

Enseñanza Experimental de la Óptica Geométrica: Campos de Visión de Lentes y Espejos

(Experimental teaching of Geometrical Optics: Visual fields of lenses and mirrors)

Julia Salinas¹, José Sandoval²

¹*Departamento de Física*

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Universidad Nacional de Tucumán

Av. Independencia 1800 - (4000) Tucumán - Argentina

E-mail: jsalinas@herrera.unt.edu.ar

²*Departamento de Luminotecnia, Luz y Visión*

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Universidad Nacional de Tucumán

Av. Independencia 1800 - (4000) Tucumán - Argentina

E-mail: jsandoval@herrera.unt.edu.ar

Recebido em 20 de julho, 1999

Se informa sobre actividades teórico-experimentales que se han mostrado eficientes para promover un aprendizaje más significativo de la óptica geométrica por parte de los estudiantes. Las actividades requieren de la participación activa de los alumnos y estimulan su autonomía y creatividad, bajo la orientación del docente. El tratamiento cualitativo y conceptual que se presenta complementa (no reemplaza) los tratamientos cuantitativos habituales y favorece una mayor profundización y comprensión de aspectos básicos que muchas veces no son adecuadamente tratados.

Some activities which combine theoretical and experimental aspects and promote a more significative learning of geometrical optics are presented. They demand the active participation of students and stimulate their autonomy and creativity while working under the teachers orientation. The conceptual and qualitative treatment of optical situations complements (it doesn't replace) the habitual quantitative treatments and favors a greater comprehension of basic aspects which many times are not properly considered.

I Introducción

La óptica geométrica se desarrolló históricamente antes de que la luz se describiese como una onda electromagnética (Taton 1975). Sin embargo, proporciona aproximadamente los mismos resultados que se obtienen a partir de las ecuaciones de Maxwell, siempre que la longitud de onda (λ) sea mucho menor que las dimensiones (d_i) del sistema físico a través del cual se propaga la luz. La óptica geométrica trabaja con el concepto de *rayo de luz*, que es una línea que señala la dirección de propagación de la onda.

La condición $\lambda \ll d_i$ se verifica en gran cantidad de instrumentos ópticos que utilizan espejos, lentes, prismas y diafragmas, cuyo diseño y operación se realiza basándose en las leyes fundamentales de la óptica geométrica. Según Rossi (1968) esas leyes son tres, referidas a la propagación rectilínea, la reflexión y la re-

fracción de la luz respectivamente. Otros autores, como Lándsberg (1983), hablan de cuatro leyes básicas: las tres mencionadas y la ley de independencia de los haces luminosos.

La condición $\lambda \ll d_i$ se verifica también en muchas situaciones de la vida cotidiana, lo que facilita la realización de observaciones cualitativas por parte de los estudiantes. Además, en el aula pueden desarrollarse interesantes y fértiles experiencias sobre óptica geométrica con equipamiento sencillo y de bajo costo.

Es decir las observaciones y las experiencias sobre óptica geométrica están "al alcance de la mano". Los docentes podemos aprovechar esta circunstancia para incorporar en la instrucción distintas actividades, tendientes a controlar, por ejemplo;

- el papel que desempeña cada elemento del sistema óptico;

- la adecuación entre las previsiones teóricas y los comportamientos reales.

Sin embargo, no hay una única forma en que esta incorporación pueda llevarse a cabo. Por ejemplo, el docente puede proporcionar a los estudiantes guías de trabajo pormenorizadas, que dirijan paso a paso las actividades intelectuales y manuales a realizar. También puede optar por caminos menos dirigistas, que propicien una mayor autonomía de los estudiantes y requieran de mayores dosis de creatividad. En este trabajo concebimos la labor experimental como parte de una estrategia educativa global que involucra activamente a los estudiantes en la resolución científica (orientada por el docente) de situaciones problemáticas (Gil y Carrasosa 1985; Salinas 1994).

