

Una de las innovaciones más significativas de las últimas décadas en la enseñanza de ciencias consiste en el creciente interés de los investigadores por fundamentar la incorporación de un enfoque histórico a la educación científica. Si bien las opiniones pueden diferir acerca de la metodología precisa en que la historia ha de ser introducida en la enseñanza,¹ en la comunidad de investigadores en educación existe un consenso prácticamente unánime acerca de la importancia de la historia de la

COMPARACIÓN ENTRE LA FÍSICA ARISTOTÉLICA Y LA MECÁNICA CLÁSICA:

ALGUNOS PROBLEMAS DE INTERPRETACIÓN

Olimpia Lombardi

UNIVERSIDAD
DE BUENOS AIRES

1. En una reciente obra, Michael Matthews (1994) señala que existen dos formas en las cuales la historia de la ciencia ha sido incluida en los programas de ciencias: una es la aproximación minimalista, aditiva, la otra es la aproximación integral. En el primer caso, cuando se completa un curso de ciencia standard y no histórico, luego se agregan una o más unidades de historia de la ciencia; tales unidades pueden o no ser obligatorias. En el segundo caso, se integra la historia de la ciencia en el estudio de la ciencia natural; por ejemplo, la mecánica no aborda sólo las ecuaciones y el trabajo práctico, sino además cómo tales ecuaciones fueron desarrolladas y cómo los conceptos incluidos en ellas se formaron y fueron cambiando a través del tiempo.

2. No se resumirán aquí los elementos centrales del sistema físico aristotélico por tratarse de un tema extensamente abordado en la bibliografía especializada. Al respecto pueden consultarse los Capítulos 1, 2 y 3 de Kuhn (1957) y el Capítulo 1 de Cohen (1960).

ciencia para el proceso educativo.

En este contexto, la física aristotélica ha cobrado una singular relevancia: su redescubrimiento y revalorización a los fines didácticos se pone de manifiesto en los numerosos artículos que presentan los diferentes aspectos del sistema aristotélico. Así, por ejemplo, se ha recurrido a la física de Aristóteles para trazar la evolución del concepto de fuerza (Stinner, 1994), para comparar las distintas visiones del espacio a lo largo de la historia (Chandler, 1994), o para mostrar los puntos de contacto entre la concepción aristotélica del movimiento y las ideas precientíficas de sentido común (Ebison, 1993).

Si bien éstos y muchos otros análisis constituyen un importante aporte a la investigación en educación en ciencias, no pueden pasarse por alto ciertas precauciones: el estudio de la física aristotélica requiere la comprensión histórico-filosófica de la cosmovisión de la cual forma parte; las presentaciones fragmentarias o excesivamente simplificadas de un sistema tan fuertemente articulado como el aristotélico corren el riesgo de distorsionar los conceptos, interpretándolos desde el esquema conceptual de la física contemporánea. El objetivo del presente artículo consiste, precisamente, en señalar algunos desaciertos y confusiones que se originan a partir de una lectura parcializada de la obra de Aristóteles.²



*Mapa del ecúmeno
según Claudio Tolomeo*

La interpretación de la física aristotélica

En el clima actual de revalorización de la física aristotélica a los fines didácticos, muchos investigadores han abandonado la postura más fuertemente “presentista” en su interpretación de la historia de la ciencia: ya no se trata de evaluar la producción de Aristóteles con los patrones de la física actual, sino de rescatar la física aristotélica como un momento legítimo del devenir del pensamiento. No obstante, aun sin una evaluación negativa, la física aristotélica requiere un proceso interpretativo para su presentación. Es aquí, precisamente, donde comienzan a aparecer las dificultades. En muchos casos, las interpretaciones de la física aristotélica tienden a proyectar al pasado el esquema conceptual y formal de la ciencia actual, lo cual introduce fuertes distorsiones del pensamiento de Aristóteles. En otros casos, la presentación fragmentaria de un sistema tan fuertemente articulado sobre una concepción metafísica subyacente resulta en una incompreensión acerca del amplio alcance de la doctrina aristotélica.

Una de las confusiones más frecuentes en la interpretación de la física aristotélica consiste en comparar sus tesis con los resultados de la mecánica clásica respecto de una misma situación, como si existiera una estricta coincidencia temática entre ambas doctrinas. La perspectiva de Kuhn (1970), pone seriamente en crisis la idea de una asimilación temática: a partir de su tesis acerca de la inconmensurabilidad entre paradigmas, Kuhn sostiene que cada paradigma constituye las referencias semánticas de su propio lenguaje³; de este modo los científicos pertenecientes a distintos paradigmas categorizan la realidad de formas diferentes y, con ello, viven en “mundos distintos”; por lo tanto, dado que no existe un lenguaje observacional independiente de todo paradigma, los distintos paradigmas resultan totalmente inconmensurables entre sí, es decir, no existe un punto de vista “objetivo” y neutral desde el cual comparar cosmovisiones paradigmáticas diferentes.

