

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE FÍSICA

F1-1202

LABORATORIO DE FÍSICA GENERAL II

EXPERIMENTO 15

ANÁLISIS DE FENÓMENOS ÓPTICOS: REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE
LA LUZ

PROFESORA:

JENNIFER ELIZONDO ZÚÑIGA

ESTUDIANTES:

JOSÉ JULIÁN CAMACHO HERNÁNDEZ
GABRIEL GONZÁLEZ RODRÍGUEZ
EMMANUEL NARANJO BLANCO

Agosto 2020

Resumen

Para este experimento se planteó como objetivo analizar el comportamiento de los fenómenos ópticos de reflexión y refracción de la luz. Para ello se hizo uso del ambiente de simulación de PhET Interactive Simulations para realizar una serie de mediciones con el fin de comprender el comportamiento de un haz de luz al incidirlo sobre tres tipos de prisma distintos (uno semicircular, otro cuadrado y otro trapezoidal). Para cada uno de estos prismas se determinó cómo se comportan los ángulo de reflexión y de refracción, y a partir de ello se lograron realizar una serie de análisis determinantes en el estudio de estos fenómenos ópticos.

Se llegó a la conclusión de que los ángulos de reflexión son iguales a los ángulos de incidencia, hecho que valida la ley de reflexión de la luz, además, se logró verificar la validez de la ley de refracción de la luz (también conocida como ley de Snell) al utilizarla para averiguar los índices de refracción de cada prisma. Por último, se identificó que los tres prismas utilizados en el experimento son del mismo material.

Índice

1. Introducción	3
2. Materiales y métodos	5
3. Resultados y discusión	7
3.1. Prisma semicircular	7
3.2. Prisma cuadrado	12
3.3. Prisma trapezoidal	14
3.4. Determinación de los índices de refracción	16
3.5. Análisis de resultados	17
4. Conclusiones	18
5. Apéndice	19
5.1. Cálculo de incertidumbres	19

1. Introducción

Los trabajos de James Clerk Maxwell (1873) y de Heinrich Hertz (1887), demostraron de forma concluyente que la luz es en verdad una onda electromagnética, es decir, una combinación de campo eléctricos y magnéticos variables en el tiempo. Maxwell predijo la existencia de ondas electromagnéticas y calculó su rapidez de propagación. Hertz utilizó este avance y experimentalmente concluyó esta parte de la naturaleza de la luz (Young y Freedman, 2013).

Sin importar cuál sea su fuente, la radiación electromagnética viaja en el vacío con la misma rapidez. La rapidez de la luz en el vacío es

$$c = 2,99792458 \times 10^8 m/s$$

que en general se aproxima a $3,00 \times 10^8 m/s$.

Desde el punto de vista ondulatorio, un rayo es una línea imaginaria a lo largo de la dirección de propagación de la onda. La rama de la óptica en la cual resulta adecuada la descripción de rayos se llama óptica geométrica.

Cuando una onda luminosa incide en una interfaz lisa que separa dos materiales transparentes, la onda en general es reflejada parcialmente y también refractada parcialmente hacia el segundo material. Las direcciones de los rayos incidente, reflejado y refractado en una interfaz lisa entre dos materiales ópticos se describen en términos de los ángulos que forman con la normal, que es una línea imaginaria perpendicular a la superficie en el punto de incidencia (Young y Freedman, 2013).

Existen diferentes relaciones matemáticas denominadas leyes de reflexión y refracción, que permiten representar estos fenómenos. La primera de estas leyes determina que:

Los rayos incidente, reflejado, refractado y la normal a la superficie, están en el mismo plano.

Además, define que el plano de los tres rayos es perpendicular al plano de la superficie de frontera entre los dos materiales. La segunda está relacionada con el fenómeno de reflexión.

La reflexión de la luz es el cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre en un mismo medio después de incidir sobre la superficie de un medio distinto. Se rige por la siguiente igualdad que se denomina la ley de la reflexión (Fernández, s.f.):

El ángulo de reflexión θ_{refl} es igual al ángulo de incidencia θ_i para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales.

$$\theta_i = \theta_{refl} \tag{1}$$

La refracción de la luz es el cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre tras pasar estos de un medio a otro en el que la luz se propaga con distinta velocidad. Se determina mediante la ley de Snell o ley de la refracción (Fernández, s.f.):

La razón de los senos de los ángulos θ_i y θ_{refr} , es igual al inverso de la razón de los dos índices de refracción n de los medios.

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_{refr}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Rightarrow n_1 \text{sen}\theta_i = n_2 \text{sen}\theta_{refr} \quad (2)$$

La ley anterior involucra los índices de refracción de los materiales o medios donde ocurre el fenómeno de refracción. Este se define como la razón entre la rapidez de la luz c en el vacío y la rapidez de la luz v en el material (Young y Freedman, 2013).

