

Cambios en el sentido del concepto astronómico Horizonte durante la modernidad

Autor:

Szapiro, Anibal

Tutor:

Levinas, Marcelo Leonardo

2016

Tesis presentada con el fin de cumplimentar con los requisitos finales para la obtención del título Doctor de la Facultad de Filosofía y Letras de la Universidad de Buenos Aires en Historia.

Posgrado

The history of astronomy is a history of receding horizons

E. Hubble

ÍNDICE

Agradecimientos	3
Introducción	4
In.1) Delimitación del objeto de estudio.....	4
In.2) Tesis sostenidas	10
In.3) Estructura del trabajo.....	12
In.4) Aspectos teórico-metodológicos	15

PRIMERA PARTE

Capítulo 1 Origen y consolidación de la concepción ptolemaica de <i>horizonte</i> ... 19	
1.1) Primeros usos del término "horizonte"	20
1.2) El horizonte como dato	25
1.3) Uso y sentido ptolemaico del concepto <i>horizonte</i>	27
Capítulo 2 El <i>horizonte</i> y el heliocentrismo (I): la <i>solución copernicana</i>	37
2.1) La recepción medieval del concepto ptolemaico.....	38
2.2) Los fundamentos del sistema copernicano.....	40
2.3) Los problemas astronómicos del sistema copernicano	45
2.4) Algunas consecuencias de la solución copernicana	50
Capítulo 3 El <i>horizonte</i> y el heliocentrismo (II): la <i>solución galileana</i>	52
3.1) La recepción de la solución copernicana	53
3.2) La respuesta de Galileo a las objeciones.....	56
3.3) El quiebre de la solución galileana	62

SEGUNDA PARTE

Capítulo 4 La dimensión óptica de la experiencia de la bisección	64
4.1) La refracción en la observación celeste	65
4.2) La refracción atmosférica en la astronomía antigua	69
4.3) Desarrollo histórico de la escisión antigua	75
4.4) La ruptura kepleriana	77
4.5) El papel de la observación	80
Capítulo 5 La crucialidad de la experiencia de la bisección	83
5.1) Las experiencias cruciales	84
5.2) El planteo ptolemaico como experiencia crucial.....	85
5.3) La descrucialización copernicana.....	88
5.4) La descrucialización galileana	92
5.5) Parangón con el experimento de la torre	97
5.6) Las interpretaciones naturales.....	100
5.7) La existencia de experiencias cruciales	102

Capítulo 6 Representación y explicación del cambio conceptual	105
6.1) La historia cognitiva	106
6.2) Los frames	107
6.3) Los <i>dynamic frames</i>	110
6.4) Los conceptos subordinados y el concepto superordinado.	113
6.5) Atributos y valores	115
6.6) Construcción del <i>dynamic frame</i>	117
6.7) Consideraciones en torno al éxito descriptivo	124
6.8) La aspiración explicativa de los <i>DF</i>	125
6.9) Consideraciones sobre el éxito explicativo	126

TERCERA PARTE

Capítulo 7 Horizontes en la exploración ultramarina	130
7.1) La cosmografía y sus vínculos con la astronomía	131
7.2) La cosmografía y el cálculo de la longitud	135
7.3) Las dificultades técnicas y la importancia de la refracción	144
7.4) Consecuencias conceptuales de la <i>revolución cosmográfica</i>	146
Capítulo 8 Horizontes metafísico-teológicos	151
8.1) Percepciones historiográficas	152
8.2) Nicolás de Cusa	153
8.3) Giordano Bruno.....	160
8.4) La astronomía como limitación	164
Capítulo 9 Horizontes artísticos.....	166
9.1) Ciencia y arte en el Renacimiento	167
9.2) La perspectiva <i>artificialis</i>	169
9.3) La idea proyectiva y el horizonte	175
9.4) Galileo y la idea proyectiva	177
9.5) Interacciones disciplinares	179
Conclusiones.....	183
Apéndice.....	190
Ap.1) Nociones preliminares	191
Ap.2) El argumento.....	199
Ap.3) Los supuestos	214
Ap.4) El texto	224
Ap.5) Los comentarios.....	226
Referencias bibliográficas.....	232

AGRADECIMIENTOS

Perseguir el horizonte sin perder (del todo) el rumbo fue posible por estar rodeado de buenas personas. A ellas, este agradecimiento.