Sin embargo, no es necesaria una estricta adhesión a la tesis kuhniana de la inconmensurabilidad para percibir las diferencias entre física aristotélica y mecánica clásica en relación a lo que Toulmin denomina sus respectivos “paradigmas explicativos” (Toulmin & Goodfield, 1961). Siempre que Aristóteles teoriza acerca de un cuerpo en movimiento lo compara con un objeto patrón con movimiento constante a través de un medio con resistencia constante. La diferencia radical entre el sistema dinámico aristotélico y el moderno consiste en que colocan ejemplos diferentes en el centro de sus representaciones teóricas: el ejemplo de Aristóteles es el de un cuerpo que se mueve contra una resistencia constante, mientras que el de Newton es el de un cuerpo que se mueve en ausencia de toda resistencia. Esta diferencia no es meramente casual; por el contrario, obedece a la profunda diferencia entre las cosmovisiones que brindan el marco conceptual a cada una de ambas teorías: Newton concibe un espacio infinito e ilimitado, en su mayor parte vacío, donde se ubican y mueven los objetos; el universo de Aristóteles, en cambio, es un universo totalmente **pleno plenum**, según la terminología medieval-, donde sólo es posible el movimiento por contacto. Pero la diferente elección de ejemplos en el centro de ambas representaciones teóricas responde también a la profunda ruptura epistemológica que se produce con el advenimiento de la ciencia moderna: Aristóteles concibe la física como la sistematización racional del comportamiento directamente observable de la naturaleza -la *phýsis*-, donde se requiere la aplicación continua de un esfuerzo para mantener los cuerpos en movimiento y donde nunca se observa un movimiento lineal indefinido; la física

3. Debido a su vaguedad, el concepto kuhniano de paradigma ha sido objetado desde la comunidad epistemológica. Sin entrar en el debate, puede considerarse que la amplia noción de paradigma incluye: teorías, métodos, esquema conceptual, cosmovisión filosófica, concepciones sociales y políticas e incluso creencias religiosas.



Grabado medieval que representa a Aristóteles.

moderna, en cambio, introduce el recurso a la idealización y a la modelización, que le permite operar, por ejemplo, con masas puntuales o cuerpos sin rozamiento, aún cuando tales entidades ideales no posean una existencia efectiva en el mundo empírico.

Otra frecuente distorsión en la presentación de la física aristotélica consiste en “traducir” sus principales tesis al lenguaje formal de la matemática. Las lecturas más simplistas atribuyen a Aristóteles el principio: “ $F = m \cdot v$ ”; quien interprete la teoría dinámica aristotélica de este modo la considerará totalmente errónea y estará predispuesto en su contra desde el comienzo. Pero tal interpretación es completamente inadecuada, pues pasa por alto que los términos “fuerza”, “masa” y “velocidad” comenzaron a adquirir sus actuales significados científicos recién en el siglo XVII; por lo tanto, su utilización para reconstruir la física de Aristóteles constituye un flagrante anacronismo. Versiones más sofisticadas (Stinner, 1994, p.78) presentan como una de las leyes aristotélicas del movimiento “ $v = K \cdot F/R$ ”, para indicar que la velocidad que adquiere un cuerpo es directamente proporcional a la fuerza que actúa sobre él e inversamente proporcional a la resistencia del medio que atraviesa.⁴ La utilización de este tipo de expresiones matemáticas a los fines didácticos no es en sí mismo un “pecado”: sin duda, esta forma de presentación torna más comprensible la física aristotélica para la mente actual, habituada a la formalización de la matemática. Pero no debe obviarse la aclaración de que se trata, nuevamente, de un anacronismo. Si bien Aristóteles fue el primero en avanzar hacia un lenguaje formal al introducir el uso de variables en sus obras, no sólo físicas sino también lógicas, jamás presentó sus tesis dinámicas bajo la forma de ecuaciones, sea expresadas en el lenguaje formal de la matemática o en el lenguaje natural de sus escritos. Sus conclusiones físicas se encuentran generalmente expresadas, no como leyes, sino como reglas de proporcionalidad; por ejemplo, al referirse a un cuerpo B, movido una distancia C en un tiempo D por un agente A, Aristóteles escribe:⁵

“Si A es el motor, B el objeto movido, C la distancia recorrida y D el tiempo, entonces en el mismo tiempo la misma fuerza A moverá $\frac{1}{2}$ B dos veces la distancia C, y en $\frac{1}{2}$ D moverá $\frac{1}{2}$ B la distancia completa C: entonces pues las reglas de proporcionalidad se cumplen. Nuevamente, si una fuerza dada mueve un objeto dado una cierta distancia en un cierto tiempo, y la mitad de la distancia en la mitad del tiempo, la mitad de la fuerza motriz moverá la mitad del objeto la misma distancia en el mismo tiempo. [...] la fuerza motriz es proporcional al peso; por lo tanto, cada fuerza causará que la misma distancia sea atravesada en el mismo tiempo.” (Física, 249b 30 - 250 a 9)

Tales reglas de proporcionalidad, en tanto meras reglas, no tienen el alcance de una ley física tal como se la concibe actualmente; por el contrario, tienen un rango de validez limitado en función del valor de las magnitudes involucradas. Por ejemplo, la regla de proporcionalidad referida en la cita previa se aplica en algunos casos:

“Si hay dos motores, cada uno de los cuales mueve separadamente uno de dos pesos una distancia dada en un tiempo dado, entonces las fuerzas en combinación moverán los pesos combinados la misma distancia en el mismo tiempo; puesto que en este caso las reglas de proporcionalidad se aplican.” (Física, 250a 25 - 28)

Pero en otros casos la proporcionalidad no se cumple. No siempre un agente produce movimiento; si la fuerza motriz es demasiado pequeña, no causará movimiento alguno:

“Pero si E mueve F una distancia C en un tiempo D, de ello no se sigue necesariamente que E pueda mover el doble de F la mitad de la distancia C en el mismo tiempo. Entonces, si A mueve B una distancia C en un tiempo D, no se sigue que E, siendo la mitad de A, en el tiempo D o en cualquier fracción de él, cause que B atraviese una parte de C [...] podría ser que no causara movi-

4. El autor reconoce que representa la acción de una fuerza sobre un objeto que se mueve en un dado medio “cometiéndolo un ligero anacronismo” (p.78).

5. Las citas de la *Física*, Libros I al IV, han sido tomadas de la edición castellana de Editorial Biblos, Buenos Aires, 1993-1995. Las citas de la *Metafísica* pertenecen a la edición castellana de Editorial Sudamericana, Buenos Aires, 1986. Las restantes citas han sido traducidas a partir de *The Complete Works of Aristotle. Revised Oxford Translation, edited by Jonathan Barnes* (1984); esta es la edición corregida y actualizada a la luz de recientes investigaciones de la versión original publicada en 12 volúmenes entre 1912 y 1954, editada por Ross, la cual es reconocida como la versión inglesa standard.

miento alguno; ya que, si una dada potencia motriz causa un cierto movimiento, no se sigue que la mitad de esa fuerza motriz causará movimiento en alguna cantidad o en algún intervalo de tiempo: si así fuera, un solo hombre podría mover un barco, puesto que tanto la fuerza motriz de los remeros como la distancia que el barco atraviesa por causa de ellos son divisibles en tantas partes como hombres haya.” (Física, 250 a 10 - 19)

Otro problema que suele surgir en la interpretación de la física aristotélica es el que deriva de una incorrecta asimilación entre los conceptos utilizados por Aristóteles y los conceptos pertenecientes a la mecánica clásica. Tal asimilación es el producto de proyectar al pasado el esquema conceptual de la ciencia actual. Un excelente ejemplo de esta situación es el que brinda el concepto de fuerza: cuando se interpretan las afirmaciones de Aristóteles en términos de una proporcionalidad entre fuerza y velocidad, suele pasarse por alto los diferentes sentidos que el concepto de fuerza posee en el sistema aristotélico y en la física actual. Ya en mecánica clásica, el término “fuerza” designa un concepto de un alto grado de abstracción, totalmente liberado de toda connotación antropomórfica que lo asocie a cualquier idea de esfuerzo ejercido por un agente; por otra parte, cobra un rol central el concepto de interacción, de acuerdo con el cual toda fuerza constituye siempre un elemento de un par acción-reacción simétrico. En cambio, para referirse a lo que considera la causa del movimiento, Aristóteles no utiliza un único término: palabras como “fuerza”, “fuerza motriz” o simplemente “potencia” se alternan en sus escritos para designar esa cualidad del cuerpo motor por la cual produce el movimiento de otro cuerpo. Lo que sí tienen en común todos estos términos es su asociación con la noción de un agente motor activo; el caso de los remeros mencionados en la última cita muestra que, para Aristóteles, el concepto de fuerza conserva aún ciertas connotaciones antropomórficas. Además, el concepto de interacción se encuentra totalmente ausente en el sistema físico aristotélico; el objeto sobre el cual actúa la fuerza es pasivo: si bien ofrece una cierta resistencia al movimiento, no “responde” sobre el motor con fuerza alguna. Por lo tanto, en esta concepción carente de interacciones, toda fuerza es un elemento activo de un encadenamiento causal lineal y asimétrico, una “cascada” de causas activas-efectos pasivos, donde cada efecto puede jugar el rol de causa activa sólo en relación con el siguiente eslabón de la cadena:

“Dado que todo lo que está en movimiento debe ser movido por algo, tomemos el caso de una cosa que está en movimiento y es movida por algo que también está en movimiento y que, nuevamente, es movido por otra cosa que está en movimiento, y ésta por otra cosa, y así sucesivamente; entonces la serie no puede seguir hasta el infinito, sino debe existir algún primer motor.” (Física, 242a 50 - 54) ⁶

Otro caso en el que debe recordarse la diferencia en el contenido de los conceptos es el que se refiere a la noción de espacio. Mientras el espacio newtoniano es la expresión física del espacio euclídeo, infinito e ilimitado en todas sus direcciones, el espacio aristotélico es finito y se encuentra limitado por la superficie externa de las estrellas fijas; fuera de tal esfera no hay nada, ni materia ni espacio, o, en terminología del propio Aristóteles, ni “sustancias materiales” ni “lugar”. ⁷ Por otra parte, el espacio newtoniano es físicamente neutro, esto es, es un sustrato inerte para todos los cuerpos. Todo punto del espacio es semejante a cualquier otro. Un cuerpo debe estar localizado en el espacio y moverse a través del espacio, pero el lugar particular que ocupa y la dirección particular de su movimiento no ejercen influencia alguna sobre él; en terminología actual, el espacio es homogéneo e isótropo: no hay “arriba” ni “abajo”, no hay dirección privilegiada. Por el contrario, el espacio aristotélico es no-homogéneo y anisótropo: ciertas regiones y ciertas direcciones difieren en forma cualitativa de las restantes, y tales diferencias determinan parcial-