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

Esta relación siempre será mayor o igual que uno, debido a que la luz siempre viaja con más lentitud en un material que en el vacío.

En este experimento se realizarán mediciones de los ángulos de reflexión y refracción, con el fin de satisfacer el objetivo general de esta práctica: aplicar los principios de la óptica geométrica y comprobar la validez de las ecuaciones planteadas. Finalmente, como parte de los objetivos específicos del experimento, se intentará determinar el índice de refracción de los materiales que fueron utilizados en la simulación.

2. Materiales y métodos

Para el estudio de las propiedades ópticas de un material se utilizaron los materiales mostrados en la siguiente tabla.

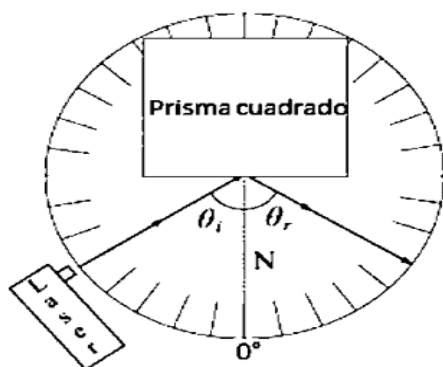
Cuadro 1: Equipo mínimo requerido para la realización del experimento.

Cantidad	Descripción
1	Equipo de óptica
1	Transportador
5	Diodo Laser

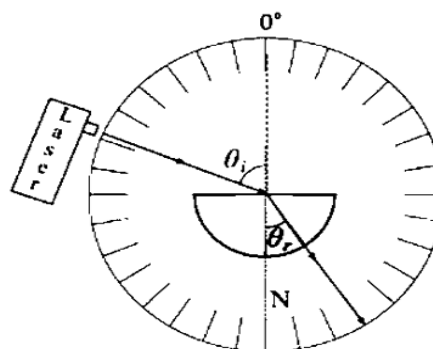
En este experimento se determinaron los datos de la siguiente forma:

Mediante la teoría de naturaleza y propagación de la luz, y óptica geométrica, se establecieron los datos necesarios que se deben obtener durante el experimento para describir correctamente los ángulos de reflexión y refracción de tres lentes distintos.

El experimento empieza con el montaje del equipo en el ambiente de simulación PhET (figura 1). Este consiste en tres esquemas, cada uno conformado por un prisma de material “personalizado máximo” sumergido en agua, cuyo índice de refracción es 1,33.



(a) Haz de luz incidente y reflejado sobre una superficie.



(b) Haz de luz incidente sobre un prisma semi-circular.

Figura 1: Montaje del equipo para el experimento.

En este experimento se utilizaron prismas de forma semicircular, cuadrada y trapezoidal. Además, se utilizó un láser con una longitud de onda de 680 nm como haz de luz incidente sobre cada superficie y con el transportador, cuya resolución es de $0,1^\circ$, se midió cada ángulo de reflexión y refracción.

Para las mediciones del prisma semicircular se colocó el láser con ángulos de incidencia de 60° , 50° , 40° , 30° , 20° , 10° y 0° . Para los otros dos prismas se realizó el mismo procedimiento para los ángulos de incidencia de 60° , 45° , 30° , 15° y 0° . Para finalizar, se realizaron los cálculos necesarios para evaluar dos aspectos muy relevantes de este tema. Primero, demostrar experimentalmente las leyes de la reflexión y refracción de la luz. Segundo, determinar el índice de refracción de uno o más lentes.

Se utilizó la ley de propagación de la incertidumbre para determinar las incertidumbres de los datos obtenidos. Para llevar control de los datos, estos fueron anotados en tablas y graficados en las figuras que se muestran más adelante. Además, se utilizaron las ecuaciones teóricas y los datos experimentales obtenidos para realizar los cálculos.

Es importante realizar la toma de datos y los procedimientos con mucha precaución y varias veces para así obtener resultados confiables y más precisos. Al ser un trabajo realizado bajo una simulación, las mediciones se realizaron una vez debido a que cada valor medido siempre es el mismo.

3. Resultados y discusión

3.1. Prisma semicircular

En la parte del experimento donde se utilizó el prisma semicircular, se realizaron las mediciones del ángulo de reflexión y refracción para ángulos de incidencia de 0° , 10° , 20° , 30° , 40° , 50° y 60° . Estos ángulos medidos se pueden consultar en el cuadro 2.

Cuadro 2: Ángulos de incidencia, reflexión y refracción del prisma semicircular.