Cuando se utiliza una dinámica de trabajo como la mencionada en último término, ocurre con bastante frecuencia que los estudiantes se aproximan al sistema experimental con curiosidad, prestan atención a aspectos que exceden los que el profesor ha planteado como objetivo de la actividad que se está desarrollando. El trabajo de los alumnos puede enriquecerse notablemente si el clima del aula es receptivo a este tipo de inquietudes y el docente las alienta y orienta adecuadamente.

Los objetivos de este trabajo son, entonces, los siguientes:

- Mostrar a través de un caso concreto cómo se favorecen mejores aprendizajes de aspectos conceptuales y metodológicos de la óptica geométrica, cuando la enseñanza se diseña de modo que los estudiantes se involucren en una labor teórico-experimental concebida como una estrategia de (re)construcción del conocimiento científico.
- Sugerir actividades educativas concretas aptas para incorporar, en el proceso de enseñanza y aprendizaje de la óptica geométrica, el tratamiento de problemáticas usualmente ausentes, vinculadas a los efectos impuestos por las dimensiones de las superficies reflectoras o refractantes que intervienen en el sistema óptico.

II El programa de actividades iniciales y las nuevas cuestiones introducidas

En este apartado veremos cómo estaba planificado inicialmente el trabajo y en qué consistió la modificación incorporada (modificación que proponemos incluir como parte de las actividades que se desarrollen habitualmente en un curso sobre óptica geométrica).

II.1. La planificación original de las actividades

Como parte de un trabajo más amplio relacionado con el comportamiento de lentes y espejos esféricos (ver, por ejemplo, Sandoval y Salinas 1995; Salinas y Sandoval 1999), en el programa de actividades iniciales se proponía a los estudiantes que utilizaran los conceptos y procedimientos de la óptica geométrica para controlar:

- cómo influye el tamaño de la lente sobre la imagen real recogida sobre una pantalla;
- si es posible ver la imagen real (producida por una lente o un espejo) sin utilizar una pantalla.

Ambas cuestiones se proponían con la finalidad de favorecer comprensiones correctas de aspectos básicos por parte de los estudiantes. En coincidencia con resultados reportados por otros investigadores (ver, por ejemplo, Goldberg y McDermott 1987), habíamos detectado que muchos alumnos pensaban que:

- si se tapaba parte de la lente con un elemento opaco (un trozo de cartón, por ejemplo), desaparecía parte de la imagen;
- si se retiraba la pantalla, desaparecía la imagen.

Parecía claro que los estudiantes no comprendían el comportamiento de la lente ni de la pantalla. Sospechábamos además que estas incomprensiones podían apoyarse, respectivamente, en:

- modelos no científicos de formación de imágenes;
- una pobre discriminación entre los procesos de “formación” y “percepción visual” de una imagen.

En efecto, en la interacción con los alumnos, y en convergencia con resultados reportados en otros trabajos, habíamos recogido alguna evidencia de que muchos estudiantes:

- recurrían en sus explicaciones a modelos implícitos de “imágenes viajeras”, figuras completas emitidas por los objetos luminosos (o iluminados) (ver, por ejemplo, Salinas y Sandoval 1994; Pesa 1997);
- tenían serias dificultades para establecer correspondencias entre los comportamientos de los sistemas ópticos “de los libros” (que generalmente no incorporan el ojo del observador) y “del laboratorio” (en los que usualmente se utiliza el ojo como detector) (ver, por ejemplo, Goldberg et al. 1991; Salinas y Sandoval 1997).

Atribuimos, por lo tanto, gran importancia al desarrollo de estas dos actividades, dada la índole de las incompreensiones que nos proponíamos atacar con ellas.

II.2.- El surgimiento de problemáticas de interés originalmente no contempladas en la planificación

Las respuestas de los estudiantes nos mostraron que además era posible (y deseable) incorporar otra cuestión, también importante: un análisis comprensivo de los efectos que produce la naturaleza intrínsecamente finita de cualquier superficie reflectora o refractante.

