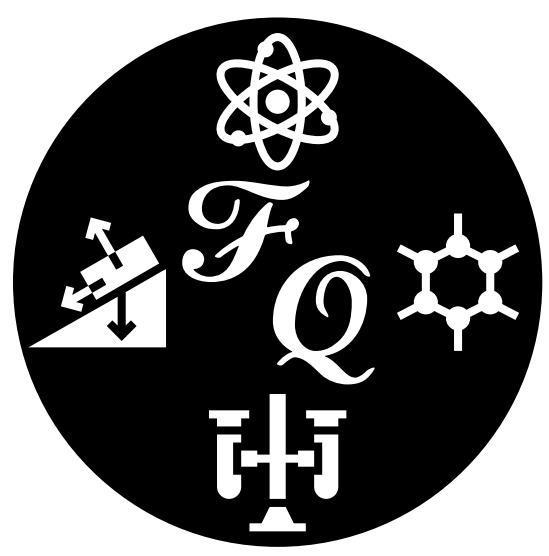




ÓPTICA GEOMÉTRICA

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa

El objetivo fundamental de la **óptica geométrica** es determinar la trayectoria que sigue la luz cuando se propaga por diferentes medios y, al revés, cómo deben disponerse distintos medios (lentes) para conseguir que la propagación de la luz se ajuste a ciertas trayectorias. La óptica geométrica es una aproximación que permite hacer un **tratamiento puramente geométrico** simplificando notablemente el estudio de las trayectorias que sigue la luz. ¿Cuándo puede aplicarse? Cuando la luz se propaga con una longitud de onda λ mucho menor que el tamaño de los objetos con los que interactúa (en este caso podemos despreciar su carácter ondulatorio).

La óptica geométrica se basa en estos **conceptos físicos**:

- La luz se representa mediante el **rayo luminoso**. Si un punto emisor se coloca ante una pantalla con un orificio se forma un cono de luz denominado haz. El rayo es una abstracción en la que las dimensiones del orificio tienden a cero. No tiene realidad física.
- La luz se propaga en línea recta en los distintos medios.
- En su propagación, la luz cumple las leyes de la reflexión, refracción, el principio de Fermat y el principio de reversibilidad.

Principio de Fermat

Dicho principio afirma:

“La trayectoria real que sigue la luz entre dos puntos es aquella que se recorre en un tiempo mínimo.”

Si tenemos varias capas paralelas con distintos índices n_i y en cada una la luz se propaga a v_i , el tiempo que tarda en atravesarlas:

$$t = \sum_i \frac{l_i}{v_i} = \frac{1}{c} \sum_i l_i n_i = \frac{L}{c}, \quad \text{con } L = \sum_i l_i n_i \text{ (camino óptico)}$$

Si el medio no fuera homogéneo, los sumatorios se reemplazarían por integrales. A la vista de lo anterior, puede reformularse el principio de Fermat:

“El camino seguido por la luz entre dos puntos es aquel en el que el camino óptico es menor.”

El **principio de reversibilidad** afirma que el camino seguido por la luz es reversible (si existe $A \rightarrow B$, también existe $B \rightarrow A$).

Conceptos básicos en óptica geométrica

Antes de aprender a trazar los rayos y las trayectorias seguidas por la luz y estudiar las imágenes que forma, es imprescindible definir los siguientes **conceptos**:

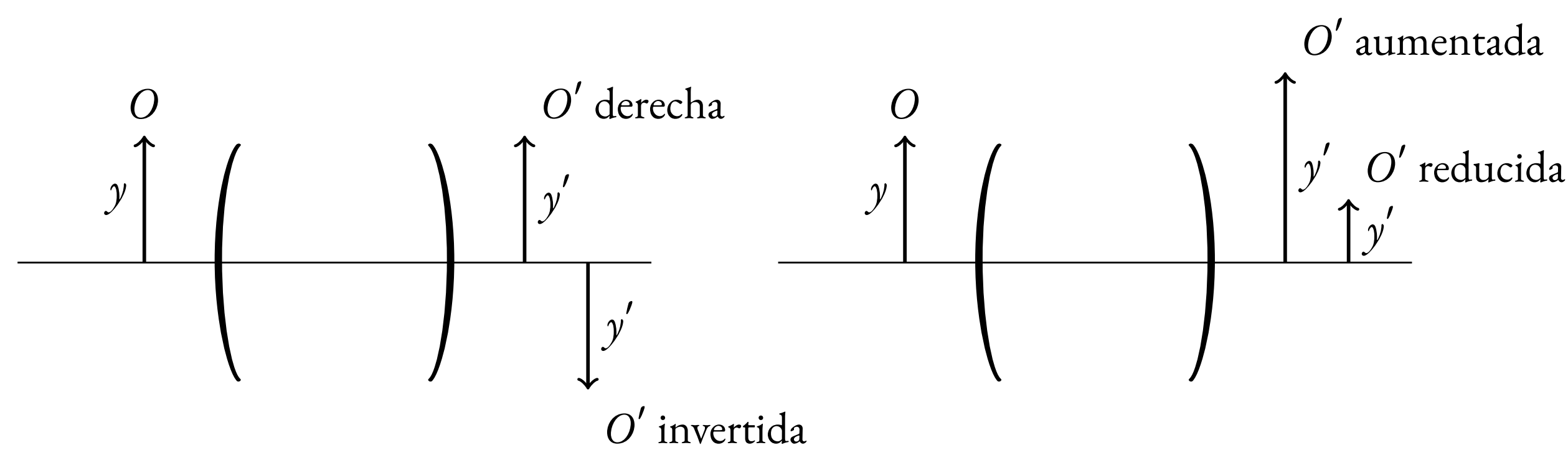
Sistema óptico Está formado por el eje óptico y las diferentes superficies centradas en él.

Objeto O Fuente de la que proceden los rayos de luz que atraviesan el sistema y dan lugar a la imagen O' .

Imagen O' Pueden darse dos casos:

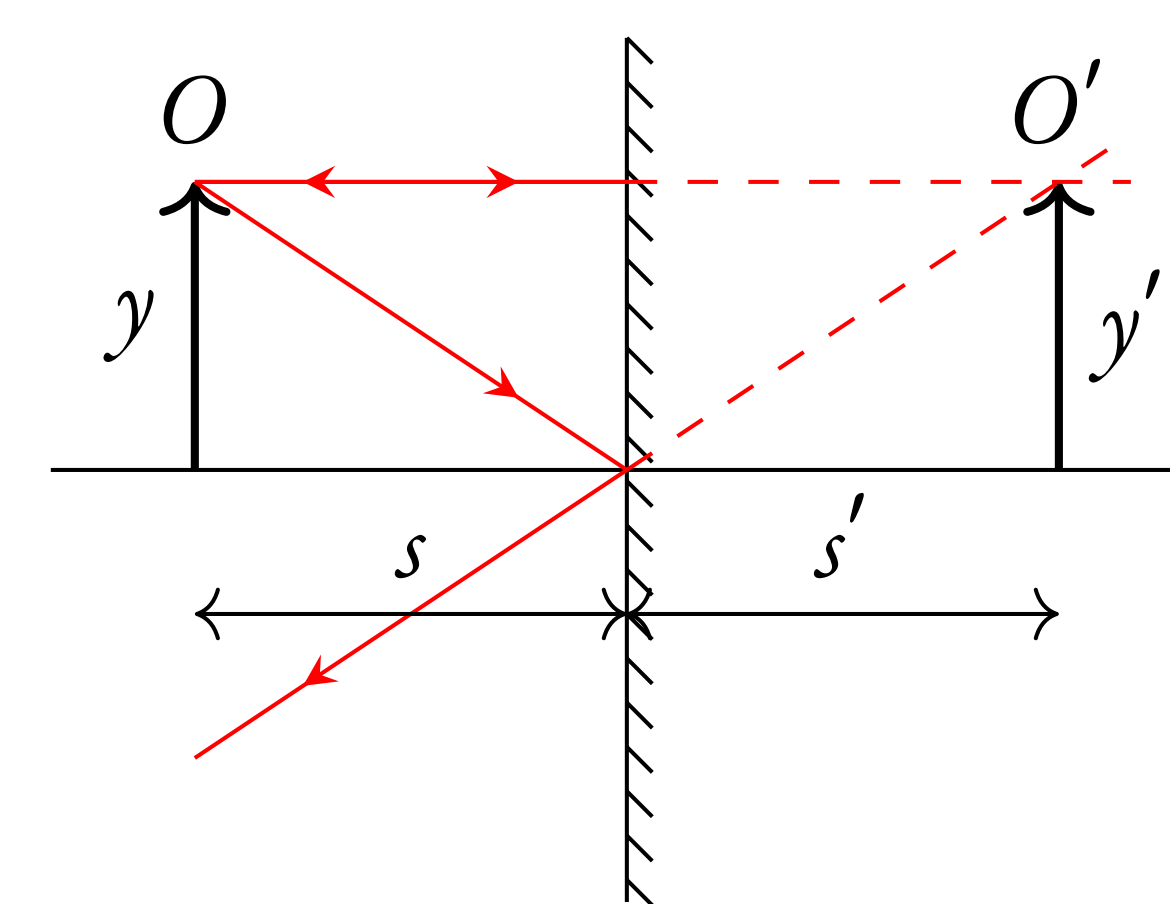
- Imagen real: los rayos a la salida del sistema convergen en un punto.
- Imagen virtual: los rayos a la salida del sistema divergen. Sus prolongaciones sí se cortan y dan lugar a O' .