Ángulo de incidencia ($\pm 1^\circ$)	Ángulo de reflexión ($\pm 1^\circ$)	Ángulo de refracción ($\pm 1^\circ$)
60	60	45
50	50	37
40	40	32
30	30	23
20	20	15
10	10	8
0	0	0

Los valores obtenidos para el ángulo de reflexión dieron un valor igual a su correspondiente ángulo de incidencia. Al graficar estos valores, presentes en el cuadro 2, se obtiene la gráfica lineal que se puede observar en la figura 2.

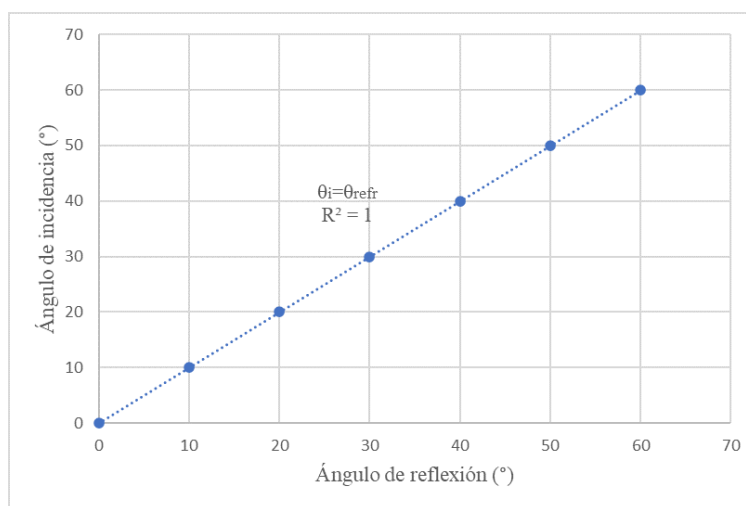


Figura 2: Gráfica de ángulo de incidencia en función de ángulo de reflexión del prisma semicircular.

A diferencia de los valores obtenidos para el ángulo de reflexión, los ángulos de refracción sí dieron un valor distinto a su correspondiente ángulo de incidencia. La curva que surge al graficar estos datos, el ángulo de incidencia en función del ángulo de refracción, se pueden observar en la figura 3.

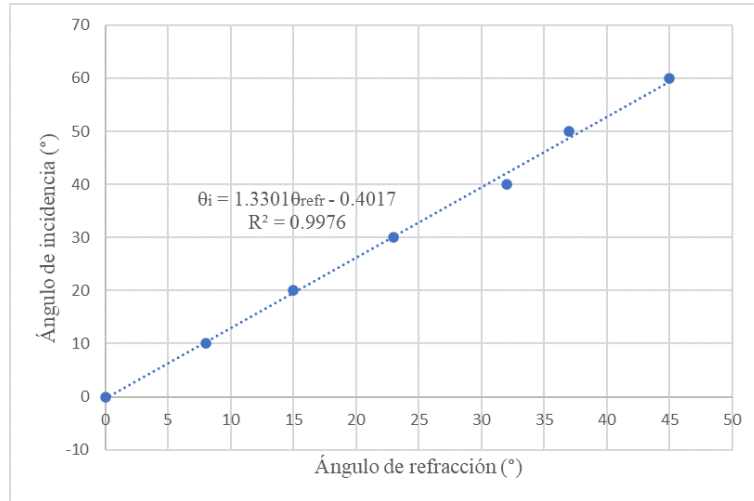
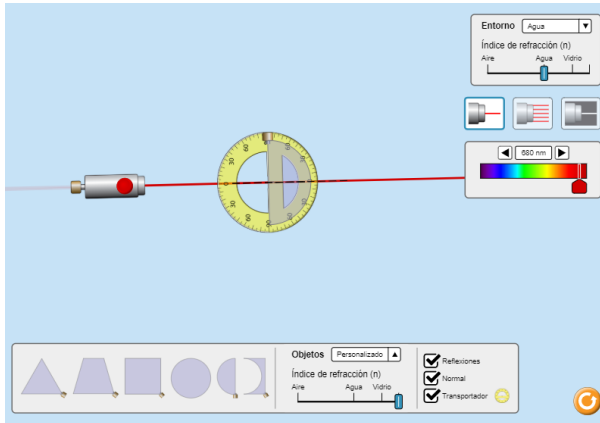
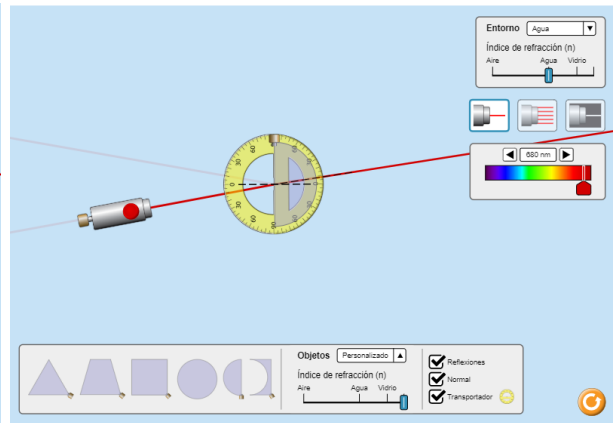


Figura 3: Gráfica de ángulo de incidencia en función de ángulo de refracción del prisma semicircular.