II.2.a) Efectos del “diafragma de abertura”

Para controlar experimentalmente cómo influye el tamaño de la lente sobre la imagen real recogida sobre una pantalla, los estudiantes colocaron sobre un banco óptico una lámpara incandescente común, una lente convergente y una pantalla y movieron la pantalla hasta conseguir una imagen nítida del filamento. A continuación aplicaron sobre la lente trozos de cartón de distintas formas, y en distintas posiciones, y observaron el efecto que esto producía sobre la imagen.

Constataron así que bastaba un trozo de lente para formar la imagen completa del filamento. A continuación se abocaron a:

- interpretar este resultado en el marco de la óptica geométrica;
- identificar posibles razones por las que algunos estudiantes esperaban que desapareciera parte de la imagen al tapar parte de la lente (típicamente, suele ocurrir que el procedimiento gráfico utilizado para obtener la imagen por composición de los “rayos principales” oscurece ante los estudiantes el hecho de que cada punto del objeto emite rayos luminosos en todas direcciones, por lo que cada punto de la lente recibe rayos provenientes de todos los puntos del objeto enfrentados a la lente).

Algunos estudiantes, sin embargo, señalaron que si bien la imagen seguía completa cuando se tapaba parte de la lente, no era correcto decir que “no se modificaba”, puesto que “no tenía el mismo contraste”.

Se recurrió nuevamente a la experimentación. Había que reproducir las mismas situaciones que habían sido analizadas previamente, pero ahora la atención estaba enfocada sobre otro aspecto, al que antes muchos estudiantes no habían prestado atención. Un docente alerta puede aprovechar oportunidades como éstas para que los estudiantes comprendan que la observación siempre está guiada por una hipótesis, por implícita y/o rudimentaria que ésta sea (Chalmers 1987).

Efectivamente, la intensidad luminosa de la imagen era afectada por el tamaño de la lente. Los estudiantes debían elaborar una explicación en el marco de la

óptica geométrica. Centralmente, había que comprender que la lente colecta sólo una fracción de la energía luminosa emitida por la fuente, y que esta fracción es tanto menor cuanto más pequeña es la lente. Era posible entonces dar otro paso, y advertir que decir eso es equivalente a decir que el diámetro libre o no obstruido de la lente actúa como una abertura por la cual fluye la energía, es decir, como un diafragma.

Se había incorporado la importante noción de “diafragma de abertura” de un sistema óptico (que controla el número de rayos de un punto objeto que llegan al punto imagen conjugado) y se la había relacionado con la intensidad luminosa de la imagen.

II.2.b) Efectos del “diafragma de campo”

Para controlar experimentalmente si es posible ver la imagen real (producida por una lente) sin utilizar una pantalla, los estudiantes utilizaron el mismo sistema experimental (objeto - lente - pantalla). Para controlar el comportamiento de la imagen real formada por un espejo cóncavo, armaron un sistema en el que reemplazaron la lente por el espejo y dispusieron los elementos en el orden correspondiente (espejo - objeto - pantalla). En ambos casos recogieron la imagen sobre una pantalla, que luego quitaron. Y pasaron entonces a analizar:

- si existía (o no) una imagen;
- si era posible (o imposible) verla en caso de que existiera.

Orientados por el docente, clarificaron la función de la pantalla (re-dirigir, por reflexión difusa, los rayos luminosos que confluyen en la imagen) y llegaron a la conclusión de que ésta no es necesaria en el proceso de formación de la imagen, pero sí lo es para la percepción visual de la imagen desde ciertas regiones del espacio (por ejemplo, los laterales del banco óptico). Para ver la imagen sin ayuda de la pantalla había que ubicar el ojo de tal manera que puedan entrar en él los rayos luminosos después de converger en la imagen real (Ronchi 1991).