Las imágenes, además de reales y virtuales, pueden ser derechas/invertidas o aumentadas/reducidas:



Formación de imágenes en espejos

Espejo plano



$$\begin{matrix} y = y' \\ s = s' \end{matrix}$$

y : altura del objeto

y' : altura de la imagen

s : distancia del objeto al espejo

s' : distancia de la imagen al espejo

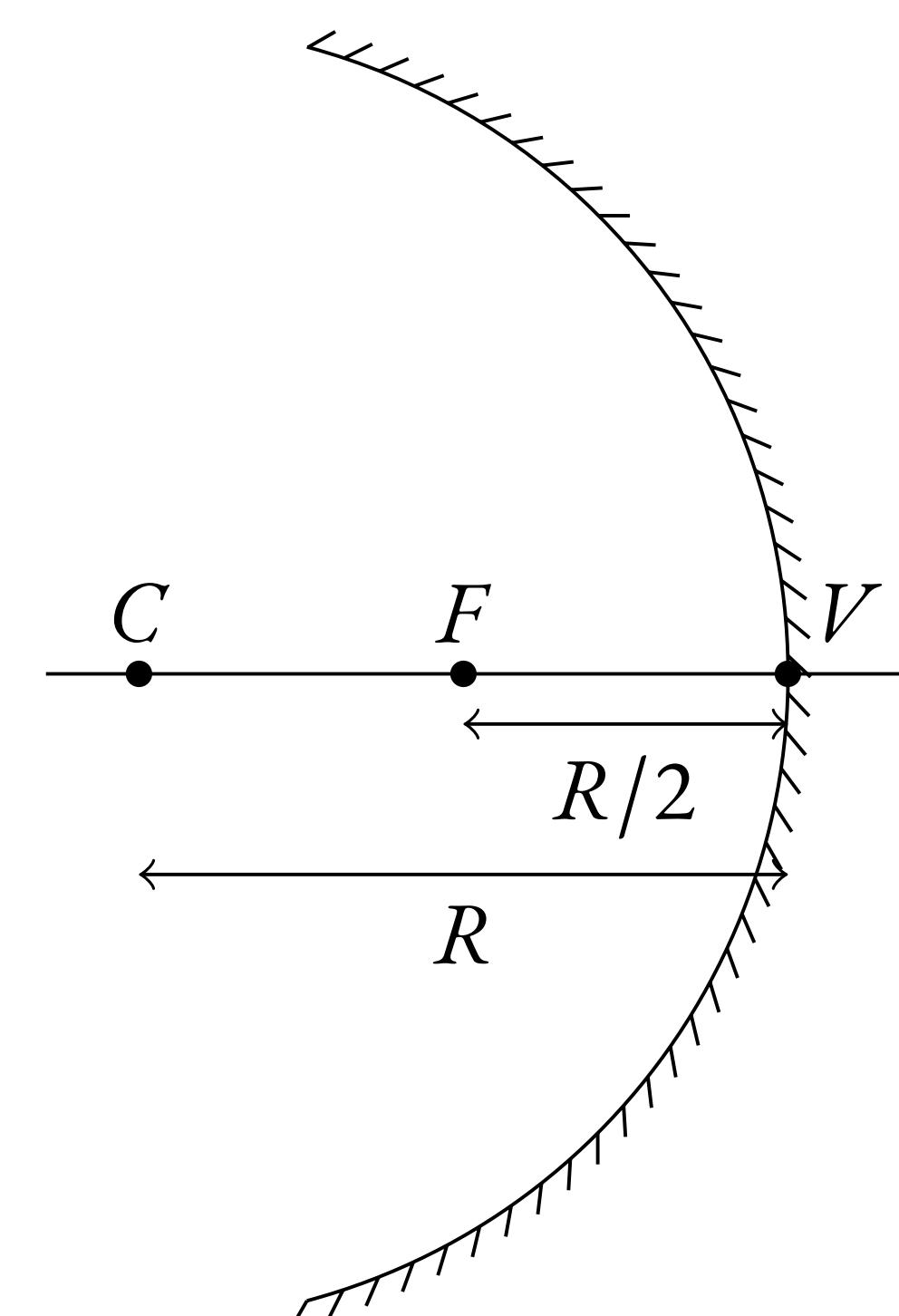
Trazado de rayos

- Rayo paralelo al eje: no se desvía.
- Rayo que incide en el centro del espejo ($\hat{i} = \hat{r}$)

Los rayos divergen. Para obtener la imagen debemos considerar sus prolongaciones. Por lo tanto, la imagen es virtual. Además, de acuerdo a la figura, será derecha y del mismo tamaño.

Espejo esférico

Antes de analizar la imagen que se forma, conozcamos los **ELEMENTOS BÁSICOS** de un espejo esférico:



$V \equiv$ **vértice** Es el punto de intersección con el eje. Se toma como origen.

$C \equiv$ **centro de curvatura** Es el centro geométrico del espejo y, por lo tanto, está a una distancia R del vértice.

$R \equiv$ **radio** Distancia entre el vértice y el centro de curvatura.

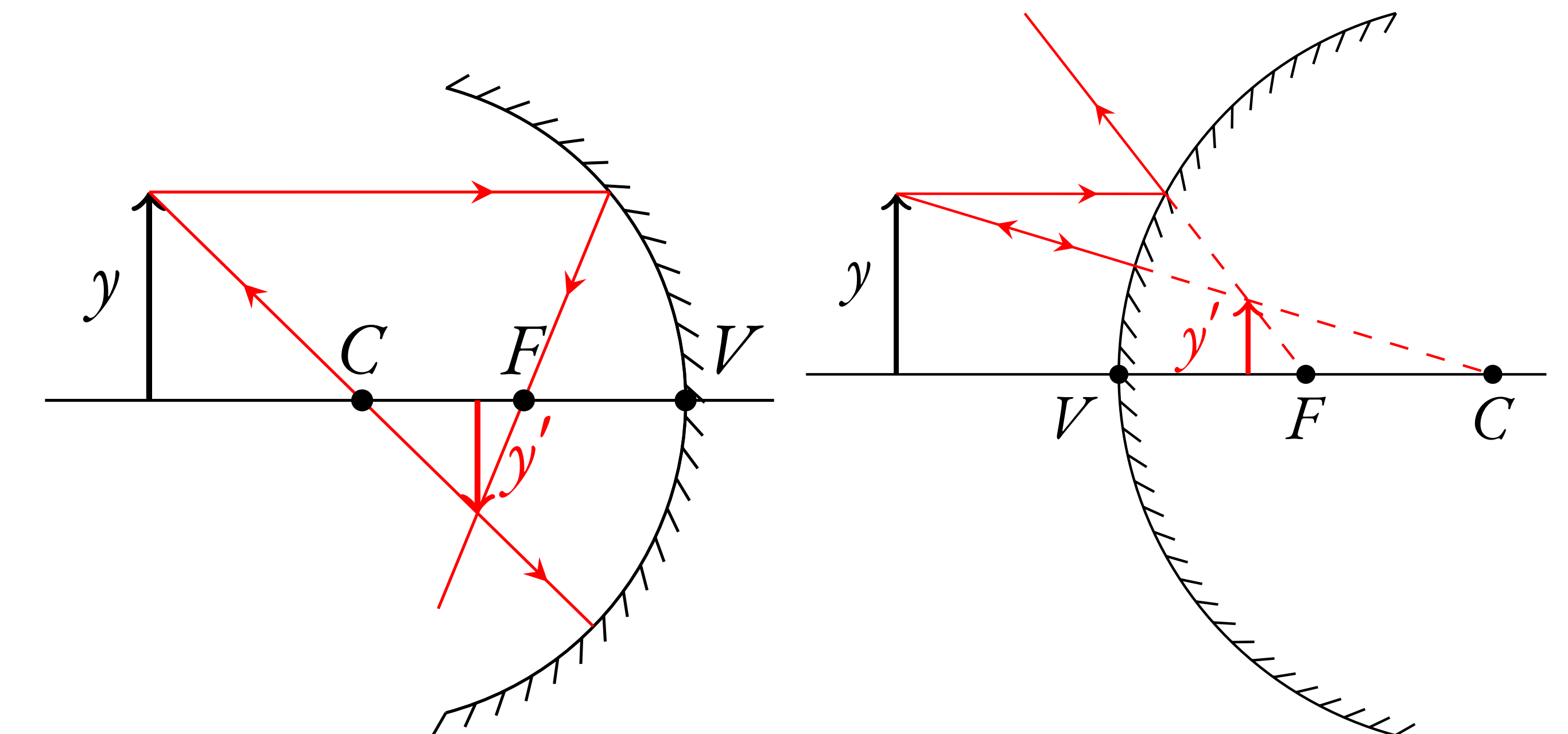
$F \equiv$ **foco** Es el punto situado a $R/2$ del vértice, donde convergen los rayos paralelos al eje óptico después de reflejarse en el espejo.

Para el **TRAZADO DE RAYOS** debe tenerse en cuenta:

- Los rayos que pasan por C no cambian su dirección.
- Los rayos paralelos al eje (vienen del infinito) pasan por F .
- Reversibilidad: rayos que pasan por F salen paralelos al eje.

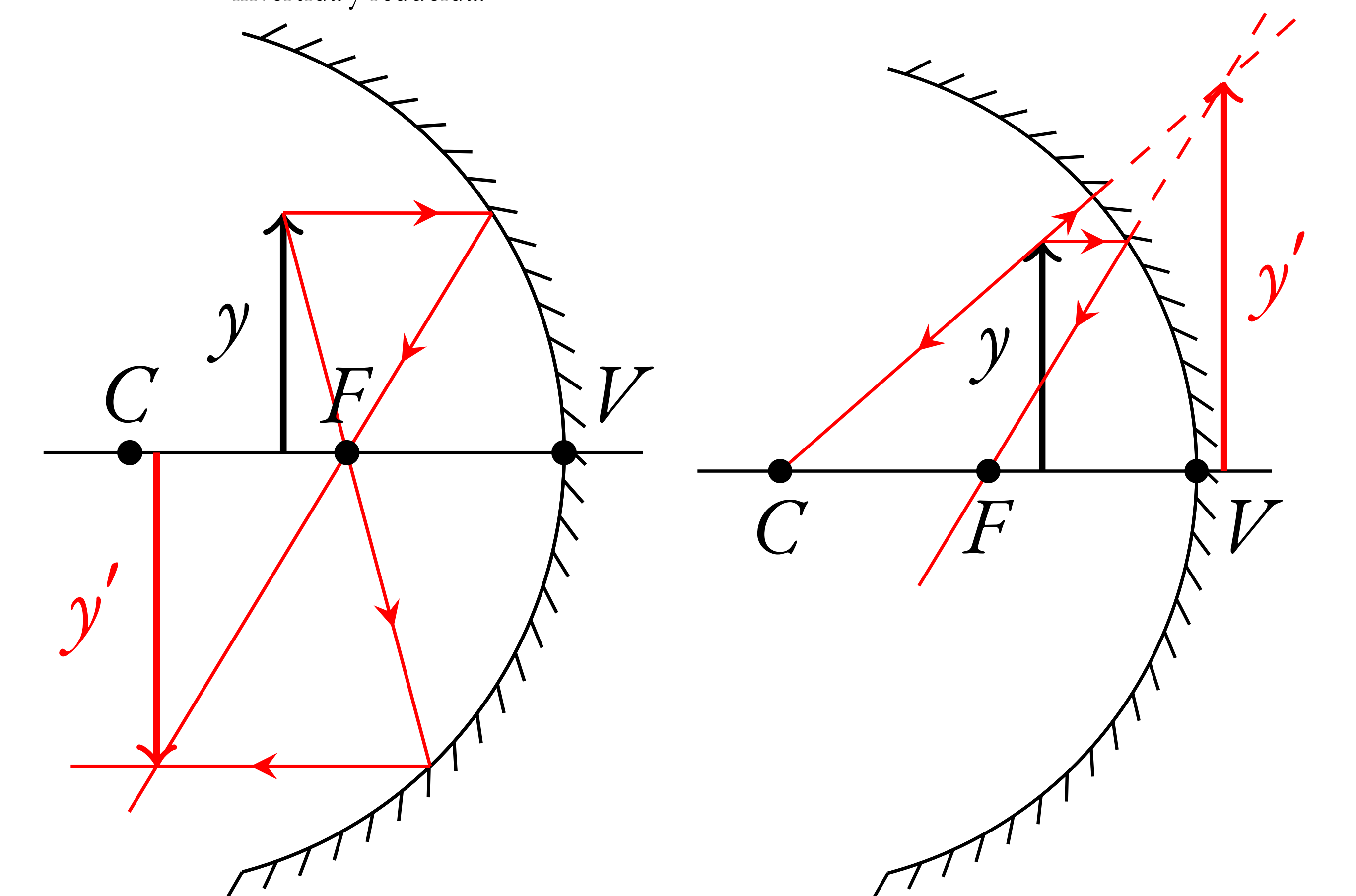
Es un **ESPEJO CÓNCAVO**, dependiendo de dónde se coloque el objeto, obtenemos diferentes imágenes. En un **ESPEJO CONVEXO**, la imagen siempre es virtual, derecha y reducida.