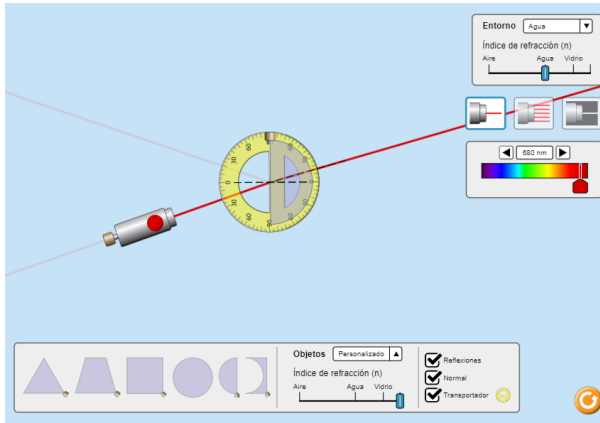
En las figuras 4 y 5 se evidencia la toma de datos realizada para averiguar cada ángulo de reflexión y refracción indicados en el cuadro 2.



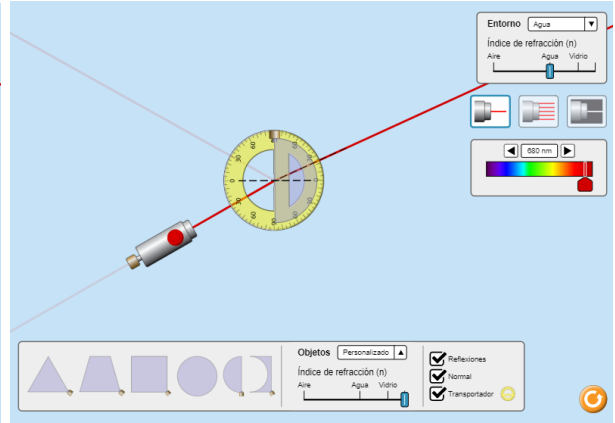
(a) Ángulo de incidencia de 0° .



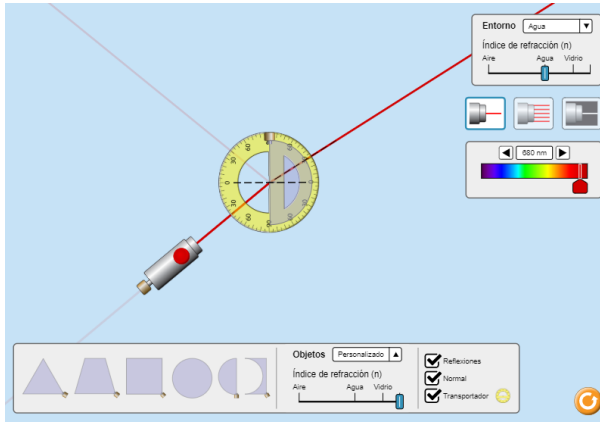
(b) Ángulo de incidencia de 10° .



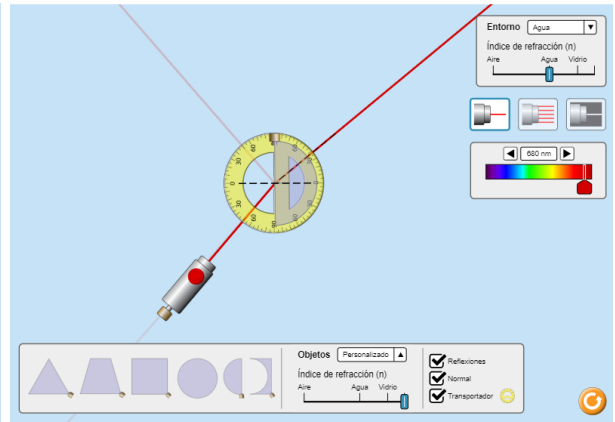
(c) Ángulo de incidencia de 20° .



(d) Ángulo de incidencia de 30° .



(e) Ángulo de incidencia de 40° .



(f) Ángulo de incidencia de 50° .

Figura 4: Capturas de pantalla para distintos ángulos de incidencia para el prisma semicircular.