Los estudiantes constataron experimentalmente estas previsiones y una vez determinada la región del espacio desde la que podía observarse la imagen, pasaron a:

- interpretar este resultado en el marco de la óptica geométrica;
- identificar posibles razones por las que algunos esperaban que desapareciera la imagen al quitar la pantalla (típicamente, suele ocurrir que los estudiantes no tomen conciencia de la intervención del ojo como detector óptico, es decir, como factor intermediario entre la imagen formada por el sistema óptico y la imagen percibida por el observador. Implícitamente suponen entonces que hay un acceso directo a la imagen, por lo que, si no ven una imagen, eso significa que no hay imagen).

Algunos estudiantes, sin embargo, señalaron que si bien la imagen seguía existiendo cuando se quitaba la pantalla, no era correcto decir que “no se modificaba”, porque ellos sólo habían logrado ver la imagen de “un trozo del filamento”, y no la imagen del filamento completo.

Se hizo necesario recurrir nuevamente a la experimentación para controlar las características de la imagen percibida sin ayuda de la pantalla. Efectivamente, desde algunas posiciones era posible ver la imagen completa; desde otras posiciones se veían diferentes partes del filamento y desde otras, la imagen desaparecía. Cuando se tapaba parte de la lente (o del espejo) con trozos de cartón que impedían el paso de la luz, la imagen que se percibía desde una dada posición podía o no modificarse, según cuál fuera la región de la lente (o del espejo) afectada.

Los estudiantes debían elaborar una explicación en el marco de la óptica geométrica. Centralmente, había que comprender que los bordes libres o no obstruidos de la lente (o del espejo) limitan la región en que los rayos provenientes de un punto del objeto pasan hacia el punto imagen conjugado. En otras palabras, el diámetro de la superficie óptica actúa como una abertura que deja (o no) fluir la energía, es decir, como un diafragma.

Se había incorporado otro importante concepto, el de “diafragma de campo” de un sistema óptico (que controla la distribución de los puntos objeto cuyos rayos llegan a los puntos imagen conjugados) y se lo había relacionado con el campo de visión de la imagen.

La consulta de algunos textos sobre óptica correspondientes a ciclos básicos universitarios (por ejemplo, Rossi 1968; Hecht y Zajac 1977) permitió que los alumnos controlaran y completaran sus elaboraciones sobre las nociones de “diafragma de abertura” y “diafragma de campo”.

III Intensidad luminosa de la imagen y campo de visión: dos efectos de los diafragmas en sistemas regidos por la óptica geométrica

Es habitual que en la instrucción en óptica geométrica no se considere el efecto de las dimensiones de las superficies reflectoras o refractantes que intervienen. Sin embargo, cada una de esas superficies, debido a sus dimensiones finitas, actúa como un diafragma, pues limita el haz de luz que atraviesa el sistema óptico.

En el marco de la óptica geométrica, ¿cuáles son los efectos de los diafragmas que limitan el haz de luz que atraviesa un sistema óptico? Rossi (1968) y Hecht y Zajac (1977) explican que son básicamente dos:

- Limitar el ángulo sólido subtendido en la fuente por el haz que pasa por el sistema. El diafragma que controla este ángulo sólido determina qué fracción de la luz emitida por la fuente puede ser transmitida por el sistema; de esta manera, controla la intensidad luminosa de la imagen. Cualquier elemento, sea el borde de la lente o un diafragma separado, que determina la cantidad de luz que llega a la imagen, se conoce como freno de abertura (Rossi 1968) o como diafragma de abertura (Hecht y Zajac 1977).
- Limitar el campo de visión; o sea, las dimensiones de un objeto del cual el sistema puede producir una imagen completa. El elemento que limita el tamaño o extensión angular del objeto cuya imagen puede formar el sistema se llama freno de campo (Rossi 1968) o diafragma de campo (Hecht y Zajac 1977), y determina el campo de vista del instrumento.