Espejo esférico (cont.)



Objeto alejado (a la izquierda de C). Imagen real, invertida y reducida.

Imagen virtual, derecha y reducida.



Objeto entre C y F . Imagen real, invertida y aumentada.

Objeto cercano (entre F y V). Imagen virtual, derecha y aumentada.

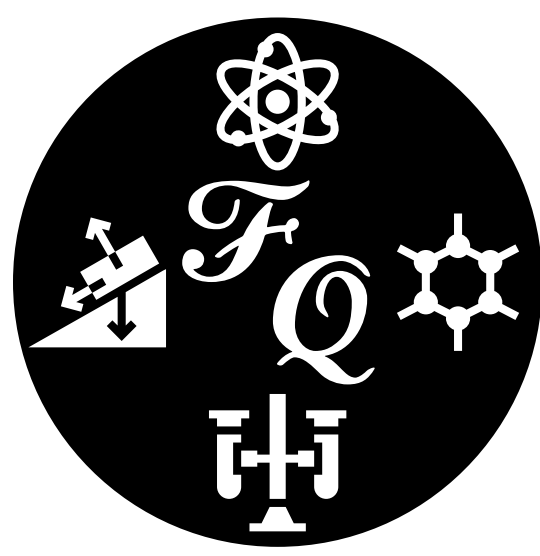
Resolución numérica También puede interesarnos saber numéricamente dónde está y cuál es su tamaño. Para eso se emplean las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f},$$

donde s es la posición del objeto, s' la posición de la imagen y f es la distancia focal.

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s},$$

siendo m (también denotado por β) el **AUMENTO LATERAL**, con y' la altura de la imagen y y la altura del objeto.



ÓPTICA GEOMÉTRICA

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



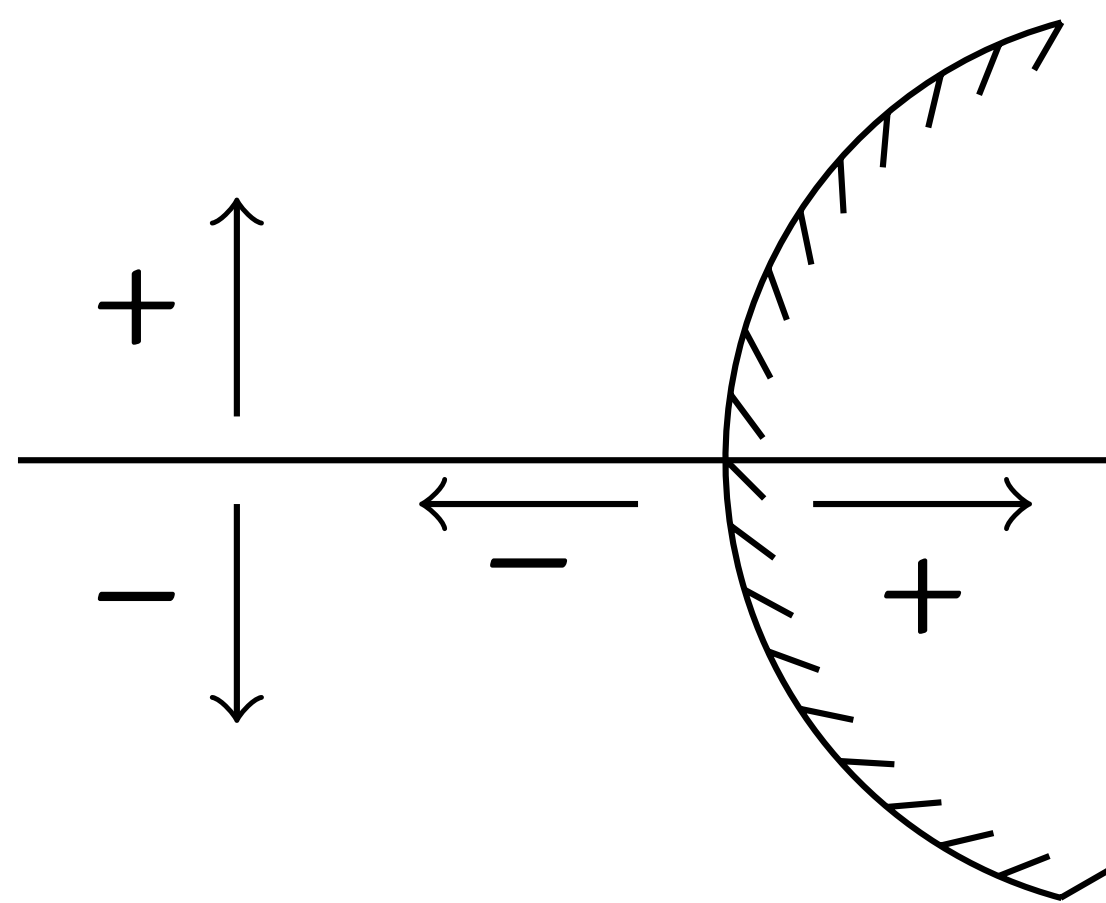
Espejo esférico (cont.)

m nos proporciona mucha información sobre la imagen:

$$\text{SIGNO: } \begin{cases} m > 0 & \text{imagen derecha} \\ m < 0 & \text{imagen invertida} \end{cases}$$
$$\text{VALOR: } \begin{cases} m > 1 & \text{imagen aumentada} \\ m = 1 & \text{imagen del mismo tamaño} \\ m < 1 & \text{imagen reducida} \end{cases}$$

Criterio de signos Consideraremos el origen de coordenadas el punto de intersección del espejo con el eje óptico (vértice):

- Posiciones negativas a la izquierda.
- Posiciones positivas a la derecha.
- Alturas negativas por debajo del eje.
- Alturas positivas por encima del eje.

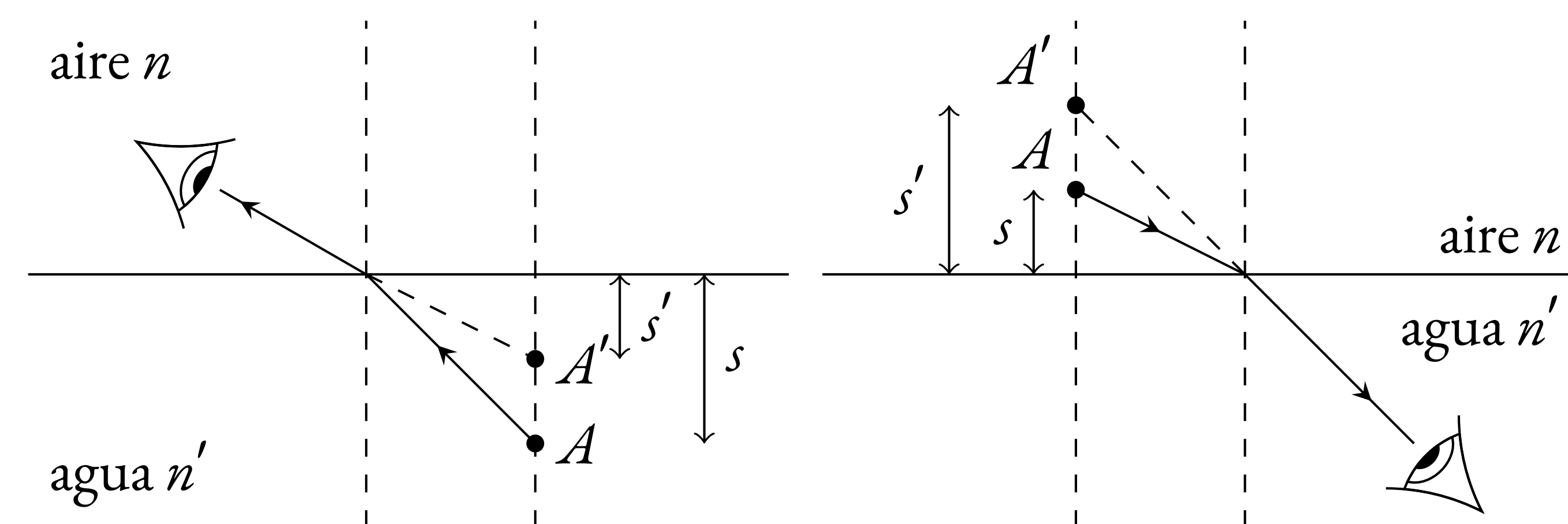


Formación de imágenes en dioptrios

Se denomina dioptrio a cualquier superficie que separa dos medios con distintos índice de refracción. Además de los dioptrios planos, también son muy habituales los esféricos porque su fabricación es más sencilla. Veamos cómo se forman las imágenes en este tipo de dioptrios.