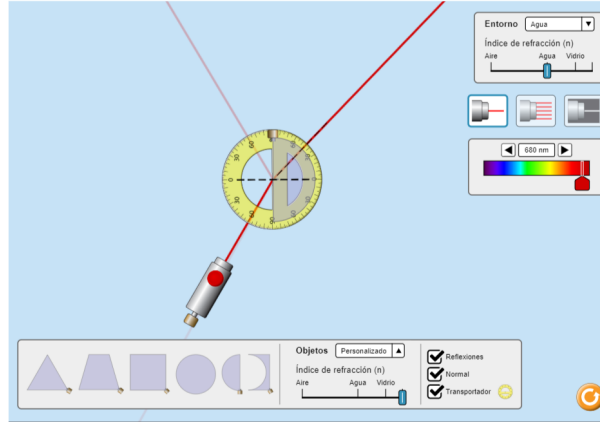


Figura 5: Ángulo de incidencia de 60° . Capturas de pantalla para distintos ángulos de incidencia para el prisma semicircular (Continuación).

En el cuadro 3 se muestran los datos obtenidos del cambio de variable a partir de los valores del ángulo de incidencia (θ_i) y de refracción (θ_{refr}), ambos en grados, del cuadro 2. Además, al graficar estos datos obtenidos del cambio de variable, tal y como se muestra en la figura 6, se obtiene la forma linealizada de la curva presente en la figura 3. En la sección 3.4 se explica más a detalle cómo se realizó este cambio de variable.

Cuadro 3: Cambio de variable para el prisma semicircular.

Sin cambio de variable		Con cambio de variable	
θ_1	θ_2	$y = \text{sen}\theta_i$	$x = \text{sen}\theta_{refr}$
60	45	0.866025404	0.707106781
50	37	0.766044443	0.601815023
40	32	0.64278761	0.529919264
30	23	0.5	0.390731128
20	15	0.342020143	0.258819045
10	8	0.173648178	0.139173101
0	0	0	0

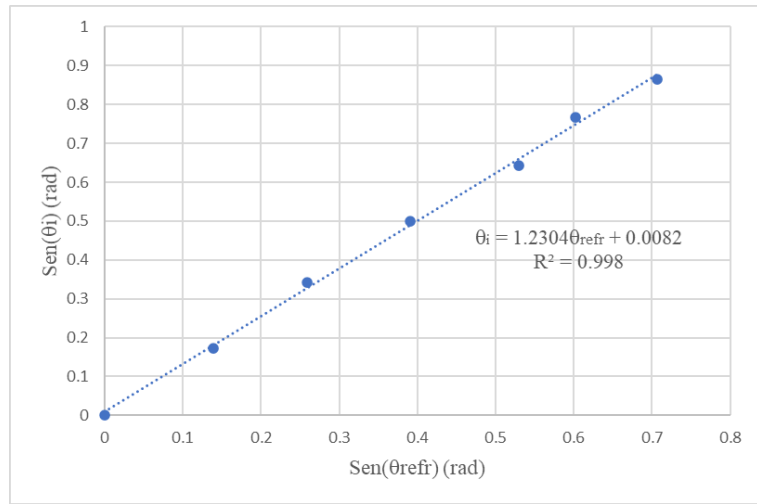


Figura 6: Gráfica linealizada del ángulo de incidencia en función de ángulo de refracción del prisma semicircular.

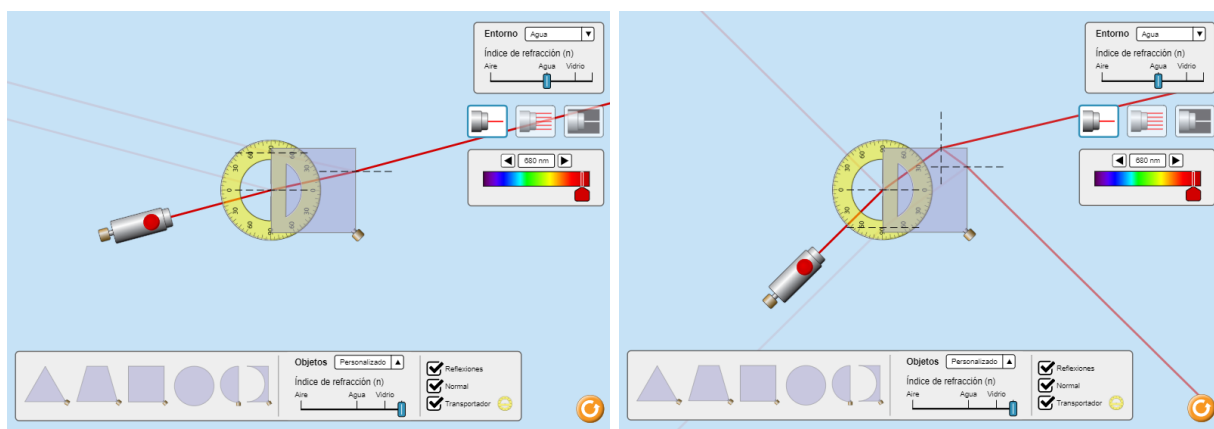
3.2. Prisma cuadrado

En el cuadro 4 se muestran los datos obtenidos para el ángulo de reflexión y refracción según el ángulo de incidencia para el prisma cuadrado utilizado en el experimento.