En la Fig. 1, los extremos del objeto son bloqueados por el diafragma de campo. Hecht y Zajac (1977) explican que si se abre el diafragma de abertura (D.A.), el sistema aceptaría un cono de energía más grande y al hacerlo así aumentaría la intensidad luminosa de cada punto imagen. En contraste, si se abre el diafragma de campo (D.C.), los extremos del objeto, que previamente habían sido bloqueados, pasarían a formar parte de la imagen.”

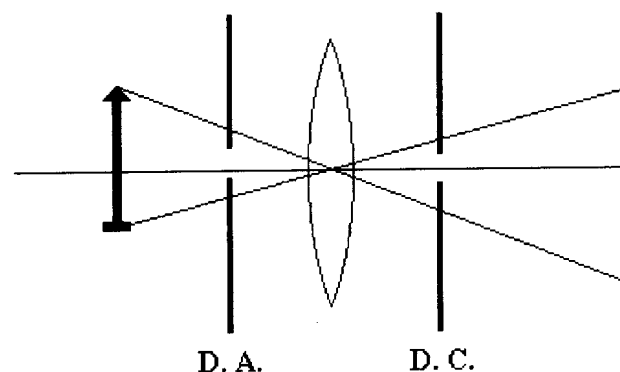


Figura 1

Figura 1

Estas consideraciones elementales dejan abierto el amplio e importante campo de las pupilas de entrada y salida de los instrumentos ópticos, que es tratado en profundidad en otros textos de física general (ver, por ejemplo, Frish y Timoreva 1981) o en textos más específicos (ver, por ejemplo, Levi 1968).

IV Nuevas actividades incorporadas

A partir de la situación descrita y de los aprendizajes más comprensivos que se favorecen cuando se incorporan funcionalmente análisis como los presentados, proponemos que los estudiantes, como parte de sus actividades de aprendizaje de óptica geométrica, estudien la relación que existe entre las dimensiones del sistema óptico y las regiones del espacio desde las que puede observarse la imagen completa formada por aquél.

Con ese objetivo, pueden plantearse a los alumnos preguntas como las formuladas en los dos problemas que siguen, y pedirles que en cada uno de ellos procedan de la siguiente manera:

1. Que formulen por escrito una predicción sobre el comportamiento que esperan
2. Que diseñen y armen (orientados por el docente) sistemas experimentales que reproduzcan las condiciones del problema y observen su comportamiento
3. Que discutan (orientados por el docente) las predicciones iniciales a la luz de los resultados experimentales y de los aportes de la óptica geométrica; que analicen las discrepancias, identifiquen posibles razones de los desacuerdos y elaboren una respuesta final al problema planteado.

Primer problema: ¿Podrás ver la imagen completa de la frutilla si tu ojo está ubicado en la posición que muestra la Fig. 2? (Suponer que son aplicables las leyes de la óptica geométrica)

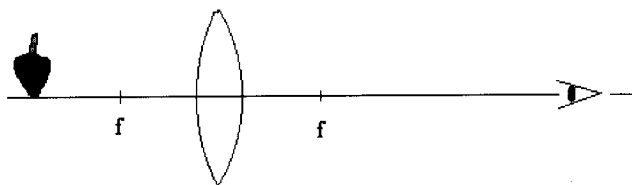


Figura 2. (nota: las dimensiones de la frutilla han sido exageradas para favorecer mayor claridad en las marchas de rayos).

Segundo problema: ¿Podrás ver la imagen completa de la frutilla si tu ojo está ubicado en la posición que muestra la Fig. 3? (Suponer que son aplicables las leyes de la óptica geométrica)

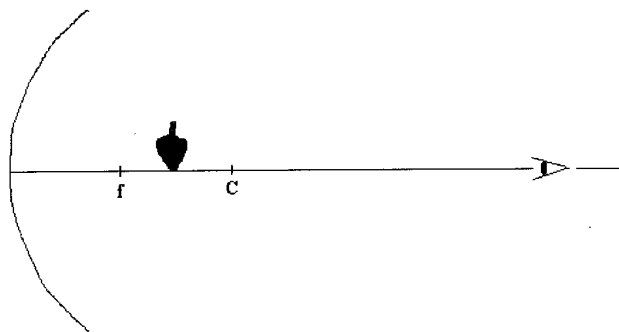


Figura 3. (nota: las dimensiones de la frutilla han sido exageradas para favorecer mayor claridad en las marchas de rayos).