Dioptrio plano

Un ejemplo de dioptrio plano podría ser la superficie de separación entre el aire y el agua. Los dioptrios planos, al igual que sucedía con los espejos planos, no tienen foco porque los rayos que inciden paralelos al eje, o equivalentemente, perpendiculares al dioptrio plano, no modifican su dirección. El eje óptico coincide con la normal. En el trazado de rayos se tiene en cuenta únicamente la refracción:



Supongamos que el objeto se encuentra en el agua (punto A). Nosotros lo vemos a menor profundidad (observamos la prolongación del rayo).

Si el objeto se encuentra en el aire (punto A) y lo observamos desde el agua sucede lo contrario. Nos parece que se encuentra a mayor altura.

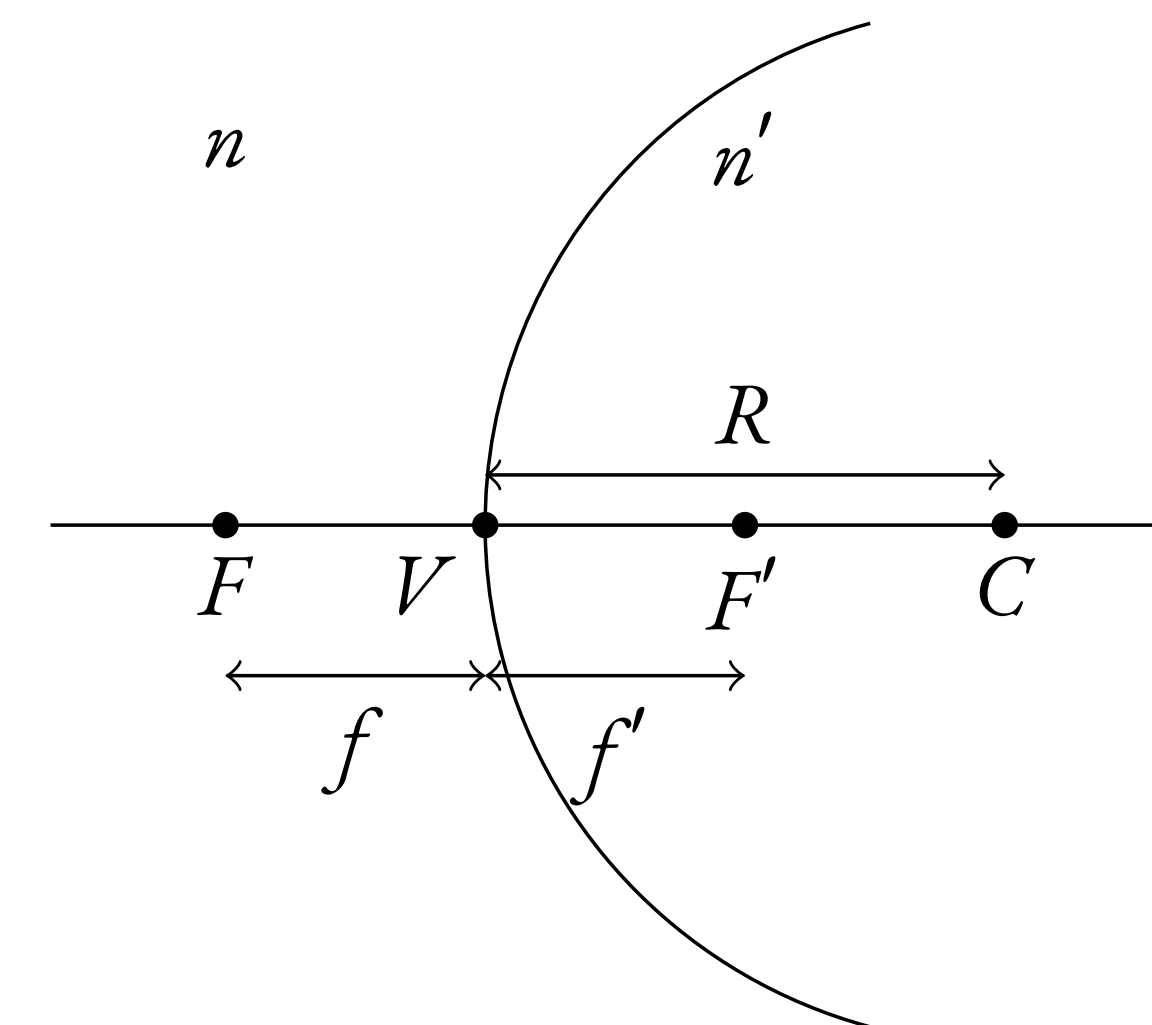
En ambos casos la imagen se sitúa en la misma vertical del objeto, pero en la posición correspondiente a prolongar el rayo refractado. Así, la imagen siempre está en el mismo medio que el objeto y su tamaño es el mismo.

Resolución numérica

$$y = y'; \quad \frac{s'}{s} = \frac{n'}{n}$$

Dioptrio esférico

Al igual que sucedía con los espejos, los dioptrios esféricos pueden ser cóncavos o convexas:



$V \equiv$ **vértice** Es el punto de intersección con el eje. Se toma como origen.

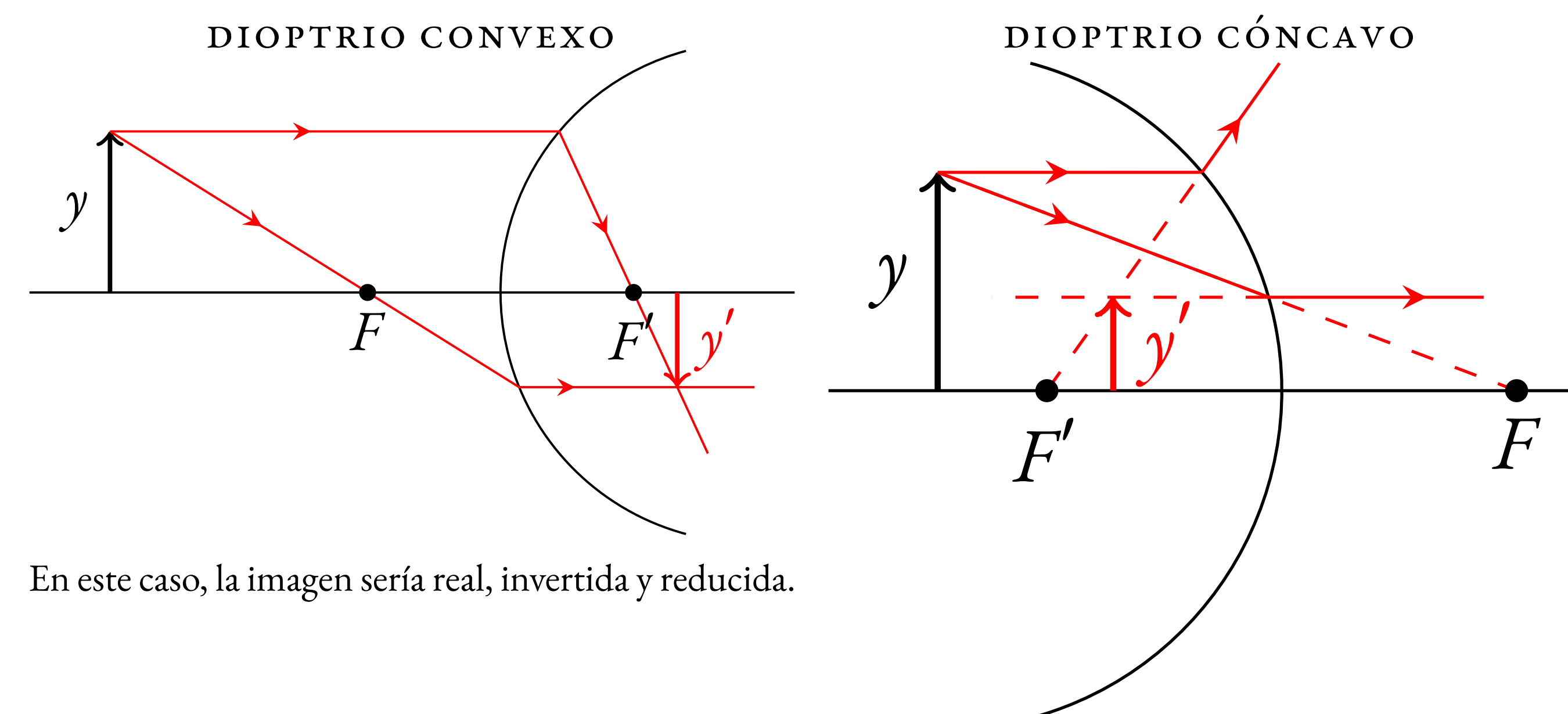
$C \equiv$ **centro de curvatura** Es el centro geométrico del dioptrio y, por lo tanto, está a una distancia R del vértice.

$F \equiv$ **foco objeto** Es el punto donde convergen los rayos paralelos al eje óptico después de refractarse en el dioptrio.

$F' \equiv$ **foco imagen** Su distancia al origen, f' , depende de n y n' .

Para el TRAZADO DE RAYOS debe tenerse en cuenta:

- Los rayos paralelos al eje (vienen del infinito) pasan por F' .
- Los rayos que pasan por F se refractan paralelos al eje.
- Los rayos que pasan por C no se desvían al refractarse.



En este caso, la imagen sería real, invertida y reducida.

En este caso, la imagen sería virtual, derecha y reducida.

No podemos afirmar nada general sobre la imagen. Es necesario analizar cada situación en concreto.

