura A2.4 puede verse que, para ángulos pequeños, la relación entre el ángulo  $\phi$  y el radio  $r$  es:

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) &= \frac{A}{2r} \\ \therefore A &= 2r \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \end{aligned}$$

Por lo que para el vector amplitud resultante  $A_{Rt} (= \Sigma A_n)$ , la relación será:

$$A_{Rt} = 2r \sin\left(\frac{n\phi}{2}\right)$$

Combinando las ecuaciones, eliminando  $r$ , se obtiene:

$$A_{Rt} = A \frac{\text{sen}\left(\frac{n\phi}{2}\right)}{\text{sen}\left(\frac{\phi}{2}\right)}$$

Cuando los vectores de amplitud regresen al punto de partida, entonces se completa el círculo y la amplitud resultante es cero, la primera vez que esto ocurre es cuando:

$$n\phi = 2\pi$$

Por consiguiente:

$$\phi = \frac{2\pi}{n}$$

sustituyendo en la ecuación de la amplitud resultante se obtiene:

$$A_{Rt} = A \frac{\text{sen}(\pi)}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{n}\right)}$$

Como  $\text{sen } \pi = 0$ , se obtiene que  $A_{Rt} = 0$

Cada vez que se completa el círculo, la amplitud resultante será cero, lo cual ocurre cuando:

$$n\phi = m 2\pi \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

Por otra parte, se tenía la relación:

$$\phi = \frac{2\pi d \text{ sen } \theta}{n\lambda}$$

por lo que la amplitud será cero cuando:

$$m \frac{2\pi}{n} = \frac{2\pi d \text{ sen } \theta}{n \lambda}$$

Es decir, cuando:

$$d \text{ sen } \theta = m \lambda \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

Esta última ecuación significa que para los ángulos que la satisfacen no va a existir perturbación ondulatoria; en esa dirección, la amplitud es cero. El número  $m$  representa el orden de esas regiones sin perturbar (franjas oscuras en el caso de la luz).

De esta forma, la primera dirección donde existe el movimiento ondulatorio es

$$d \text{ sen } \theta_1 = \lambda$$

Es decir:

$$\theta_1 = \text{sen}^{-1} \left( \frac{\lambda}{d} \right)$$

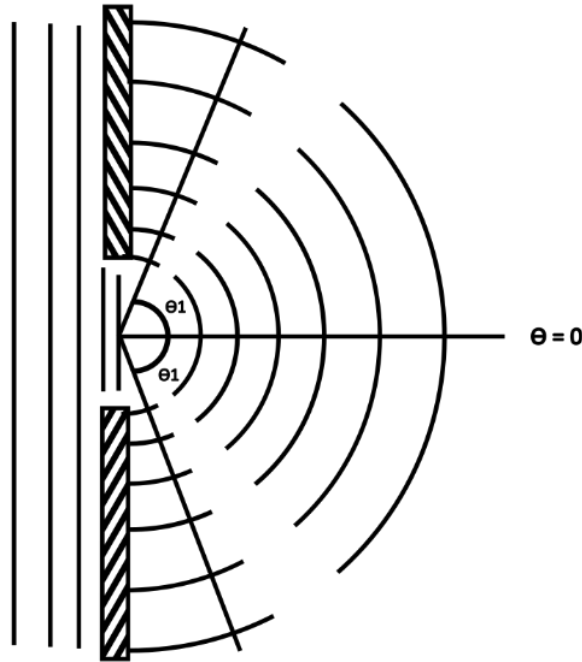


Figura A2.5. Difracción por una rendija (elaboración propia).

Además de la ecuación se prevé que cuando  $\theta = 0$ , entonces  $\phi = 0$ , por lo que no hay diferencias de fase y todas las ondas contribuyen, por lo que la amplitud alcanza un máximo (ver figura A2.5). Estos máximos se repetirán cuando:

$$n\phi = k \frac{\pi}{2} \quad k = 0, 1, 3, \dots$$

Si bien con  $k \neq 0$ , la amplitud alcanza distintos máximos, es posible ver que la intensidad decrece, como se muestra en la figura A2.6.

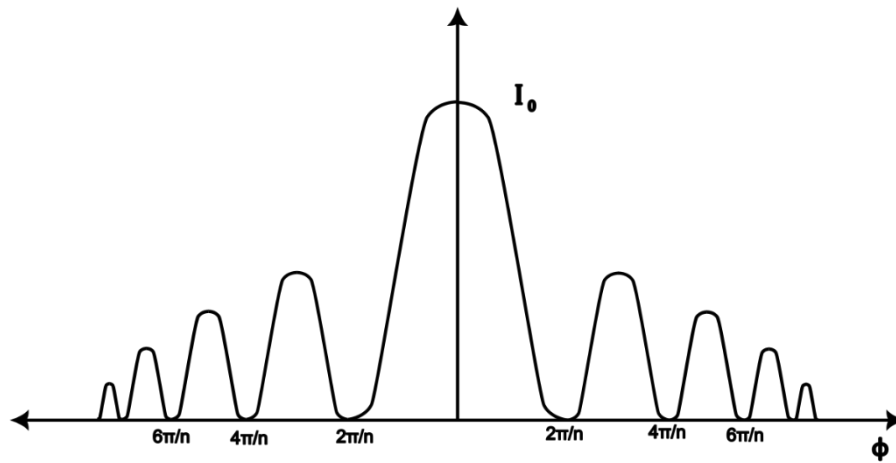


Figura A2.6. Función de intensidad con respecto a la fase (elaboración propia).

Finalmente, hay que hacer notar que el ángulo  $\theta$  para el cual ocurren los diferentes órdenes de difracción está limitado por la relación  $\frac{\lambda}{a}$ , por lo que para  $\frac{\lambda}{a} < 1$  sí se generarán diferentes interferencias, mientras que para  $\frac{\lambda}{a} \geq 1$  las ondas que emergen de la rendija se comportan como si fuesen generadas por una fuente puntual.

*Del metro al nanómetro:  
construcción de representaciones dimensionales  
en el alumnado de bachillerato*

la primera edición electrónica editada por el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM, se terminó el día [REDACTED] de mes [REDACTED] de 2024. En su composición se utilizó la familia tipográfica [REDACTED] de [REDACTED] puntos. El cuidado de la edición estuvo a cargo de XXXXXXXXXXXX.