A mis afectos. A mi viejo, que me enseñó a leer. A mi vieja, que me enseñó a escribir. A Laura, que me enseñó a desconfiar de lo que nos enseñaban nuestros viejos. A Julieta y Natalia, que me enseñaron a desconfiar de lo que yo les enseñaba. A Vanesa, que me devolvió la confianza en mí. A Francisca y Félix, por los momentos de juego. A mis amigos y amigas, piezas invaluableles en este proceso por momentos tan solitario. En especial a Pablo, compañero de aventuras, y a toda la familia Vainman, por su inmensa generosidad.

A mis maestros y colegas. A mi director, Leonardo Levinas, por invitarme a mirar el cielo. A mi codirector, Alejandro Cassini, por intentar mantener mis pies en la Tierra. A Eduardo Glavich, por su predisposición. A Roberto Casazza, por su audacia. A Silvina Vidal, por sus eruditas sugerencias. A Cristián Carman, Marina Rieznik, Diego Pelegrín, Gonzalo Recio, Damián Fernández Beanato, Maximiliano Bozzolli, Alan Heiblum y Godfrey Guillaumin, por sus valiosos comentarios a los avances (y retrocesos) de este trabajo.

A mis estudiantes, porque hicieron que la *historia* de la *astronomía* tuviera mucho más que ver con el *aquí* y el *ahora*.

INTRODUCCIÓN

In.1) Delimitación del objeto de estudio.

Comencé esta investigación con el objetivo de estudiar los cambios en el concepto *Tierra* entre 1440 y 1687. Mi interés estaba centrado inicialmente en definir los modos en los que el conocimiento astronómico se había articulado con otros conocimientos disciplinares para dar curso a un cambio en el concepto *Tierra* durante la Modernidad: de centro inmóvil del mundo a un planeta del sistema solar en algún punto no privilegiado de un universo infinito e isótropo. Con el correr del tiempo y la profundización de la investigación, el diálogo con las fuentes me fue conduciendo a una re-definición del objeto de estudio en un concepto que se exhibía aún más fértil para comprender el mismo proceso que estaba pretendiendo caracterizar: el concepto *horizonte*.

La importancia contemporánea del concepto *horizonte* es innegable. Prácticamente todos los manuales técnicos de cosmología tienen al menos una sección o capítulo destinado a elucidar los diferentes sentidos que asume en la actualidad (por ejemplo, Harrison 2000). Pero esa relevancia contemporánea no impulsó hasta ahora estudios sobre el desarrollo del concepto a lo largo de la historia de la astronomía.

En los últimos años, comenzamos a estudiar el desarrollo del concepto *horizonte* y mostramos que su relevancia preexistía a la otorgada por la física contemporánea y que tenía una historia rica y compleja (Levinas y Szapiro 2012). Establecimos que si bien a primera vista el concepto astronómico *horizonte* no parecía ofrecer resistencia a ser definido para toda la historia de la astronomía como “aquello que divide lo que se observa de lo que no”, definiciones con tales características otorgaban sentidos muy diversos al concepto *horizonte* según las ideas que del cielo (o del universo) y de la Tierra se tuvieran. Justificaré sucintamente tal consideración.

De la lectura de las fuentes griegas puede inferirse que el horizonte comenzó a ser entendido en la antigüedad como un *círculo* tangencial a la superficie terrestre con centro en un observador; ese círculo establecía un límite por encima del cual dicho observador no percibía más superficie terrestre y debajo del cual no percibía más el cielo. Esta concepción supuso una relativización respecto de nociones pretéritas —previas al uso del término “horizonte”—, como las que pueden hallarse en fuentes mesopotámicas, que permiten suponer que el límite visual para ciertas concepciones se correspondía con el límite físico de la Tierra con el cielo¹. Aun así, si bien para los griegos el horizonte dependía de la posición del observador sobre la Tierra y no era entendido como el límite físico, sí remitía a un límite real constituido por la esfera de las estrellas fijas. Esto permitía suponer que si bien no toda la información celeste estaba disponible para un observador en un mismo instante, nada impedía que al cabo de un tiempo determinado, toda la información visible fuera observada por un observador (siempre que pudiera desplazarse o que se encontrara situado sobre la línea del ecuador terrestre²). Una vez transcurrido ese tiempo, la información no aumentaría. Así, el horizonte obraba exclusivamente como un límite momentáneo que delimitaba un cielo observado de uno no observado, pero suponía a la vez que todo el cielo era observable. Por otra parte, los fenómenos asociados al horizonte constituirían desde los griegos (y durante toda la Edad Media) prueba suficiente de que la Tierra era esférica, de que su radio era despreciable