La práctica docente nos ha mostrado que para ambas situaciones, la mayoría de los estudiantes responde afirmativamente. La utilización de los rayos principales conduce sin mayores dificultades a la formación de una imagen real. A partir de ese momento, muchos estudiantes atribuyen a esa imagen una existencia autónoma, independiente del sistema óptico que la origina. Les parece obvio que, si el ojo la está enfrentando, la imagen se verá completa.

En otras palabras, muchos alumnos no establecen diferencias entre las distribuciones espaciales de energía luminosa emitidas por una imagen real y un objeto material luminoso (o iluminado). Por tanto, suponen (la mayoría de las veces, implícitamente) que cada punto de una imagen real irradia luz en todas direcciones. Pero en realidad hay regiones en las que la radiación luminosa viaja hacia (y no desde) la imagen real, hay otras regiones en las que la radiación luminosa diverge desde la imagen real, y hay otras regiones libres de toda radiación luminosa relacionada con la imagen real.

El objeto material que actúa como objeto óptico del sistema, emite radiación luminosa en todas direcciones. Parte de esa radiación es colectada por el sistema óptico, que la re-dirige selectivamente en algunas (y no en todas) direcciones espaciales.

Las dimensiones inevitablemente finitas del sistema óptico hacen que las imágenes percibidas desde distintas posiciones puedan diferir entre sí, pues pueden ser producidas por rayos luminosos provenientes de distintos puntos del objeto. Más aún: habrá posiciones desde las que no se observará imagen alguna.

Una consideración más cuidadosa de la situación permite así advertir que la intuición inicial de muchos estudiantes es incorrecta, y que las dimensiones del sistema óptico imponen fuertes restricciones a las zonas del espacio desde las que es posible percibir las imágenes completas.

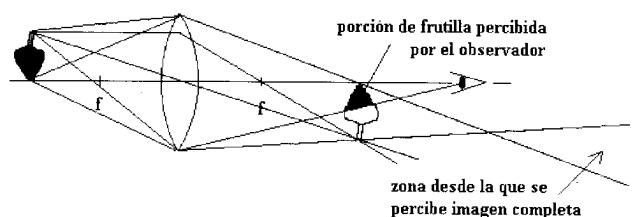


Figura 4. (nota: las dimensiones de la frutilla han sido exageradas para hacer más clara la marcha de los rayos).

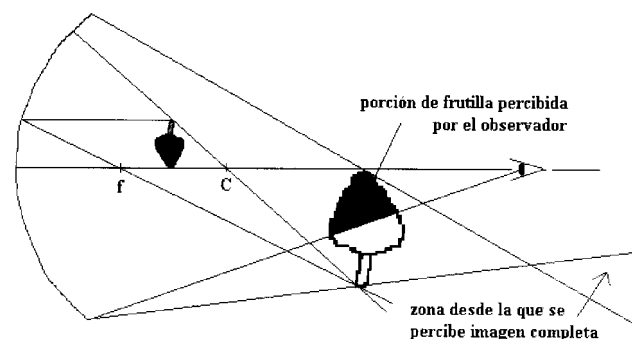


Figura 5. (nota: las dimensiones de la frutilla han sido exageradas para hacer más clara la marcha de los rayos).

La elaboración por parte de los estudiantes (orientados por el docente) de construcciones como las mostradas en las Figs. 4 y 5, ayudan a superar esta dificultad. Ellas permiten que los estudiantes identifiquen las características de las imágenes percibidas en diferentes regiones del espacio, las zonas desde las que la imagen se verá completa, y la porción de imagen que se verá desde la posición indicada para el ojo en los casos planteados. Así se puede dotar de significado físico a construcciones de rayos que con demasiada frecuencia se reducen a juegos de pura geometría.