Resolución numérica

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'}; \quad |f + f'| = R$$

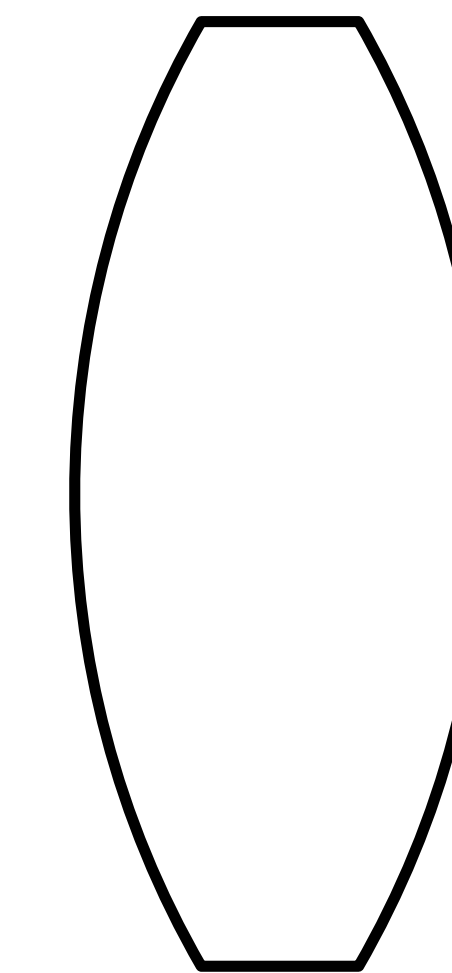
$$\frac{f'}{s'} + \frac{f}{s} = 1 \quad \text{ecuación de Gauss}$$

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{ns'}{n's} \quad \text{aumento lateral}$$

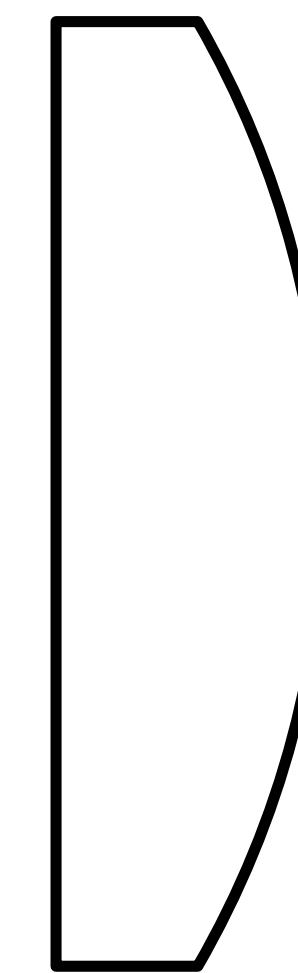
Formación de imágenes en lentes delgadas

Una **lente** es un sistema óptico formado por dos dioptrios al menos uno de los cuales es esférico. Así, la desviación que sufre el rayo al atravesar la lente es consecuencia de las refracciones en ambos dioptrios. Se diferencian dos tipos de lentes:

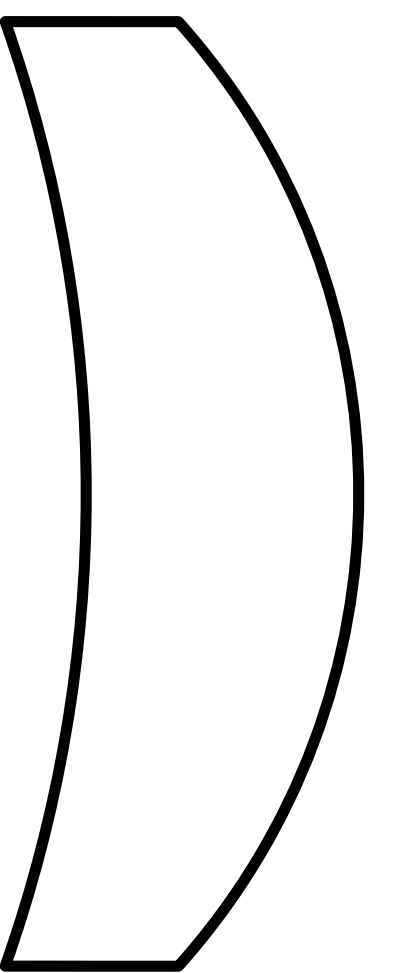
Lentes convergentes A la salida de la lente los rayos convergen. Ejemplos:



Biconvexa

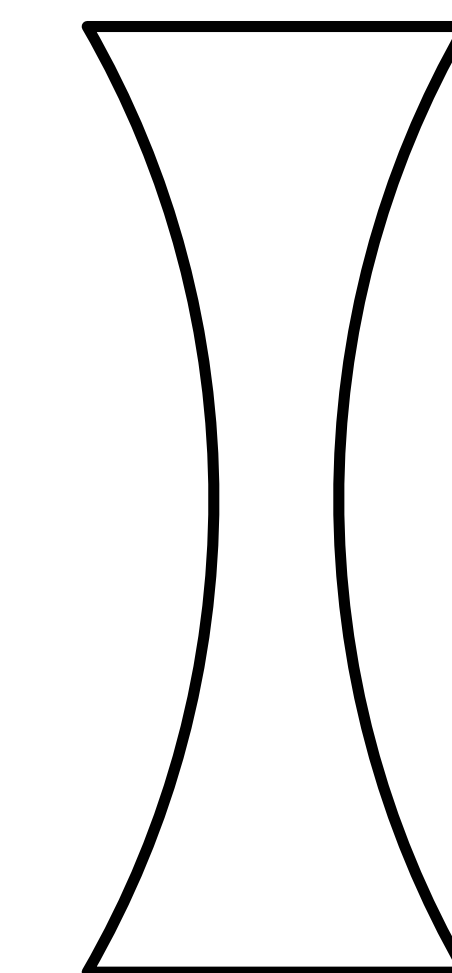


Plano-convexa

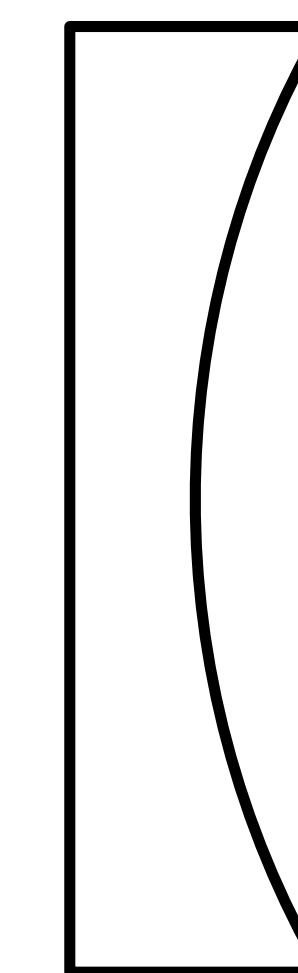


Menisco convexa

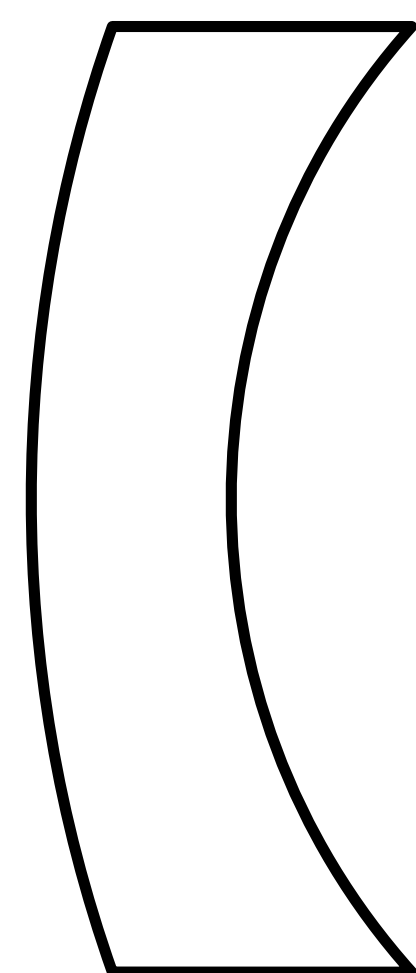
Lentes divergentes A la salida de la lente los rayos divergen. Ejemplos:



Bicóncava

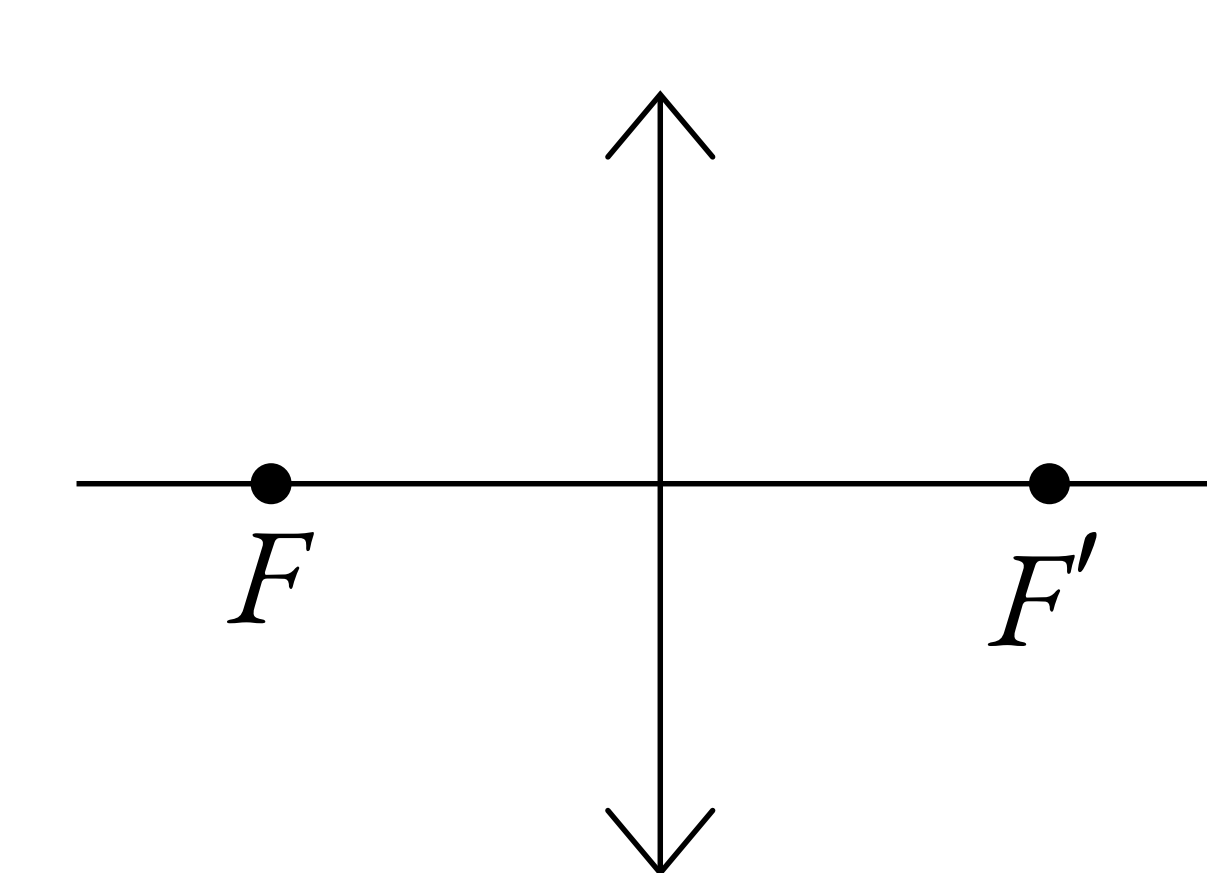


Plano-cóncava

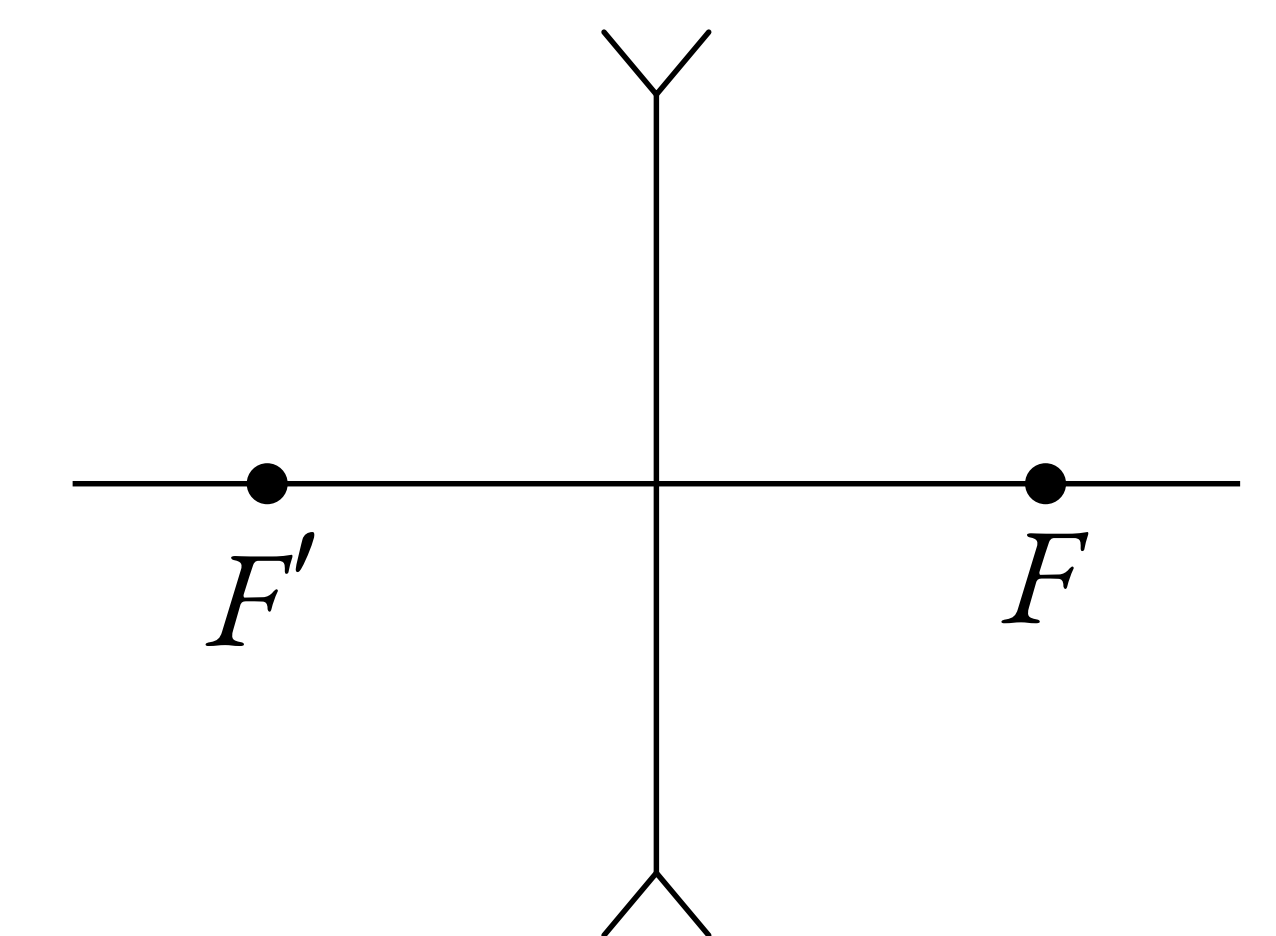


Menisco cóncava

Que una lente sea convergente o divergente depende únicamente de su geometría. En este bloque siempre consideraremos **lentes delgadas**: son aquellas en las que los centros de los dioptrios coinciden. Así hablaremos de un único centro que tomaremos como origen. Además podemos despreciar el desplazamiento del rayo en su interior (tan delgadas que la desviación dentro es despreciable). Las lentes delgadas se representan:



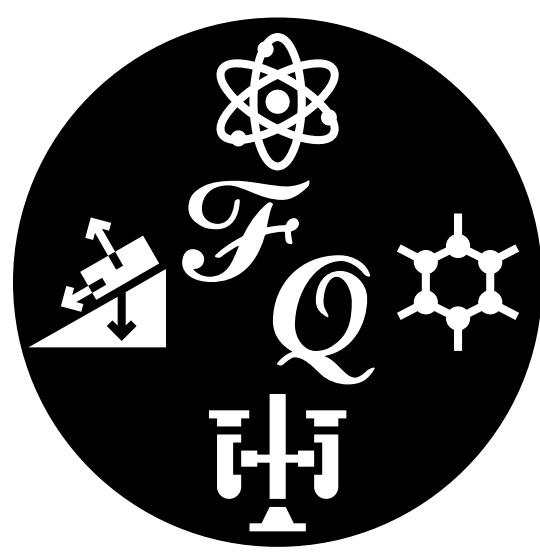
CONVERGENTE



DIVERGENTE

En las lentes divergentes los focos están invertidos respecto a las convergentes. En ambos casos F y F' se encuentran a la misma distancia del centro de la lente (origen):

$$|f| = |f'|$$



ÓPTICA GEOMÉTRICA

Física 2.º Bach

Marta Rada Arias y Rodrigo Alcaraz de la Osa



Formación de imágenes en lentes delgadas (cont.)

Para el **trazado de rayos** debe tenerse en cuenta:

- Los rayos paralelos al eje (vienen del infinito) pasan por F' .
- Los rayos que pasan por F se refractan paralelos al eje.
- Los rayos que pasan por el centro de la lente no se desvían al refractarse.

Lente convergente

Al igual que sucedía con los dioptrios, no podemos afirmar nada en general. Debemos estudiar cada caso concreto:

Objeto en $s > 2f$

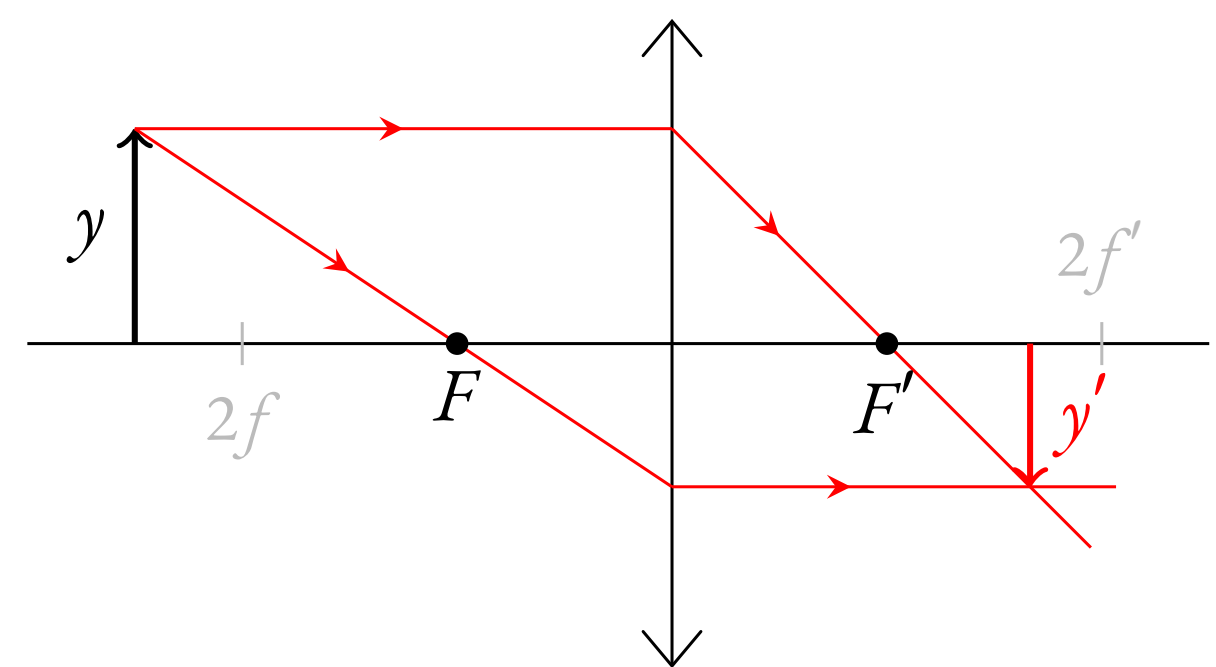


Imagen real, invertida y reducida.