¹ Me refiero, por ejemplo, a una suerte de horizonte *cosificado/personificado/deificado* que puede ser reconstruido en el poema babilonio *Enuma Elish*. Este poema, cuyo nombre significa “allá en lo alto”, data aproximadamente del año 1200 a. C. y relata el origen del universo. Allí, dos dioses, Anshar y Kishar, tienen un lugar muy relevante en el relato: a ellos solo preexisten el caos originario y los dioses principales y fueron ellos quienes engendraron al cielo, que luego engendró a la Tierra. De acuerdo con algunas interpretaciones del poema (Jacobsen 1957), Anshar y Kishar serían la personificación de un anillo -al que se puede asociar con el posterior concepto *horizonte-*, siendo Anshar su parte femenina-celeste y Kishar su parte masculina-terrestre. En una concepción como esta, el límite real de la Tierra funcionaría como fundamento de un límite aparente.

² Para comprender la necesidad de tal desplazamiento o de la posición específica del observador, es necesario conocer el movimiento aparente del cielo. Al respecto, véase “Nociones preliminares” en el Apéndice (Ap. 1).

comparado con el de la esfera de las estrellas fijas y de que se encontraba situada en su centro.

En el contexto del heliocentrismo moderno se abandonó tal pretensión. Los defensores del movimiento terrestre buscaron argumentar que los fenómenos asociados al horizonte no constituían prueba de que la Tierra se encontrase en el centro de la esfera de las estrellas fijas. En los primeros intentos, como el protagonizado por Nicolás Copérnico (1473-1543), el concepto *horizonte* continuó siendo muy similar al ptolemaico. En su obra existió un esfuerzo por desarticular los argumentos que conducían a que el horizonte definiera la centralidad de la Tierra, pero sin objetar la relevancia de los argumentos que lo utilizaban. Diferente fue la estrategia que se consolidó a principios del siglo siguiente, protagonizada por Galileo Galilei (1564-1642). Esta nueva solución necesitó trastocar el entramado conceptual sobre el que estaba montado el anterior concepto, modificando no solo su sentido sino también su función argumental. En ella, el horizonte pasó a estar relativizado a un observador que, a diferencia de las formulaciones pretéritas, podía estar ubicado en cualquier sitio del universo, lo que suponía (y/o permitía) una reinterpretación de los datos observacionales. Galileo evidenció con ello que los pensadores anteriores (aun Copérnico) no habían podido abandonar la idea de un horizonte en cierta medida absoluto. Por tanto, no habían podido advertir que —bajo determinadas condiciones— su comportamiento era consistente con cualquier posición de la Tierra en el universo, lo que volvía inocuo el argumento ptolemaico que utilizaba el comportamiento del horizonte para mostrar la centralidad de la Tierra. Mientras que para Ptolomeo y para Copérnico el *horizonte* era un círculo por cuanto estaba proyectado sobre la esfera realmente existente, para Galileo se trataba de un plano que asumía la forma que tendría el universo en sus confines (forma, por cierto, ignorada), y que solo era un círculo por cuanto se proyectaba sobre una esfera aparente con centro en el observador.

El proceso de confluencia entre la astronomía y la física (o subsunción de la primera a la segunda) desde finales del siglo XVII, trajo aparejados nuevos

desafíos para la conceptualización del horizonte. En especial, dada la fuerza que asumió la postulación de un universo infinito. Si bien esta ya había tenido lugar tímidamente en el ámbito astronómico y en el ámbito metafísico-teológico con anterioridad a la obra de Isaac Newton (1643-1727), el impacto de su física sobre las concepciones cosmológicas tuvo un carácter mucho más profundo. La necesidad de considerar un universo infinito e isótropo como condición de posibilidad de la mecánica clásica a nivel universal generó nuevos problemas. Si el universo es infinito y la luz no tiene una velocidad infinita, entonces es claro que se constituye un nuevo límite entre lo observado y lo no observado, distinto del considerado hasta aquí. En ese contexto, el horizonte delimita una realidad que no se encuentra definida de manera meramente espacial, sino también temporal. En un universo temporalmente finito, un observador que en T_0 ve una porción esférica del universo con un radio determinado (y centro en el observador), un instante más tarde, T_1 , vería uno con un radio mayor. A diferencia de lo que ocurría en la astronomía pre-newtoniana, no bastaría el transcurso de una determinada cantidad de tiempo para que toda la información observable estuviera al alcance de un observador terrestre puesto que con el tiempo siempre aumentaría la información delimitada por el horizonte. Por otra parte, siempre habría una porción infinita del universo que un determinado observador no podría ver³.