6. Si bien en este caso Aristóteles se refiere al encadenamiento de causas eficientes, lo dicho es válido para todo tipo de causa (los cuatro tipos de causa se presentarán más adelante). Además, Aristóteles ofrece varios argumentos para sostener que, en cualquier caso, el encadenamiento de causas no puede ser infinito; cfr., por ejemplo, *Metafísica*, 994a 1-11.

7. “A partir de nuestros argumentos entonces se hace evidente, no sólo que no hay, sino además que nunca puede originarse cuerpo alguno fuera de la circunferencia. Ya que el universo como un todo contiene toda la materia [...]. Por lo tanto, ni existe ahora, ni ha existido jamás, ni puede formarse nunca más de un único cielo; por el contrario, este nuestro cielo es uno, único y completo. Es entonces evidente que tampoco existe lugar o vacío o tiempo fuera del cielo.” (*De Caelo*, 279a 6 - 13)

8. "Además, las traslaciones de los cuerpos físicos simples, como fuego, tierra y semejantes, ponen de manifiesto que el lugar no sólo es algo existente, sino también que posee cierta potencia. En efecto, de no haber impedimento, se traslada cada uno de ellos a su lugar propio, lo uno hacia arriba, lo otro hacia abajo. Estas son partes o especies de lugar, es decir, arriba, abajo y el resto de las seis dimensiones. Y, entonces, distinciones tales como arriba-abajo y derecha-izquierda no son sólo relativas a nosotros. En efecto, mientras que para nosotros no resultan siempre las mismas, sino que son relativas a la posición hacia la cual nos volvemos [...], en la naturaleza, en cambio, cada una de ellas está determinada de modo independiente. En efecto, arriba no es un lugar que se determine azarosamente, sino aquél hacia donde se traslada el fuego y lo liviano, y, de modo semejante, tampoco abajo es un lugar azarosamente determinado, sino aquél hacia donde se trasladan las cosas que poseen peso, es decir, las de constitución terrosa, de manera que estas distinciones no se establecen sólo por la posición sino también por la potencia." (*Física*, 208b 9 - 22)

9. "Respecto de lo pesado y lo liviano, debemos preguntarnos qué son los cuerpos así llamados, cómo es su naturaleza, y cuál es la razón de que posean esas potencias. La consideración de esas cuestiones es una parte propia de la teoría del movimiento, dado que calificamos las cosas como pesadas o livianas debido a que poseen la potencia de ser movidas de una cierta manera." (*De Caelo*, 307b 28 - 32)

10. "Tales son el aire y el agua. Ninguno de ellos es ni absolutamente liviano ni absolutamente pesado. Ambos son más livianos que la tierra -pues cualquier porción de cualquiera de ellos se eleva hacia la superficie de la tierra- pero son más pesados que el fuego, dado que una porción de cualquiera de ellos, sea cual sea su cantidad, se hunde en el fondo del fuego." (*De Caelo*, 311a 24 - 27).

11. En realidad, para comparar los volúmenes de la madera y del plomo Aristóteles utiliza antiguas medidas de capacidad; la traducción ha sido adaptada para facilitar la comprensión del lector actual.

mente el comportamiento de los cuerpos. En términos aristotélicos, el "lugar" ejerce una influencia sobre los cuerpos pues los distintos lugares poseen distintas "potencias".⁸ Según Kuhn (1957, Cap.3), en relación al espacio newtoniano, el espacio aristotélico está más cerca de lo que podría denominarse un espacio vital: el espacio de una habitación, de una casa o de una comunidad, esto es, el espacio dinámico activo de la vida cotidiana, donde lugares distintos tienen características diferentes.

La finitud, la no-homogeneidad y la anisotropía del espacio aristotélico se encuentran fuertemente articuladas entre sí y, a su vez, guardan una estrecha relación con la teoría de los lugares naturales. Un espacio infinito no tiene centro y, por tanto, no existe ningún criterio no arbitrario para fijar un lugar privilegiado donde puedan acumularse la tierra y el fuego, ni para definir ciertas direcciones intrínsecas "hacia arriba" y "hacia abajo" propias de los movimientos naturales. En efecto, en un espacio infinito, homogéneo e isótropo no hay "lugar natural", pues todos sus puntos y direcciones son cualitativamente idénticos a todos los demás.