V Conclusiones

Las condiciones de validez de la óptica geométrica (elementos con dimensiones mucho mayores que la longitud de onda de la luz) se cumplen en innumerables situaciones cotidianas, instrumentos ópticos y sistemas experimentales educativos. Esta abundancia, unida al bajo costo de un "kit" básico para experimentos sobre óptica geométrica, facilitan la introducción de observaciones y labor experimental en la instrucción.

Esta introducción puede llevarse a cabo con distintas orientaciones. En este trabajo se concibe a las observaciones y experimentaciones como parte de un programa de actividades tendiente a incorporar a los estudiantes en una resolución científica, orientada por el docente, de situaciones problemáticas sobre óptica geométrica.

La participación activa y creativa de los estudiantes permitió ampliar el rango de cuestiones consideradas y mostró la posibilidad y la conveniencia de tratar a

nivel básico una temática usualmente ausente en la instrucción: los efectos impuestos por la limitación física presentada por la periferia de una superficie reflectora o refractante, que determina cuáles rayos participarán en la formación de una imagen.

Esto condujo a la elaboración de dos enunciados de situaciones problemáticas que han sido incorporados a la programación inicial de actividades propuestas a los estudiantes y que, a juicio de los alumnos y los docentes involucrados, favorecen un aprendizaje más comprensivo de la óptica geométrica.

En este trabajo hemos presentado esos enunciados, así como algunas consideraciones vinculadas a su tratamiento conceptual y metodológico en el aula. Pretendemos que otros docentes tengan acceso a esta experiencia, que a nuestro juicio puede ser utilizada fértilmente en más de un sentido.

References

- [1] Chalmers A., 1987, *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* (Siglo Veintiuno Editores, Buenos Aires).
- [2] Frish S., Timoreva A., 1981, *Curso de Física General (Tomo III)* (Ed. MIR; Moscú).
- [3] Gil D., Carrascosa J., 1985, Science learning as a conceptual and methodological change, *European Journal of Science Education*, **7**(3).
- [4] Goldberg F., Bendall S., Galili I., 1991, Lenses, pinholes, screens and the eye, *The Physics Teacher*, abril.
- [5] Goldberg F., McDermott L., 1987, An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror, *American Journal of Physics*, **55**(2).
- [6] Hecht E., Zajac A., 1977, *Optica* (Fondo Educativa Interamericano, EEUU).
- [7] Lándsberg G.S., 1983, *Optica* (Ed. MIR, Moscú).
- [8] Levi L., 1968, *Applied Optics* (John Wiley and Sons, EEUU).
- [9] Pesa M., 1997, Concepciones y preconcepciones referidas a la formación de imágenes, *Tesis Doctoral*, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- [10] Ronchi V., 1991, *Optics, the science of vision* (Dover Publication, New York).
- [11] Rossi B., 1968, *Fundamentos de Óptica* (Ed. Reverté, Barcelona).
- [12] Salinas J., 1994, Las prácticas de física básica en laboratorios universitarios, *Tesis Doctoral*, Universitat de València, España.
- [13] Salinas J., Sandoval J., 1994, Filtros de colores y teorías intuitivas sobre color y visión, *Revista Española de Física*, **8**(4), 27-30.
- [14] Salinas J., Sandoval J., 1997, *Optica y visión: hacia un aprendizaje más integrado*, *Revista Española de Física*, **11**(1).

- [15] Salinas J., Sandoval J., 1999, Objetos e imágenes reales y virtuales en la enseñanza de la óptica geométrica, aceptado para publicación en la Revista de Enseñanza de la Física.
- [16] Sandoval J., Salinas J., 1995, Inversión y reversión en las imágenes formadas por espejos planos, Revista de Enseñanza de la Física, **8**(2), 29-36.
- [17] Taton R., 1975, *Historia general de las ciencias* (Ed. Destino, Barcelona).