En el marco de la relatividad, y sobre todo a partir del desarrollo de modelos cosmológicos que buscaron dar cuenta de la evidencia del corrimiento al rojo de las galaxias proporcionada por Edwin Hubble (1889-1953), proliferaron definiciones y conceptualizaciones de *horizonte* con una

³ Un problema vinculado con este es el de la paradoja de Olbers —formulada por Heinrich Olbers (1758-1840), aunque antes que él por Phillip de Chésneaux (1718-1751)— que consiste en señalar que la oscuridad del cielo nocturno (un dato evidente de la observación) es inconsistente con que la cantidad de estrellas sea infinita y que su distribución sea uniforme en el espacio. Afirmar que las estrellas son infinitas y su distribución uniforme y, simultáneamente, no observar todo el cielo iluminado puede resolverse mediante la postulación de algún límite en lo observado. A este respecto, puede consultarse Dickson (1968) y Harrison (1987).

variedad y complejidad inabarcables en este trabajo —que, inclusive, suscitaron discusiones mientras se desarrollaba la presente investigación (por ejemplo, Hawking 2014)—. Es claro que, así como el horizonte cosmológico depende de si el universo es espacialmente finito o infinito, también depende de si es estático, en expansión, en contracción u oscilante. Porque mientras que en un universo estático el horizonte avanza en forma esférica a la velocidad de la luz, en uno en expansión, en contracción u oscilante podría hacerlo a velocidades mayores o menores que la de la luz. También depende de si la edad del universo es finita o infinita, dado que es lo que determina el tiempo máximo para que la información llegue a un observador. Todo esto incide sobre el horizonte, puesto que en algunos casos todo el universo es observable (y el límite es entre lo observado y lo no observado), y en otros casos no todo el universo es observable para un determinado observador (por lo que existen límites de distinto tipo).

Solo para dar cuenta de la naturaleza de la vigencia que tuvo el tema en el último siglo referiré a dos definiciones de *horizonte* proporcionadas en 1956 por Rindler en un artículo que buscaba esclarecer el concepto dado que, debido a la multiplicación de modelos de universo, su uso se había vuelto equívoco (Rindler 1956, 66). Allí define al *horizonte de eventos* como:

“una (hiper)superficie en el espacio-tiempo que divide a todos los eventos en dos clases no vacías: aquellos que fueron, son o serán observables para [un observador fundamental] A, y aquellos que estarán para siempre más allá del poder de observación de A” (Rindler 1956, 663).

Y al horizonte de partículas lo definía diciendo que:

“es, para cualquier observador fundamental A y un instante cósmico t_0 dados, una superficie en el espacio tridimensional en un instante $t=t_0$, que divide todas las partículas fundamentales en dos clases no vacías: aquellas que ya han sido observadas por A en t_0 y aquellas que no” (Rindler 1956, 663).

La existencia de estos horizontes depende de los modelos de universo que se adopten⁴. Es importante notar que los modelos que suponen *horizontes de eventos* constituyen, por otra parte, un caso donde la misma noción de observabilidad es afectada: el universo ya no se divide en dos para cada observador (*observado* y *observable-aun no observado*); sino en tres: *observado*, *observable-aun no observado* y *no-observable*⁵.

Lo anterior permite establecer que el concepto *horizonte* fue cambiando su significado a lo largo de la historia. Dichos cambios tuvieron un vínculo estrecho con cambios en la concepción general de la estructura del cosmos y en los conceptos cosmológico-astronómicos asociadas a ella, de los que resultan muy representativos. Esa representatividad se da también en las modificaciones en su uso; en especial, en cuanto a su función y su relevancia epistemológica para la determinación de las posiciones relativas del observador y lo observado, en el espacio o en el tiempo. A su vez, todos esos cambios en el concepto no fueron más que la contracara de cierta continuidad: la de referir a alguna clase de límite para la observación. Es la combinación de

⁴ Aquí no me detendré en los aspectos de los distintos modelos (al respecto véase Swinburne 1966; Harrison 2000). Para comprender por qué algunos modelos tienen horizontes de eventos y otros no, es necesario comprender el funcionamiento del cono de luz y las distintas consideraciones en torno al origen del universo. El propio Rindler ofrece elementos para notarlo de manera intuitiva, utilizando el modelo de universo representado en un globo en expansión (válido para el caso de un universo cerrado). Las partículas fundamentales pueden estar representadas por puntos negros distribuidos uniformemente sobre la superficie del globo (siendo una de ellas la partícula-observador *A*). Los fotones, pueden ser representados por puntos rojos que se mueven en círculos a velocidades constantes respecto del material del globo. Un *horizonte de eventos* existiría para *A* en modelos en los que la tasa de expansión es y se mantiene lo suficientemente alta como para que algunos de los puntos rojos que se dirigen hacia *A* nunca lleguen a él. Un *horizonte de partículas* tendría lugar para un observador si el globo fuera inflado solo inicialmente a una velocidad mayor a la de los puntos rojos y luego decreciera su velocidad; pasaría un determinado tiempo hasta que un punto rojo pudiera llegar a *A* (Rindler 1956, 664). Esto pone de manifiesto que el concepto *horizonte* está en estricta relación con las concepciones generales del universo y del espacio (en este caso, espacio-tiempo) que se tengan.