En este universo finito, no-homogéneo y anisótropo, regido por cadenas causales lineales y asimétricas, el concepto de peso también se diferencia claramente del análogo concepto en la física actual. En la mecánica clásica, el peso es la fuerza que actúa sobre un cuerpo como resultado de su interacción con la Tierra u otro planeta, y su magnitud depende de las masas de ambos cuerpos y de la distancia entre ellos. Para Aristóteles, en cambio, no hay un único concepto sino dos conceptos diferentes: "pesantez" y "livianidad":

"Afirmo que existen esos dos tipos de cuerpos, y que no es el caso, como algunos sostienen, de que todos los cuerpos tengan peso." (De Caelo, 311b 16 -17)

Tales cualidades de los objetos no dependen de interacción alguna sino son "potencias" intrínsecas de los mismos, que los hacen moverse naturalmente de un cierto modo.⁹ A su vez, Aristóteles diferencia dos sentidos de "pesantez" y "livianidad", un sentido absoluto y un sentido relativo:

"Las cosas son calificadas como pesadas o livianas absolutamente en relación con alguna otra cosa. Dadas dos cosas pesadas, como la madera y el bronce, decimos que la primera es relativamente liviana y la otra relativamente pesada. [...] Hay cosas cuya naturaleza constante es alejarse del centro, mientras otras se mueven constantemente hacia el centro. [...] Por lo tanto, con absolutamente liviano nos referimos a aquello que se mueve hacia arriba o hacia el extremo, y con absolutamente pesado a aquello que se mueve hacia abajo o hacia el centro. Dados dos cuerpos dotados de peso y del mismo tamaño, con más liviano o relativamente liviano nos referimos a aquél que es superado por el otro en la velocidad de su movimiento natural hacia abajo." (De Caelo, 308a 7 - 33)

Las palabras de Aristóteles muestran claramente que, si bien relativamente puede decirse que un cuerpo es más liviano que otro, desde un punto de vista absoluto pesantez y livianidad son cualidades sin gradación, intrínsecas al objeto, que indican la tendencia a moverse hacia el centro o la periferia del espacio. Los conceptos de pesantez y livianidad no sólo son una parte central de la teoría del movimiento, sino además se encuentran estrechamente vinculados con la teoría aristotélica de los cuatro elementos; mientras la tierra es "absolutamente pesada" y el fuego es "absolutamente liviano", el agua y el aire sólo poseen peso y livianidad relativa.¹⁰ Los cuerpos compuestos, por su parte, serán relativamente pesados o relativamente livianos según sea su composición y la composición del medio en el que se encuentran:

"Es debido a las propiedades de los elementos que un cuerpo considerado liviano en un lugar es considerado pesado en otro, y viceversa. Por ejemplo, en el aire un cierto volumen de madera es más pesado que un volu-

men mucho menor de plomo, pero en el agua el trozo de madera es el más liviano.” (De Caelo, 311b 1 - 4) ¹¹

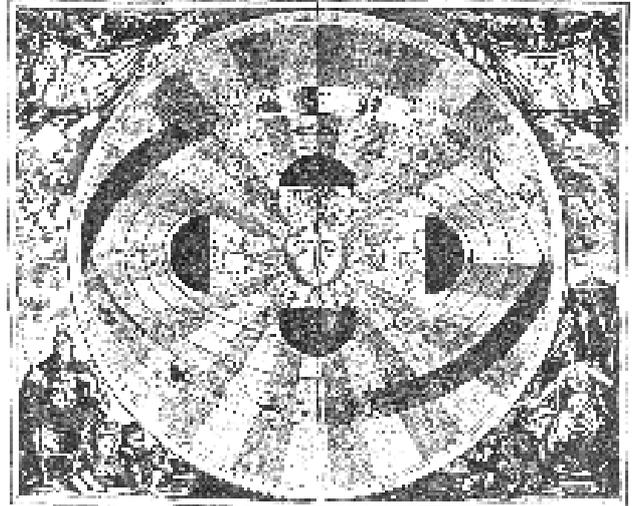
En esta cosmovisión donde puede operar la teoría de los lugares naturales gracias a la concepción de un espacio finito, no-homogéneo y anisótropo, el propio concepto de planeta cambia respecto de la noción moderna. La palabra “planeta” deriva de un término griego que significa “vagabundo”, expresión empleada aún en épocas posteriores a Copérnico para designar los cuerpos celestes dotados de movimiento relativo respecto de las estrellas fijas. Para los griegos, el Sol era uno de los siete planetas; los restantes eran la Luna, Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno; las estrellas y estos siete planetas eran los únicos cuerpos celestes conocidos en la Antigüedad. Dado este contenido del concepto de planeta, en el marco del sistema aristotélico la Tierra no es un planeta, debido a su estado de reposo en el centro del universo. Las razones de Aristóteles en favor de una Tierra esférica y en reposo en el centro del universo ponen de manifiesto, una vez más, la fuerte articulación del sistema; sobre la base de la interdependencia entre física y astronomía, las tesis astronómicas reciben apoyo no sólo de consideraciones astronómicas, sino fundamentalmente de argumentos de orden físico. En efecto, el estado de reposo y la esfericidad de la Tierra son demostrados en base a la teoría de los lugares naturales y a la teoría de los cuatro elementos:

“Sobre la base de lo que hemos dicho, la explicación de la inmovilidad de la Tierra es también evidente. Si es la naturaleza de la tierra, como muestra la observación, moverse desde cualquier punto hacia el centro [...], es imposible que cualquier porción de tierra se aleje del centro salvo que sea forzada a ello. [...] Por lo tanto, si ninguna porción de tierra puede alejarse del centro, obviamente aún menos puede la Tierra como un todo moverse de tal modo. Ya que es la naturaleza del todo moverse hacia el punto al que se mueven naturalmente las partes. [...] Su forma debe necesariamente ser esférica. [...] Si las partes se mueven de un modo similar desde cualquier lugar hacia un único centro, es obvio que la masa resultante debe ser similar en todos sus lados. Ya que si alrededor se agregan cantidades iguales, la superficie del cuerpo será en todas partes equidistante del centro, esto es, su figura será esférica.” (De Caelo, 296b 25 - 297a 26)

A su vez, la posición central de la Tierra responde, además, a la concepción aristotélica de un espacio no-homogéneo que posee posiciones privilegiadas: no es correcto pensar que el centro del universo se encuentra en el centro de la Tierra; por el contrario, es la Tierra que ocupa ese peculiar lugar debido a su propia composición:

“El movimiento natural de la Tierra, de sus partes como del todo, es hacia el centro del universo [...] pero podría preguntarse, dado que ambos centros son el mismo, qué centro es aquél hacia el cual por naturaleza se mueven las porciones de tierra y las otras cosas pesadas. ¿Tal punto es su meta porque es el centro de la Tierra o porque es el centro del universo? La meta, sin duda, debe ser el centro del universo.[...] Por lo tanto, se mueven hacia el centro de la Tierra, pero accidentalmente, debido al hecho de que el centro de la Tierra descansa en el centro del universo.” (De Caelo, 296b 6 - 17)

Por lo tanto, si la Tierra fuera desplazada de la posición que efectivamente ocupa, volvería a su posición original debido al movimiento natural de sus partes constituidas por el elemento tierra. ¹² La tesis de una Tierra inmóvil y radicalmente ajena al concepto de planeta ocupa un lugar central en la cosmovisión aristotélica, debido a su fuerte articulación con las restantes par-



Representación de las posiciones relativas de la Tierra y el Sol, según el sistema de Copérnico, en "Harmonia Macrocosmica", de Cellari (Amsterdam, 1661).

12. "Si se moviera la Tierra para ubicarla en el lugar en el que ahora está la Luna, cada uno de los diversos fragmentos de tierra se movería, no hacia la Tierra, sino hacia el lugar en el cual ella se encuentra ahora." (De Caelo, 310b 2 - 5)

tes del sistema. Según Kuhn (1957, Cap. 3), el sistema de Aristóteles pudo resistir las ligeras modificaciones que fueron introduciéndose durante el Medioevo; si embargo, el universo aristotélico no puede resistir, como de hecho no resistió, la modificación que convierte a la Tierra en un planeta.

Otro concepto que frecuentemente ofrece dificultades de interpretación en el marco de la filosofía natural de Aristóteles es el concepto de vacío. La inexistencia de vacío en el universo aristotélico no implica en modo alguno que el propio concepto de vacío fuera inconcebible para Aristóteles, si con ello se entiende que el concepto no puede ser pensado o, incluso, no existe un término para designarlo. Por el contrario, Aristóteles brinda una definición explícita del concepto:

"[...] se dice vacío a aquello en lo cual la presencia de un cuerpo, si bien no actual, es posible." (De Caelo, 311a 24 - 27)

Incluso, en algunas de sus diversas demostraciones de la inexistencia del vacío, Aristóteles utiliza el método de reducción al absurdo que consiste, precisamente, en suponer lo contrario de lo que se pretende demostrar para concluir en una contradicción; así, por ejemplo, supone la inexistencia del vacío para arribar a la inaceptable conclusión de que un cuerpo recorre la misma distancia en el mismo tiempo tanto en el caso de atravesar un cierto medio como en el caso de atravesar el vacío.¹³ Sin embargo, la inexistencia del vacío no es un hecho meramente accidental o contingente en el sistema aristotélico, ni cumple sólo la función de hipótesis *ad hoc* para explicar la permanencia del movimiento de proyectiles en función del reemplazo mutuo. Por el contrario, el *plenum* juega un rol fundamental en el conjunto de la filosofía natural de Aristóteles, pues guarda estrechos vínculos con diversos aspectos del sistema. Por ejemplo, además del caso de los proyectiles, la tesis de la inexistencia del vacío se articula con la teoría del movimiento forzado -pues todo cuerpo se mueve en un medio que ofrece resistencia-, con la tesis de la unidad y finitud del universo -si el vacío existiera, la materia podría estar limitada por el vacío y éste, a su vez, por la materia, y nada acotaría esta cadena- y con el movimiento general del universo transmitido por contacto desde la esfera de las estrellas fijas hacia los caparazones interiores -si uno de los caparazones quedara reemplazado por el vacío, se rompería la cadena de transmisión del movimiento-. Para Kuhn (1957, Cap.3), dada la multifacética función desempeñada por la idea de la inexistencia del vacío en el pensamiento de Aristóteles, el *plenum* aristotélico resulta ser el concepto más adecuado para poner de manifiesto la gran coherencia de su cosmovisión.