Cuadro 4: Ángulos de incidencia, reflexión y refracción del prisma cuadrado.

Ángulo de incidencia (± 1)°	Ángulo de reflexión (± 1)°	Ángulo de refracción (± 1)°
60	60	45
45	45	36
30	30	24
15	15	12
0	0	0

En la figura 7 se evidencia la toma de datos para los ángulos de incidencia de 15° y 45°.



(a) Ángulo de incidencia de 15°.

(b) Ángulo de incidencia de 45°.

Figura 7: Capturas de pantalla para distintos ángulos de incidencia para el prisma cuadrado.

Para los datos de ángulo de incidencia y de refracción del cuadro 4 también se realizó un cambio de variable. Los datos obtenidos de este cambio se encuentran en el cuadro 5 y su graficación se muestra en la figura 8, donde se logra ver la curva linealizada de los datos. En la sección 3.4 se explica un poco más cómo se realizó este cambio de variable.

Cuadro 5: Cambio de variable para el prisma cuadrado.

Sin cambio de variable		Con cambio de variable	
θ_i	θ_{refr}	$y = \text{sen}\theta_i$	$x = \text{sen}\theta_{refr}$
60	45	0.866025404	0.707106781
45	36	0.707106781	0.587785252
30	24	0.5	0.406736643
15	12	0.258819045	0.207911691
0	0	0	0

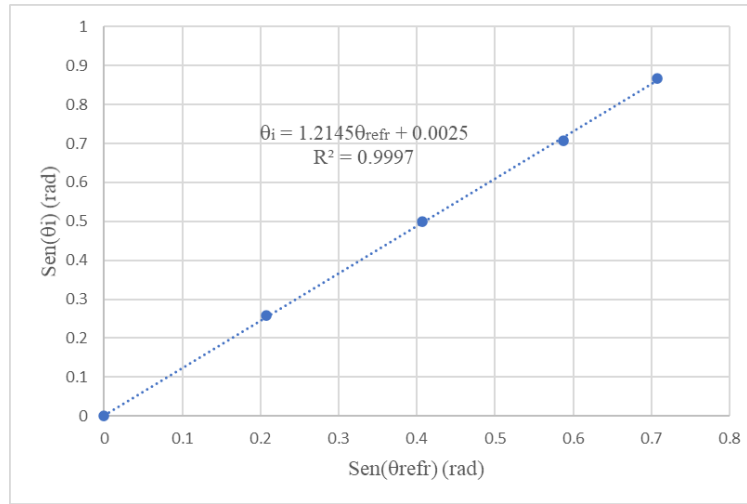


Figura 8: Gráfica linealizada del ángulo de incidencia en función de ángulo de refracción del prisma cuadrado.

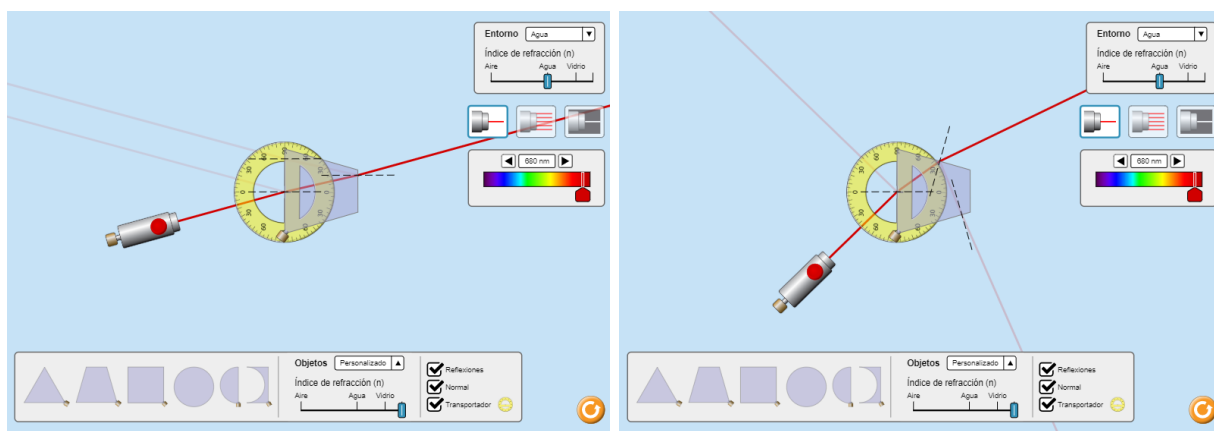
3.3. Prisma trapezoidal

En el cuadro 6 se muestran los datos obtenidos para el ángulo de reflexión y refracción según el ángulo de incidencia para el prisma trapezoidal utilizado en el experimento.