⁵ De acuerdo con Kosso (1989) los objetos que se encuentran más allá del *horizonte de eventos* constituyen un ejemplo de lo que él denomina *inobservabilidad en principio*; esto ocurre cuando una teoría describe una entidad de forma tal que no permite que sea observada.

esos cambios con la continuidad la que revela la importancia histórica del concepto *horizonte*.

Fue por ello que decidí volver sobre temas de la historia de la astronomía sumamente estudiados, pero desde una perspectiva que prometía echar luz sobre la naturaleza del cambio conceptual en el período. Busqué, en otras palabras, comenzar a ejecutar un estudio inspirado por las palabras de Hubble —uno de los indudables protagonistas de la historia del concepto *horizonte*— incorporadas como epígrafe: realizar una historia de la astronomía entendiéndola como una historia de horizontes en retroceso.

Conjunta y consecuentemente con el cambio del objeto de estudio, fue necesario redefinir el arco temporal. Por una parte, fue indispensable examinar con mayor detalle los antecedentes del cambio en la Modernidad en ausencia de estudios específicos que permitieran conocer el significado del concepto *horizonte* durante la Antigüedad y la Edad Media. Por otra, resultó innecesario extender el estudio hasta la obra de Newton, puesto que con la de Galileo se alcanzó una consistencia conceptual suficiente para compatibilizar la experiencia observacional con una Tierra ubicada en un punto cualquiera de un universo infinito.

In.2) Tesis sostenidas

La investigación condujo a la formulación de las siguientes tesis:

- I. El término “horizonte” expresó a lo largo de su historia a un concepto astronómico indispensable para el ordenamiento de la experiencia observacional que, si bien siempre refirió al límite entre lo observado (u observable) y lo no observado (o no observable), padeció cambios en su significado; dichos cambios son representativos de las transformaciones fundamentales de las teorías de cuyo lenguaje formó parte.

- II. Es posible detectar, entre 1543 y 1624, cambios en el sentido del concepto *horizonte* que fueron necesarios para neutralizar el argumento ptolemaico contra una Tierra descentrada que apelaba a lo que denominaré *experiencia de la bisección de la esfera celeste por el horizonte*.
- III. La neutralización del argumento ptolemaico se hizo por dos vías distintas (propuestas por Copérnico y Galileo), lo que condujo a la coexistencia de tres diferentes *sentidos* del concepto *horizonte* en el período moderno: *ptolemaico*, *copernicano* y *galileano*.
- IV. La bisección de la esfera celeste por el horizonte constituye un fenómeno que, estrictamente, nunca pudo ser observado; no obstante ello, fue aceptado como *base empírica* durante casi mil quinientos años.
- V. La *experiencia de la bisección de la esfera celeste por el horizonte* fue formulada y operó originalmente como una *experiencia crucial*; la eliminación en el período moderno de su carácter crucial (a lo que denominaré *descrucialización*) no fue producto de nuevas observaciones sino de cambios en los conceptos utilizados para describirlas.
- VI. La técnica de representación de *cambios conceptuales* mediante *dynamic frames* (marcos dinámicos) utilizada por algunos exponentes de la denominada *historia cognitiva* constituye una herramienta útil para *describir* los cambios y continuidades en el concepto *horizonte*, aunque no exhibe el éxito explicativo que sus impulsores sostienen.
- VII. El cambio en el concepto astronómico *horizonte* en la Modernidad fue concomitante con cambios en conceptos relacionados con él en otras disciplinas o prácticas que, en algunos casos, se manifestaron con anterioridad al cambio astronómico.

VIII. Elementos contextuales al cambio astronómico, como el proceso de expansión ultramarina, las nuevas concepciones metafísico-teológicas del período y las nacientes técnicas pictóricas de representación en perspectiva, contribuyen a *explicar* el cambio en el concepto astronómico *horizonte*.