Es precisamente esta gran coherencia interna la que se pierde de vista cuando se asimilan nociones aristotélicas y nociones científicas modernas sin considerar que pertenecen a universos conceptuales diferentes. Si se pasa por alto la profunda diferencia entre las cosmovisiones aristotélica y moderna no se comprende, por ejemplo, qué hay de objetable en la conclusión de Aristóteles acerca de la velocidad infinita que alcanzaría un cuerpo en el vacío al ser sometido a una fuerza:

"[...] si un móvil realiza sobre el medio menos denso de todos un determinado movimiento de traslación en un tiempo dado, excederá toda proporción respecto de una traslación a través del vacío." (Física, 215b 22 - 23)

Tal conclusión, si bien concuerda con los resultados newtonianos, tiene un significado muy diferente y cumple un rol radicalmente distinto en el sistema aristotélico; sólo una comprensión global de ambos sistemas permite explicar por qué Aristóteles, habiendo concebido la po-

13. "Sea F un vacío de igual extensión que los medios B y D [...]. Por lo tanto, <el móvil> recorrerá F en igual tiempo tanto si está lleno como si está vacío. Pero esto es imposible." (Física, 215b 1 - 216a 4)



sibilidad de una velocidad infinita en el vacío, rechazó una idea que terminó siendo una consecuencia del sistema científico adoptado más de veinte siglos después.

Aristóteles: física y metafísica

En las presentaciones tradicionales de la física de Aristóteles suele pasarse por alto la estrecha relación entre su filosofía natural y el resto de su pensamiento filosófico. En particular, no se toma en consideración que la totalidad del sistema aristotélico se encuentra profundamente arraigado sobre una base metafísica que brinda unidad y coherencia al conjunto. Ampliamente difundida en la comunidad científica actual, la idea de una radical ruptura conceptual entre física y metafísica contribuye a aislar el pensamiento físico de Aristóteles del resto de su doctrina filosófica. Pero, precisamente, esto es lo que debe evitarse, pues conduce a serias dificultades de interpretación.

La teoría aristotélica del movimiento se enmarca en una teoría general del cambio, que pretende dar cuenta de cambios de muy distinta índole, aún cuando se trate de cambios cualitativos no abordables en términos numéricos. Con su abarcativa mirada de filósofo natural, que no sólo es físico sino también biólogo, Aristóteles percibe que las entidades pueden cambiar de modo muy diferente: los seres animados nacen, crecen y mueren, los objetos cambian de tamaño, color, forma, posición, etc. De este modo, Aristóteles distingue cuatro tipos de cambio: generación o corrupción, aumento o disminución, alteración y traslación.¹⁴ Por lo tanto, el movimiento o traslación constituye un tipo particular de cambio: el cambio de "lugar" o, en términos actuales, de posición.

A su vez, la teoría aristotélica del cambio se correlaciona con su concepción de la causalidad: todo cambio obedece a una causa; el conocimiento consiste, precisamente, en conocer las causas de lo que es y lo que acontece (cfr. *Metafísica*, I, 1). Pero el concepto de causa es, en Aristóteles, mucho más amplio que el actual; Aristóteles distingue cuatro tipos de causa: formal, material, eficiente y final.

"Hablamos de causa en cuatro sentidos diferentes. En primer lugar, decimos causa a la ousía [...]; en segundo lugar, causa es la materia o el sustrato; en tercer lugar es el principio del cambio y, en cuarto lugar, a menudo opuesto al tercero, es el fin y el bien (pues éste es el fin de todo devenir y de todo cambio)." (*Metafísica*, I, 3, 983a 25 - 32)

Así, por ejemplo, la causa eficiente de un hombre particular es su padre, la causa material es aquello de lo cual está hecho, la causa formal es la propia esencia o naturaleza de ser humano y la causa final es realizarse como tal. Las causas formal y final tienden a identificarse, pues mientras la causa formal es la propia naturaleza, esencia o "forma"¹⁵ de la entidad considerada, la causa final, su fin, es precisamente realizar o actualizar tal esencia.

En el mundo sublunar al cual se refiere la física, todo cambio puede darse de modo natural o violento.¹⁶ En efecto, un animal puede nacer, crecer o morir de acuerdo con su propio ciclo biológico; pero también puede suceder que alguien lo mate antes de llegar a su edad adulta. Esto muestra que el cambio natural y el cambio violento requieren explicaciones diferentes. Para explicar el cambio natural de una entidad es necesario mostrar que tal entidad cambia según el principio de cambio propio de su naturaleza, esencia o "forma".¹⁷ Por el contrario, para explicar el cambio violento es necesario señalar el o los agentes externos responsables de tal cambio. Así, respecto del caso particular del cambio de posición, Aristóteles afirma:

"Todo lo que está en movimiento debe ser movido por algo, ya que si no posee la fuente de su movimiento en sí mismo, es evidente que es movido por

14. "[...] hay cuatro tipos de cambio: respecto del esto, de la cualidad, de la cantidad o del lugar (el cambio respecto del esto es la generación y la corrupción en sentido propio; el cambio respecto de la cantidad es el aumento y la disminución; el cambio según la cualidad, la alteración y respecto del lugar, la traslación o movimiento)" (*Metafísica*, 1069b 8 - 13)

15. El término original utilizado por Aristóteles es *ousía*. Entre los especialistas se han suscitado numerosas controversias filosóficas y filológicas acerca de la mejor traducción del término *ousía*. Sin entrar en el debate, para comprender este concepto puede considerarse que *ousía* es aquello que hace que un ente particular sea lo que es.