Cuadro 6: Ángulos de incidencia, reflexión y refracción del prisma trapezoidal.

Ángulo de incidencia (± 1)°	Ángulo de reflexión (± 1)°	Ángulo de refracción (± 1)°
60	60	46
45	45	36
30	30	25
15	15	13
0	0	0

En la figura 9 se evidencia la toma de datos para los ángulos de incidencia de 15° y 45°.



(a) Ángulo de incidencia de 15°.

(b) Ángulo de incidencia de 45°.

Figura 9: Capturas de pantalla para distintos ángulos de incidencia para el prisma trapezoidal.

Para los datos de ángulo de incidencia y de refracción del cuadro 6 también se realizó un cambio de variable. En el cuadro 7 se encuentran los valores resultantes de este cambio, además, en la figura 10 se muestra la gráfica de ellos, en donde se logra ver la curva linealizada de los datos. En la sección 3.4 se explica más cómo se realizó este cambio de variable.

Cuadro 7: Cambio de variable para el prisma trapezoidal.

Sin cambio de variable		Con cambio de variable	
θ_i	θ_{refr}	$y = \text{sen}\theta_i$	$x = \text{sen}\theta_{refr}$
60	46	0.866025404	0.71933981
45	36	0.707106781	0.587785252
30	25	0.5	0.422618262
15	13	0.258819045	0.224951054
0	0	0	0

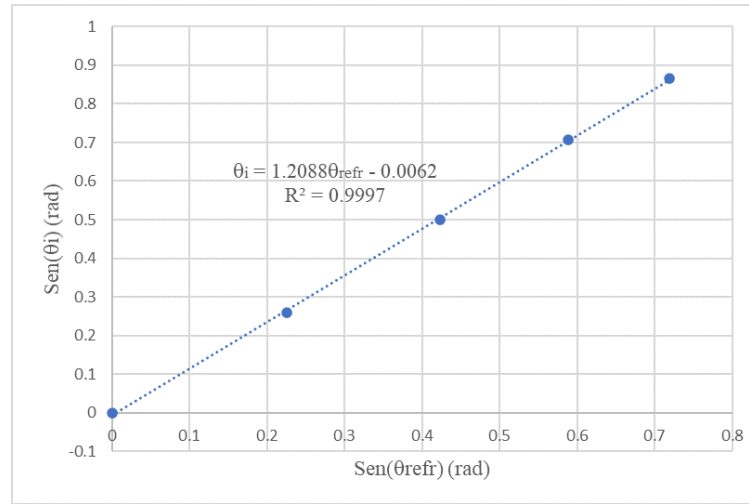


Figura 10: Gráfica linealizada del ángulo de incidencia en función de ángulo de refracción del prisma trapezoidal.

3.4. Determinación de los índices de refracción

Del cambio de variable realizado en el experimento para linealizar las gráficas del ángulo de incidencia en función del ángulo de refracción se obtuvo la expresión que se muestra en la ecuación 4 de $\text{sen}\theta_i$ en función de $\text{sen}\theta_{refr}$.

$$\text{sen}\theta_i = \frac{n_2}{n_1} \cdot \text{sen}\theta_{refr} \quad (4)$$

Este cambio de variable se realizó a partir de la ley de Snell, que se conoce tal y como se muestra en la ecuación 2. De esta se tomó a $\text{sen}\theta_i$ como y y a $\text{sen}\theta_{refr}$ como x (los ángulos fueron convertidos a radianes para una mejor visualización de las gráficas). Además, $\frac{n_2}{n_1}$ corresponde a la pendiente m .

De las ecuaciones 4 y 2 se entiende por n_1 el índice de refracción del medio y por n_2 el índice de refracción del prisma, además, θ_i se refiere al ángulo de incidencia y θ_{refr} al ángulo de refracción. Conociendo esto, se pudo determinar de forma sencilla el índice de refracción de los prismas para cada caso. Al conocer la pendiente de cada curva linealizada, la cual se sabe que corresponde a $\frac{n_2}{n_1}$, simplemente fue de multiplicar este valor por n_1 , que ya se conoce (para el agua, entorno en el que se trabajó en este experimento, es de 1,33). Esto se hizo de la forma que se muestra en la siguiente ecuación:

$$n_2 = m \cdot n_1$$

$$n_2 = m \cdot 1,33$$

En el cuadro 8 se muestran los valores del índice de refracción calculados para cada prisma (semicircular, cuadrado y trapezoidal) junto con su incertidumbre. En el anexo 5.1 se puede consultar el procedimiento con el que se determinaron dichas incertidumbres.

Cuadro 8: Resultados del cálculo de los índices de refracción para cada uno de los prismas utilizados.