IX. El desconocimiento de las relaciones entre conceptos científicos de distintas disciplinas y entre conceptos científicos y no científicos inhibe la comprensión de las dinámicas asumidas por los conceptos en los procesos de cambio conceptual.

In.3) Estructura del trabajo

El trabajo consta de introducción, nueve capítulos, conclusiones y un apéndice que depende, en especial, del Capítulo 1. Los nueve capítulos se encuentran agrupados en tres partes; tal estructuración refleja no solo una preferencia expositiva sino también el predominio de distintos enfoques y metodologías utilizados en cada una de ellas, según se especifica en In.4.

La primera parte del trabajo está orientada a una reconstrucción histórica de los cambios en los *sentidos* del concepto *horizonte* en el período moderno, en el que la Tierra pasa de ser concebida como un cuerpo inmóvil y central a ser considerada un planeta. Sugiero una clasificación de los cambios acaecidos al concepto a partir de una reconstrucción histórica para la que diferencio tres etapas. La primera de ellas, analizada en el Capítulo 1, culmina en la sistematización por parte de Ptolomeo de un *sentido* del concepto *horizonte* que permitía su *uso* para determinar la posición central de la Tierra, *sentido* al que denomino *ptolemaico*, y que fue legado a la astronomía medieval. La segunda, analizada en el Capítulo 2, constituida por el desarrollo por parte de Copérnico de una estrategia que le permitía compatibilizar el movimiento y la descentración de la Tierra con la experiencia diseñada por Ptolomeo; en este capítulo analizo los alcances de dicha estrategia a la que denomino *solución copernicana*, que implicó la configuración de un *sentido copernicano* del

concepto *horizonte*. La tercera etapa (analizada en Capítulo 3), es en la que, según sostendré, Galileo resuelve de manera cualitativamente distinta la compatibilización de la experiencia utilizada por Ptolomeo con la postulación de una Tierra descentrada; sugeriré que esta *solución galileana* ofreció una consistencia análoga a la presentada por el sistema ptolemaico, lo que dependió de un *sentido galileano* del concepto *horizonte*. Conjuntamente, estos tres capítulos permiten sostener las Tesis I a III. El Apéndice, complementario de esta primera parte del trabajo y, en particular del Capítulo 1, cumple distintas funciones. En primer lugar (en Ap.1) presento los elementos de *astronomía de posición* necesarios para entender el argumento ptolemaico y su discusión ulterior, por lo que su lectura previa al Capítulo 1 puede ser útil para afianzar aspectos técnicos de la astronomía de posición geocéntrica. Luego analizo el argumento de Ptolomeo de manera pormenorizada y realizo aportes originales sobre los supuestos presentes en él, omitidos generalmente por sus comentaristas.

La segunda parte del trabajo está orientada a evaluar, desde ángulos distintos, aspectos epistemológicos de lo analizado en la primera parte del trabajo; si bien los tres capítulos que la componen contribuyen conjuntamente a la justificación de las Tesis IV a VI, cada uno está orientado a sustentar una en particular. En el Capítulo 4 definiendo específicamente la Tesis IV; determino que el argumento ptolemaico apelaba a una experiencia cuya observación no habría podido tener lugar dadas las características de la observación del cielo; señalo que esto no constituyó un problema hasta el siglo XVII (aun teniendo los astrónomos previos fuertes indicios de tal imposibilidad), lo que lo convierte en un caso fértil para considerar la relación entre teoría y observación. En el Capítulo 5 definiendo específicamente la Tesis V; realizo una evaluación de la estructura lógica subyacente a la contrastación de la hipótesis de la centralidad de la Tierra de acuerdo con el argumento ptolemaico y de su evolución durante la modernidad; sostengo que fue planteada originalmente como una *experiencia crucial* (en el sentido elucidado por Cassini 2015); el caso considerado permite evaluar algunos aspectos de la discusión en torno a la existencia y características de las experiencias cruciales. En el Capítulo 6

defiendo específicamente la Tesis VI; busco aplicar una técnica de representación de conceptos desarrollada en el ámbito de las ciencias cognitivas y recientemente aplicada a casos de estudio de historia y filosofía de las ciencias, denominada *dynamic frames* (marcos dinámicos); señalo que con ella se puede describir las rupturas y continuidades entre los sentidos del concepto *horizonte* en Ptolomeo, Copérnico y Galileo, pero tomo distancia de la aspiración explicativa defendida por algunos exponentes de la *historia cognitiva* (Chen y Barker 2000; Andersen, Barker, y Chen 2006). La segunda parte del trabajo deja abierto el interrogante acerca de qué elementos pudieron haber contribuido a que Galileo diera una respuesta distinta a la de Copérnico al argumento ptolemaico, siendo que no es posible establecer que fuera producto exclusivamente de la teoría astronómica copernicana ni de nuevos datos provenientes de la observación astronómica.