16. En el mundo supralunar no existe otro cambio más que el movimiento circular uniforme; los cielos son inalterables e incorruptibles.

17. "Entre los entes, algunos son por naturaleza; otros, en cambio, por otras causas. Por naturaleza son los animales y sus partes, las plantas y los cuerpos simples, vgr. tierra, fuego, aire y agua [...]. Todas estas cosas, evidentemente, se diferencian de las que no están constituidas por naturaleza, ya que cada una de ellas tiene en sí misma el principio del movimiento y del reposo: unas en cuanto al lugar, otras en cuanto al aumento y la disminución, otras en cuanto a la alteración [...]. Porque la naturaleza es cierto principio o, más precisamente, es causa del movimiento o del reposo [...] Pero no sólo estas cosas son conformes a la naturaleza, sino también todos aquellos atributos que por sí les pertenecen, vgr. al fuego trasladarse hacia arriba." (*Física*, 192b 9 - 193a 1). Aquí Aristóteles utiliza el término griego correspondiente a "movimiento" para referirse al concepto general de cambio; tal terminología es frecuente en la *Física*.

algo distinto de sí." (*Física*, 241b 34 - 36)

Ahora bien, el hecho de que el cambio natural no requiera de un agente externo para producirse, no significa que sea incausado. Una entidad que cambia naturalmente responde al principio de cambio propio de su naturaleza o esencia: dicha esencia constituye la causa formal de tal entidad desarrollando su peculiar cambio natural; la causa final del cambio será, entonces, la realización de tal esencia. Precisamente por ello se puede tener un conocimiento acerca de los cambios naturales, pues conocer es explicar a través de las causas. En particular, cada entidad sublunar cambia naturalmente de posición de acuerdo con su propia esencia la cual, a su vez, depende de su composición en los cuatro elementos (*cf. De Caelo*, IV). Precisamente gracias a su pormenorizado tratamiento de la composición de los cuerpos, Aristóteles considera poseer un conocimiento que le permite brindar la explicación -que siempre es causal- del movimiento natural. El desconocimiento de este sustrato metafísico puede conducir a una errónea interpretación del movimiento natural como movimiento incausado (*cf. Stinner*, 1994, p.78), o a la infructuosa búsqueda de fuerzas "internas" al objeto que den cuenta del movimiento natural (*cf. Ebison*, 1993, p.347), tesis ambas totalmente ajenas al pensamiento aristotélico.

Conclusiones

En el marco de la actual revalorización de la historia para la enseñanza de ciencias, y abordando, en particular, la física aristotélica, el presente artículo intenta haber contribuido en los siguientes aspectos:

Alertar respecto de las confusiones interpretativas que surgen de proyectar el esquema conceptual de la ciencia actual a la física aristotélica, perdiendo de vista la filosofía natural de Aristóteles en su conjunto.

Poner de manifiesto la necesidad de comprender las bases metafísicas sobre las que se asienta el sistema aristotélico.

A su vez, las numerosas citas textuales de las obras de Aristóteles responden al interés de promover un retorno a las fuentes: el acceso a los originales resulta siempre una experiencia intelectual enriquecedora, no sólo porque permite disipar muchas dudas interpretativas, sino principalmente porque muestra el pensamiento del autor "en acción".

Referencias Bibliográficas

- Aristóteles (1984), *The Complete Works of Aristotle. Revised Oxford Translation*, Jonathan Barnes ed., Princeton University Press, Princeton NJ.
- Aristóteles (1986), *Metafísica*, Traducción introducción y exposiciones: Hernán Zucchi, Editorial Sudamericana, Buenos Aires.
- Aristóteles (1993), *Física. Libros I - II*, Traducción, introducción y comentario: Marcelo Boeri, Editorial Biblos, Buenos Aires.
- Aristóteles (1995), *Física. Libros III - IV*, Traducción, introducción y comentario: Alejandro Vigo, Editorial Biblos, Buenos Aires.
- Cohen, Bernard I. (1960), *The Birth of a New Physics*, Doubleday & Co., New York.
- Chandler, Marthe (1994), "Philosophy of Gravity: Intuitions of Four-Dimensional Curved Spacetime", *Science & Education*, Vol.3, pp.155-176.
- Ebison, Maurice G. (1993), "Newtonian in Mind but Aristotelian at Heart", *Science & Education*, Vol.2, pp.345-362.
- Kuhn, Thomas S. (1957), *The Copernican Revolution*, Random House, New York.
- Kuhn, Thomas S. (1970), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago (1º ed., 1962).
- Matthews, Michael R. (1994), *Science Teaching. The Role of History and Philosophy of Science*, Routledge, New York.
- Stinner, Arthur (1994), "The Story of Force: from Aristotle to Einstein", *Physics Education*, Vol.29, pp.77-85.
- Toulmin, Stephen & Goodfield, June (1961), *The Fabric of the Heavens*, Hutchinson, London.