Prisma	Índice de refracción del material
Semicircular	$(1,769 \pm 0,066)$
Cuadrado	$(1,615 \pm 0,032)$
Trapezio	$(1,608 \pm 0,030)$

3.5. Análisis de resultados

La resolución del transportador que se utilizó es de 1° . Para realizar un experimento con mayor exactitud, resultaría necesario el uso de un instrumento de medida con una menor resolución. Esto implicaría más divisiones entre cada unidad, por lo que se lograría verificar de mejor manera el ángulo que se mide. Esta resolución pudo ser un factor que afectó el resultado de los índices de refracción obtenidos experimentalmente, ya que al realizar la simulación y hacer la toma de datos, en ocasiones el rayo de luz no indicaba un ángulo exacto en específico, sino que quedaba entre dos marcas, por lo que se tuvo que realizar una estimación.

Para mejorar las mediciones, además de contar con un transportador de menor resolución, sería necesario un método para acercar la pantalla del simulador lo suficiente para ver claramente el ángulo que se está midiendo.

Adicionalmente, es importante alinear de manera adecuada el transportador con los prismas, de tal forma que la normal coincida con el ángulo nulo. De igual manera, tener el cuidado de hacer coincidir el láser con el centro del transportador. Es posible que una óptima colocación de los instrumentos pueda implicar en una mejoría en las mediciones en este experimento.

4. Conclusiones

1. Al realizar las mediciones con una longitud de onda de 680 nm y hacer la toma de datos, se logró verificar que los ángulos de incidencia son iguales a los ángulos de reflexión, por lo que se logró comprobar la validez de la ley de la reflexión de la luz.
2. Se logró aplicar la ley de la refracción de la luz o ley de Snell para determinar experimentalmente el valor de índice de refracción del material incógnito; al medir los valores de los ángulos de incidencia y refracción, y conociendo el índice de refracción de uno de los medios, el agua ($n = 1,33$).
3. A partir de la simulación realizada, para el índice de refracción se logró obtener un valor experimental de $(1,769 \pm 0,066)$ para el prisma semicircular.
4. Para los prismas cuadrado y trapezoidal se obtuvieron valores de índice de refracción similares, de $(1,615 \pm 0,032)$ y $(1,608 \pm 0,030)$ respectivamente.
5. Según los índices de refracción obtenidos, se determinó que los tres prismas utilizados en el experimento son del mismo material.

5. Apéndice

5.1. Cálculo de incertidumbres

Para la determinación de las incertidumbres para los índices de refracción de los prismas en el experimento, mostrados en el Cuadro 8, se aplicó la ley de propagación de incertidumbres. En este caso la incertidumbre es provocada únicamente por el valor de la pendiente. Por lo que el cálculo realizado, considerando que $n_2 = m \cdot n_1$, se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} I_{n_2} &= \sqrt{\left(\frac{\delta n_2}{\delta m}\right)^2 (I_m)^2} \\ &= \left(\frac{\delta}{\delta m}(m \cdot n_1)\right)(2 \cdot DesvEst_m) \\ &= (n_1)(2 \cdot DesvEst_m) \end{aligned}$$

Acá, m corresponde a la pendiente, n_1 al índice de refracción del entorno (como en este caso el entorno es el agua, entonces es de 1,33) y n_2 se refiere al índice de refracción del prisma.

En el cuadro 9 se muestra la matriz de estimación lineal para el prisma semicircular. De esta, el valor en la fila dos columna uno corresponde a la desviación estándar de la pendiente m (igual para las matrices del cuadro 10 y cuadro 11). Entonces, para esta matriz, 0.24761533 es la desviación estándar de m y al multiplicar este valor por 2 se obtuvo I_m (incertidumbre de m). Mismo análisis se hizo para el caso del prisma cuadrado y trapezoidal, sus matrices de estimación lineal se encuentran en los cuadros 10 y 11, respectivamente.

Cuadro 9: Matriz de estimación lineal para el prisma semicircular.

1.230445206	0.008207404
0.024761533	0.011002367
0.997979206	0.015576634
2469.275232	5
0.59912404	0.001213158

Cuadro 10: Matriz de estimación lineal para el prisma cuadrado.

1.214548838	0.002544239
0.012042766	0.005529593
0.99970514	0.006864214
10171.32361	3
0.479246638	0.000141352

Cuadro 11: Matriz de estimación lineal para el prisma trapezoidal.

1.208819168	-0.006184158
0.011172142	0.005221469
0.999743811	0.006398277
11707.11283	3
0.479265176	0.000122814

Referencias

- Fernández, José L. *Reflexión y Refracción de la Luz*. URL: <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-luz>. (accessed: 02.08.2020).
- Young, Hugh D y Roger A Sears Freedman (2013). *Zemansky Física universitaria con física moderna. Vol. 2. Décimo tercera edición Ed.*