La tercera parte del trabajo está orientada a responder el interrogante abierto en la segunda parte, para lo que incorporo algunos elementos *externos* al ámbito astronómico. Cada capítulo está orientado a indagar las relaciones del concepto *horizonte* en la astronomía con desarrollos que tuvieron lugar en otras prácticas o disciplinas en las que también era utilizado el término "horizonte". En el Capítulo 7 considero la forma en la que pueden vincularse los cambios astronómicos con la expansión ultramarina que tuvo lugar desde el siglo XV; en especial, la relativización en la percepción del espacio geográfico que supuso conocer tierras remotas y la necesidad de ajustar los medios técnicos para su conocimiento y dominación mediante el uso de la cosmografía. En el Capítulo 8 analizo el modo en el que pudieron haber influido determinadas consideraciones metafísico-teológicas en dichos cambios, para lo que reviso los presupuestos de acuerdo con los cuales Nicolás de Cusa y Giordano Bruno llegaron a postular la existencia de un universo infinito compatible con la observación celeste. En el Capítulo 9 defiendo que el desarrollo de la perspectiva en el arte favoreció la reinterpretación de la experiencia de observación celeste del horizonte. Lo estudiado en esta tercera parte permite sostener las Tesis VII a IX.

En las Conclusiones, realizo una explicitación de las tesis sostenidas mediante una recapitulación de los aspectos centrales desarrollados en los capítulos 1 a 9.

In.4) Aspectos teórico-metodológicos

El presente es un estudio de un caso perteneciente a la historia de la astronomía realizado con una perspectiva filosófica. Dada tal condición, dialoga con un extenso conjunto de perspectivas teórico-metodológicas de la filosofía y la historiografía en general, y de la filosofía y la historiografía de las ciencias en particular. La presentación en esta introducción de tal conjunto de perspectivas en extenso resultaría contraproducente, por lo que serán explicitadas en cada etapa del trabajo. No obstante, convienen aquí algunas consideraciones preliminares para cada una de las tres partes del trabajo.

La primera parte del trabajo está destinada a realizar una reconstrucción histórica de los sentidos que tuvo el concepto *horizonte* en las astronomías antigua, medieval y moderna. La metodología utilizada es la usual en el análisis del cambio conceptual, y requirió de la lectura tanto de fuentes primarias que permitieran conocer los sentidos del concepto como de los comentarios de los especialistas contemporáneos más reconocidos para cada pensador. A este respecto, convienen dos aclaraciones.

En primer lugar, no pretendo sostener ninguna posición determinada sobre la ontología de los conceptos, entendiendo que cualquier consideración al respecto exige ponderar problematizaciones de distinta índole que tuvieron lugar en la filosofía desde Platón (si no antes) a esta parte, labor que excede los propósitos de este trabajo. Siguiendo las consideraciones de Díez y Moulines (1997, 91-8), los supuse entidades abstractas capaces de referir a objetos o entidades reales, que operan como condición de posibilidad para que los sujetos epistémicos conozcan el mundo y se orienten en él. Entre los objetos reales incluyo a los objetos matemáticos y, dado el tema de estudio de este trabajo, especialmente a aquellos pertenecientes a la geometría.

Consideré posibles los cambios en el *sentido* de un concepto sin que ello implique necesariamente un cambio en su *referente*; y por la naturaleza del concepto *horizonte*, me centré especialmente en el estudio de los cambios en el *sentido*, considerando que en algunos casos fueron implicados por cambios en sus *usos*.

En segundo lugar, tampoco pretendo sostener ninguna posición específica sobre el vínculo entre el lenguaje y los conceptos. Para proceder en la elucidación del concepto *horizonte*, supuse que los términos tienen la capacidad de expresar conceptos y que la mayoría de ellos lo hacen. Lo anterior me condujo a establecer que la presencia del término “horizonte” en un escrito era condición suficiente para aseverar que existía un concepto expresado por él. Por otra parte, y siguiendo a Murphy (2002, 389), no interpreté la ausencia del término como una condición suficiente para la ausencia del concepto. Por lo que si bien la mayoría de las veces establecí el significado del concepto *horizonte* mediante la detección del uso explícito del término “horizonte”, otras veces lo hice a partir de otros términos.