Objeto en $s = 2f$

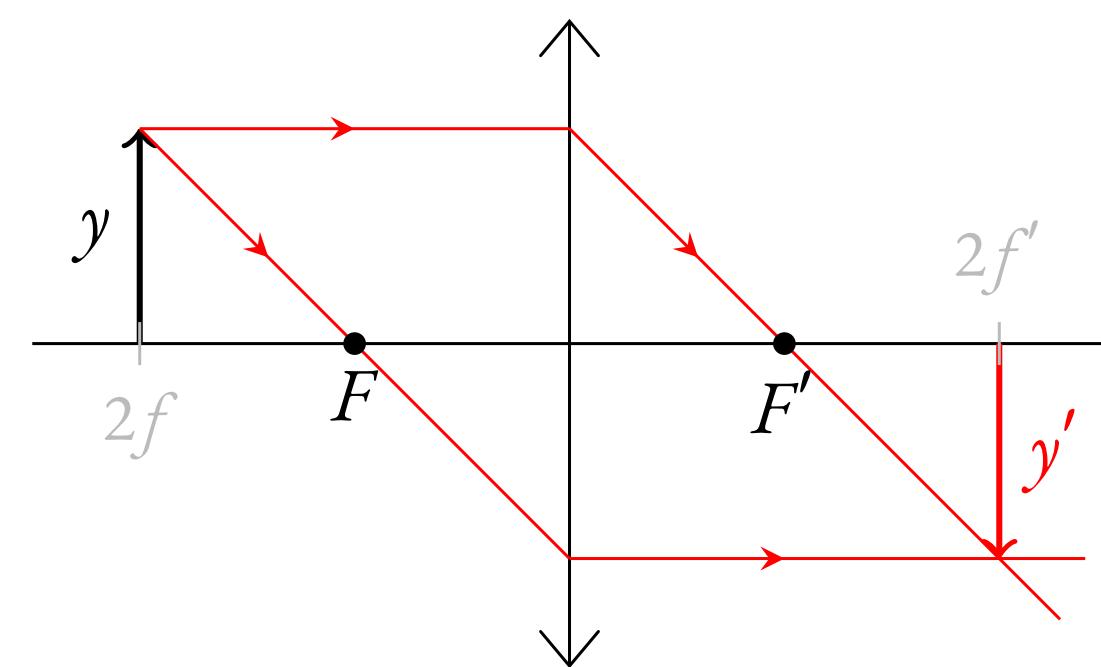


Imagen real, invertida y del mismo tamaño.

Objeto en $f < s < 2f$

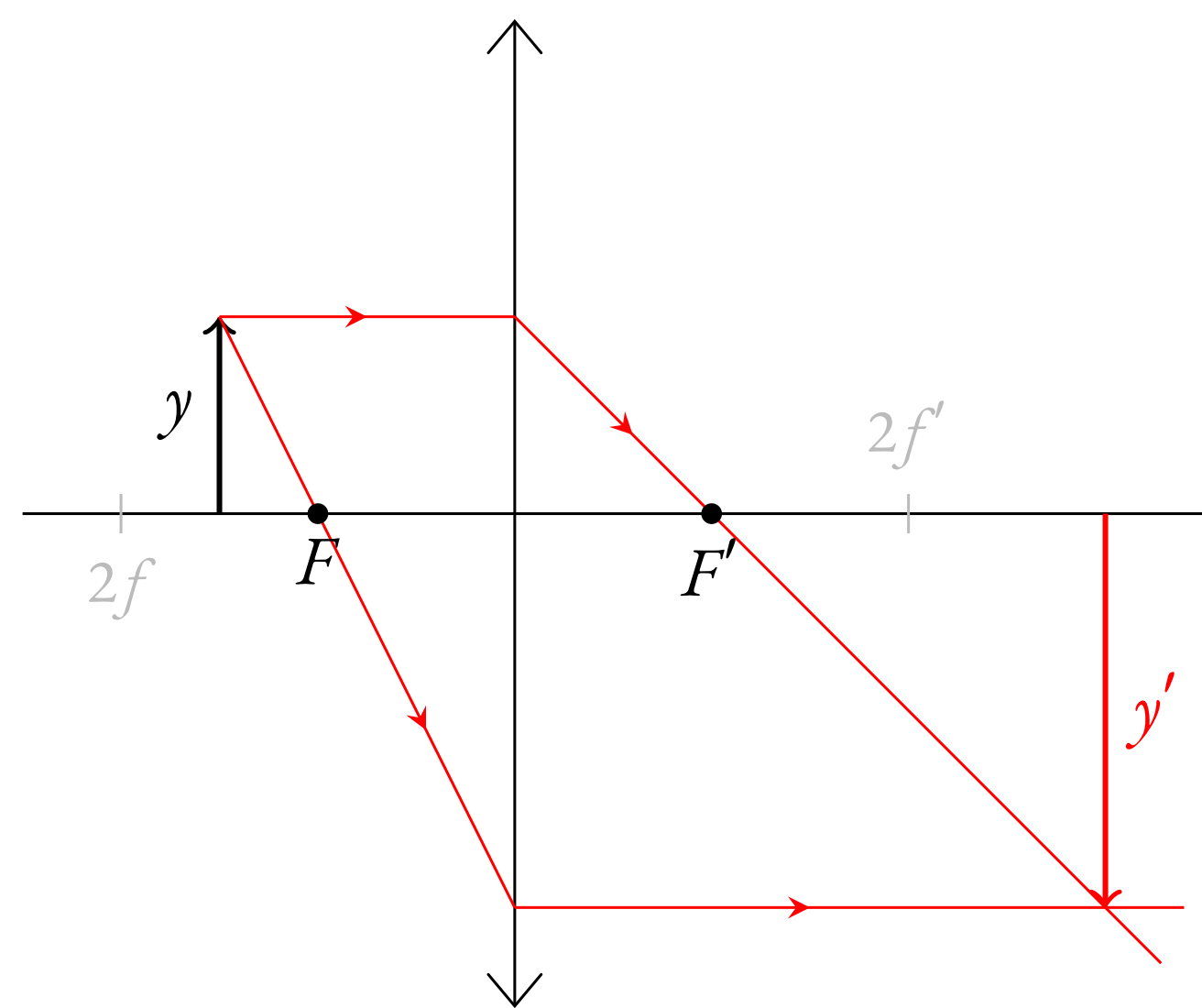


Imagen real, invertida y aumentada.

Objeto en $s < f$

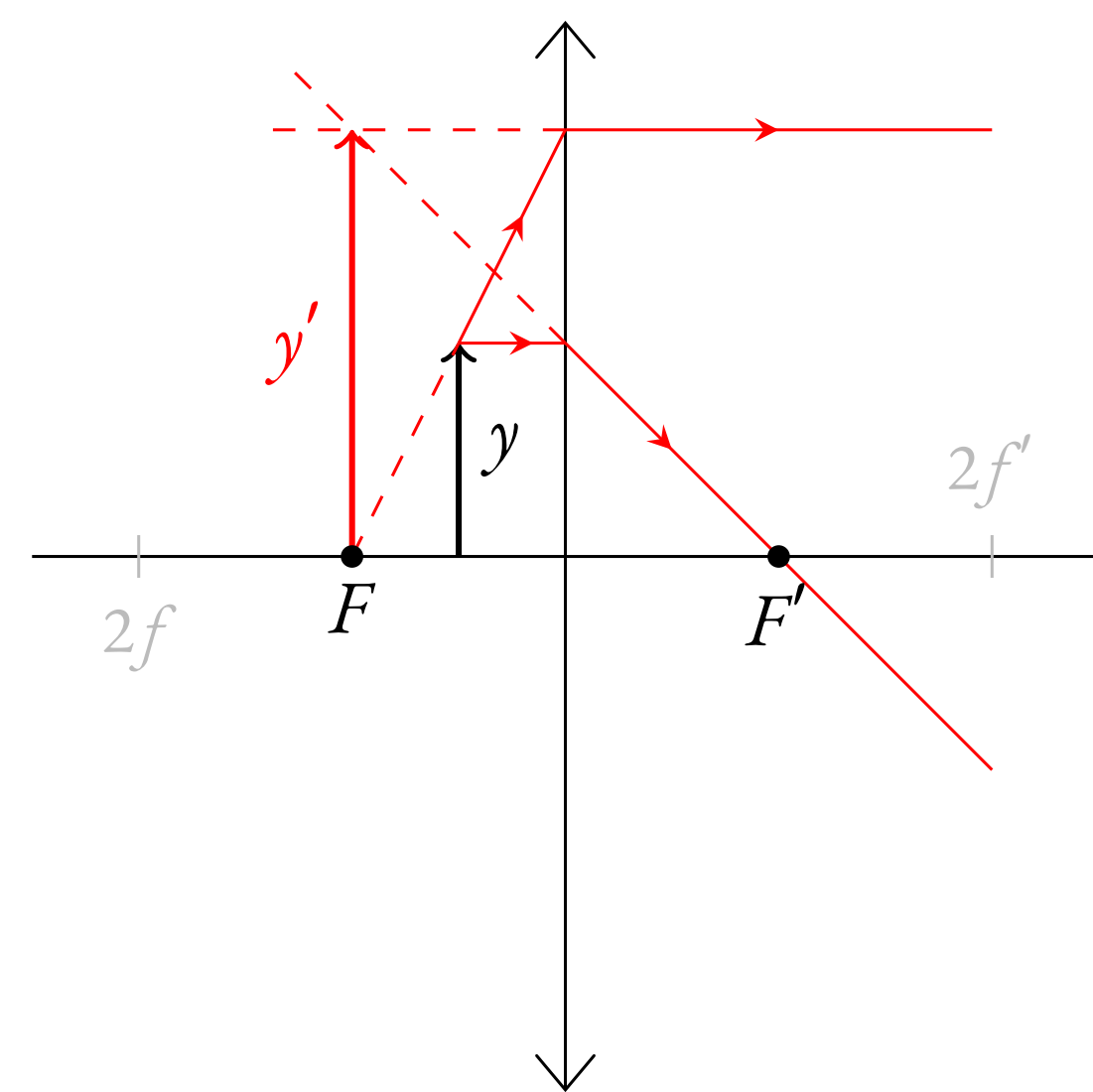


Imagen virtual, derecha y aumentada.

Objeto en $s = f$

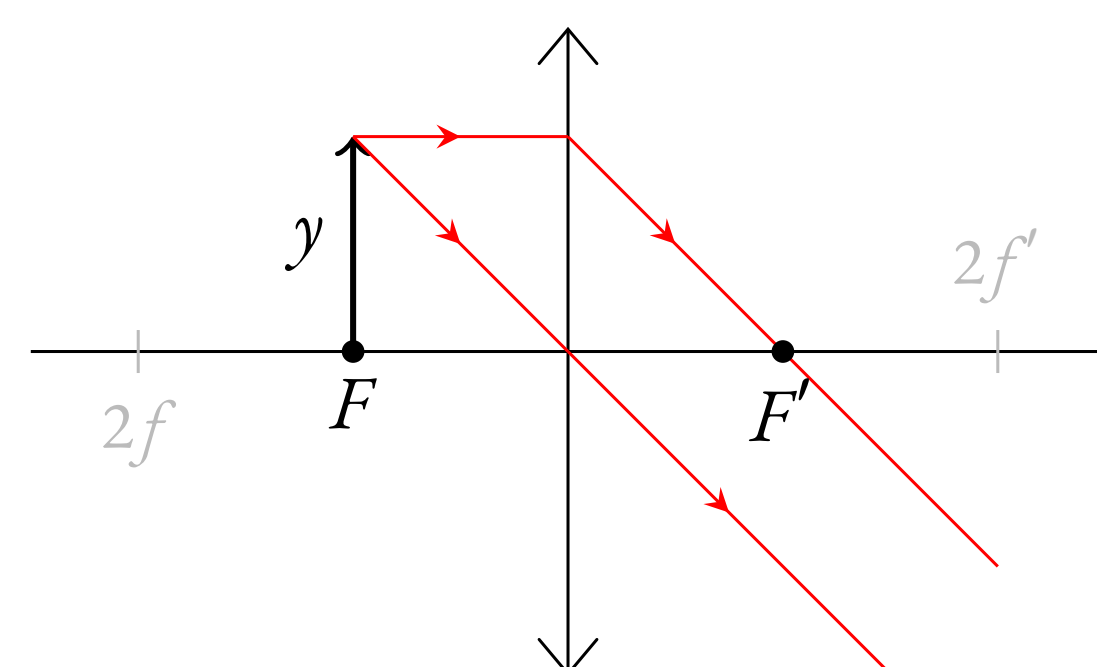


Imagen en el infinito (no se forma imagen).

Formación de imágenes en lentes delgadas (cont.)

Lente divergente

En este caso la imagen siempre va a ser virtual, derecha y reducida:

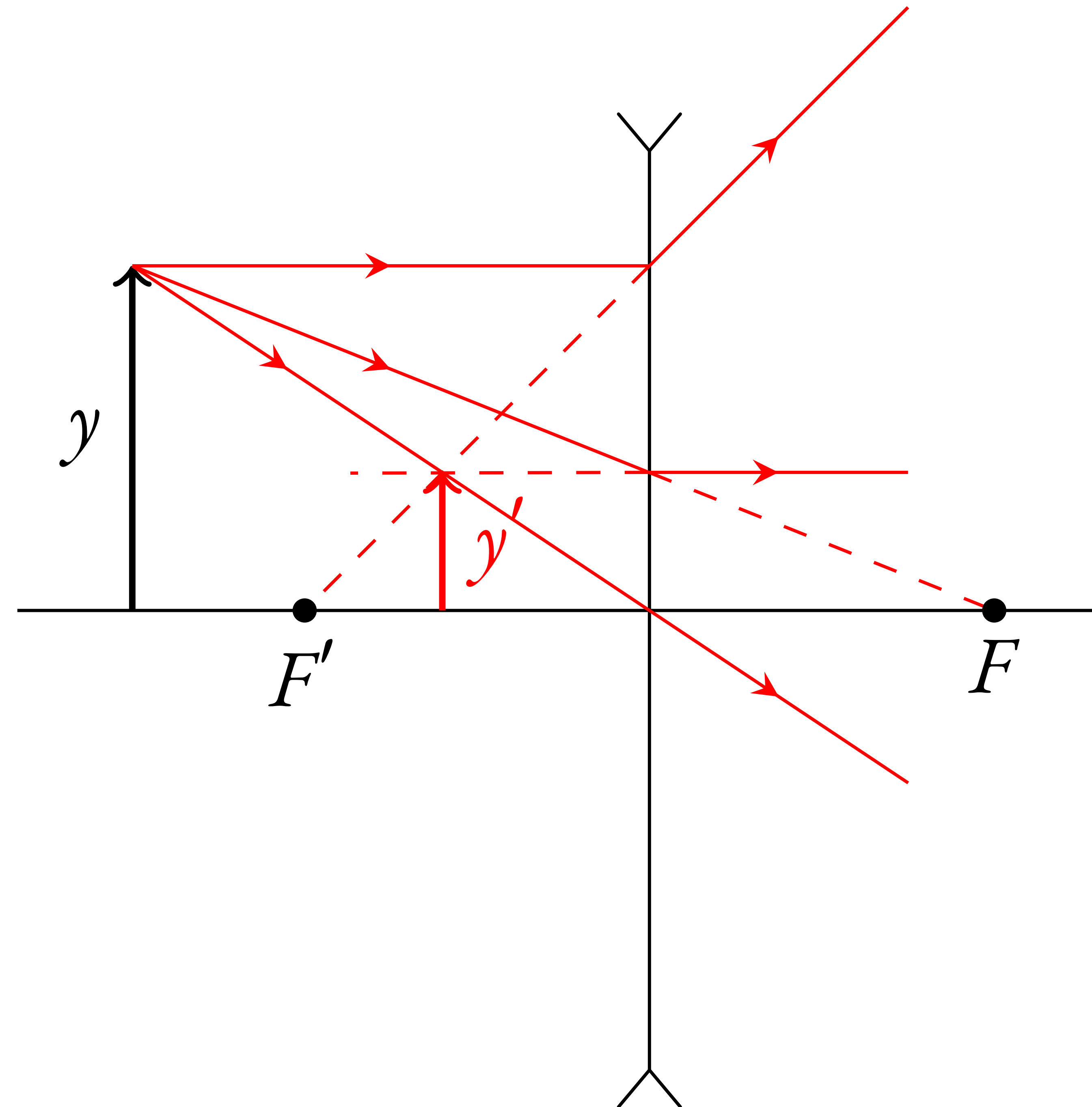


Imagen virtual, derecha y reducida.

Resolución numérica

$$-\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f'}; \quad m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$$

En alguna ocasión, para determinar f' , pueden darnos las características de los dioptrios que forman la lente. En ese caso se emplea la **FÓRMULA DEL CONSTRUCTOR O FABRICANTE DE LENTES**:

$$\frac{1}{f'} = (n' - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

donde n' es el índice de refracción de la lente, f' es la distancia focal imagen y r_1 y r_2 son los radios del primer y segundo dioptrio, respectivamente.

Potencia de una lente. Definición de dioptría

La **potencia** de una lente es la capacidad de la lente para hacer converger o diverger los rayos de luz. Se denota por P y viene dada por:

$$P = \frac{1}{f'}$$

Es la inversa de la distancia focal imagen y tiene su mismo signo. Por eso, será:

- Positiva en lentes convergentes.
- Negativa en lentes divergentes.

Para expresar la potencia de una lente se emplea la **dioptría**, D , que es la potencia de una lente cuya distancia focal imagen es de 1 m.

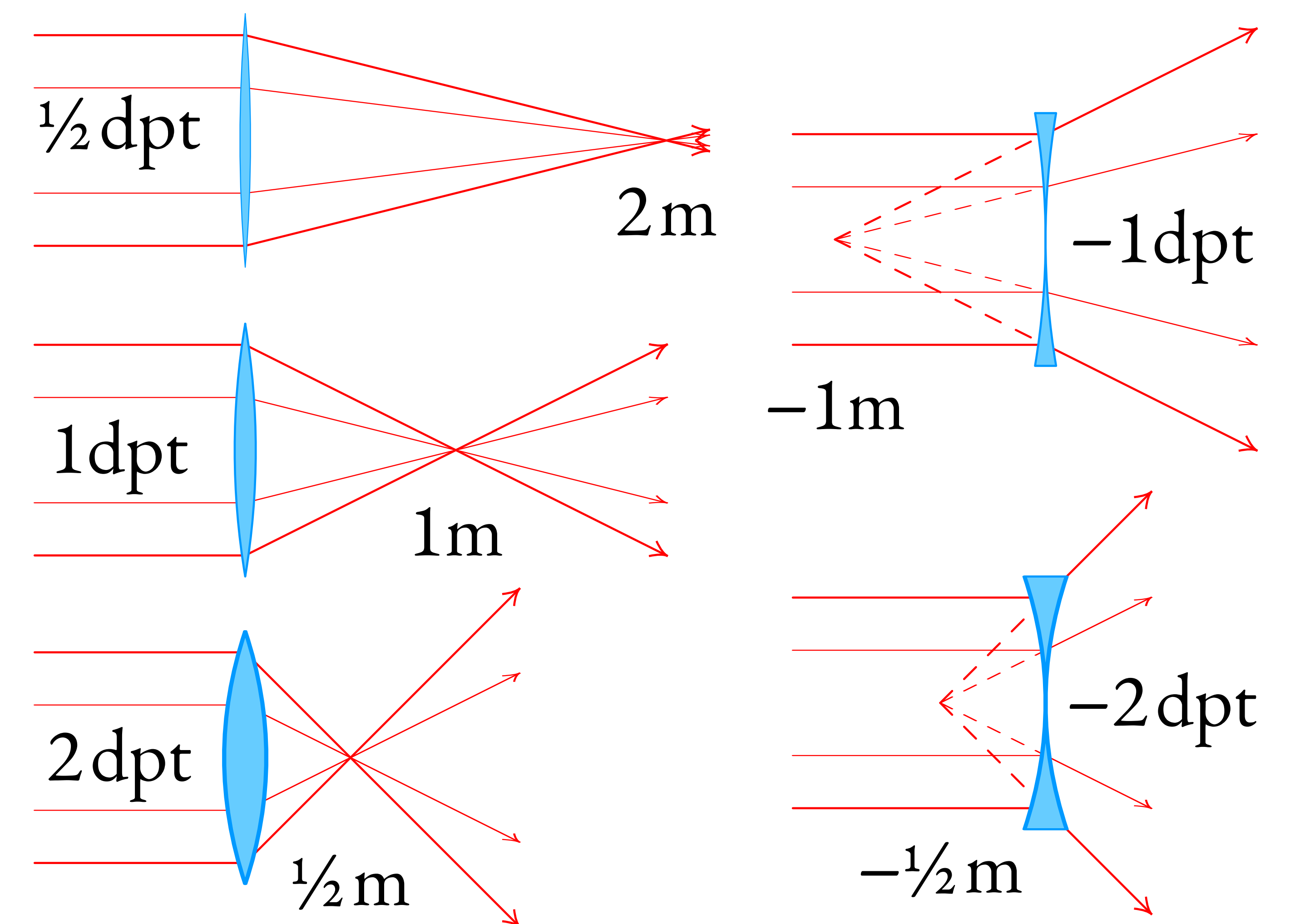


Ilustración de la relación entre la potencia óptica en dioptrías y la distancia focal en metros. Adaptada de https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optical_power_of_a_lens.svg.