La segunda parte del trabajo está orientada a la evaluación de las condiciones epistémicas para el éxito o el fracaso de un argumento que utiliza al concepto *horizonte*. La cantidad y variedad de problemas de la filosofía de las ciencias para los que es fértil el caso que analizo resulta inabarcable en un trabajo de estas características, por lo que su tratamiento requirió un recorte. Tal recorte está dado especialmente por la naturaleza de las Tesis IV a VI.

En tal sentido, y puesto que el trabajo está orientado a estudiar el cambio conceptual en ciencia y a considerar específicamente el papel de la observación, dialoga especialmente con la filosofía de la ciencia que buscó diferenciarse de las tesis sostenidas por el empirismo lógico en lo relativo al significado de los conceptos científicos y al carácter de la observación (por ejemplo Carnap 1947; Hempel 1950). Lo anterior se advertirá en el uso de nociones como la de *carga teórica de la observación* propuesta por Hanson

(1958; 1969; 1971) en el Capítulo 4, o la de *interpretación natural* propuesta por Feyerabend (1970; 1975) en el Capítulo 5.

En cualquier caso, esto no implicó el desconocimiento de herramientas pertinentes desarrolladas en el ámbito de la filosofía de las ciencias con anterioridad al *giro historicista*, como se puede apreciar en la aplicación en el Capítulo 6 de la noción de *experiencia crucial* (Popper 1959; Hempel 1966). Pero lo que sí implicó fue su incorporación desde una perspectiva que abandona su aspiración normativa y se centra en una dimensión descriptiva de las prácticas científicas; en otras palabras, adscribí a una perspectiva que otorga un papel a la historia de la ciencia, tal como lo sugirió Kuhn (1962), y como asumieron de diferentes maneras filósofos de la ciencia con perspectivas muy distintas en los últimos cincuenta años (por ejemplo, Lakatos 1970; Laudan 1977; van Fraassen 1987; Kosso 1989; Fox Keller 2000; Brown 2007).

Dentro de esa amplia tradición que recupera a la historia de la ciencia, el trabajo discute específicamente, en el Capítulo 6, con algunas perspectivas teórico-metodológicas que se desarrollaron en el ámbito de un campo de investigaciones sobre cambio conceptual que se fue forjando a lo largo de las últimas décadas y que culminó con la publicación a fines de 2008 (y posterior reedición ampliada en 2013) del *International Handbook of Research on Conceptual Change* (Vosniadou 2008; Vosniadou 2013). Algunos de los autores vinculados con este campo (Thagard 1992; Andersen, Barker, y Chen 2006; Chen y Barker 2000) trataron el problema específico del cambio conceptual en la historia de la astronomía mediante el uso de técnicas de representación de conceptos, cuya aplicabilidad discutiré a propósito de la Tesis VI.

La tercera parte del trabajo está orientada a considerar aspectos técnicos, económicos, sociales, políticos y culturales como medio para comprender y explicar el cambio conceptual estudiado. La metodología utilizada es heredera de una perspectiva historiográfica con anclaje en la *historia social de la ciencia* (Sarton 1957; Geymonat 1970; Bernal 1971; Rossi 2001; Daston y Lunbeck 2011). Trabajé con el supuesto de que el lenguaje utilizado en la ciencia es el

resultado de un proceso social que no niega la dimensión individual a la vez que tampoco se restringe a ella. En este sentido, me alejé junto a Clark (1996) tanto de las perspectivas que entienden al uso del lenguaje como un proceso individual como de aquellas que lo estudian como un proceso esencialmente social. Esto se expresa en el esfuerzo de orientar una parte del estudio a las dimensiones más individuales del proceso del cambio conceptual y otra a encontrar el entramado social general que subyace o que acompaña a dicho cambio.

La conveniencia de combinar estas distintas perspectivas teórico-metodológicas quedará justificada con el desarrollo del trabajo, y constituirá la base para sostener la Tesis IX.

CAPÍTULO

1

ORIGEN Y CONSOLIDACIÓN DE LA CONCEPCIÓN PTOLEMAICA DE *HORIZONTE*

En este capítulo estableceré las características del *sentido* del concepto *horizonte* legado por Ptolomeo a la astronomía occidental geocéntrica. Para ello, trazaré un recorrido histórico por fragmentos que me permitirán: i) exponer los conceptos astronómicos básicos para comprender la naturaleza del problema que se estudia en esta Tesis, y ii) establecer el *uso* del concepto en la astronomía griega, desde formulaciones tempranas en las que todavía no estaba consolidado (siglos IV y III a. C.), hasta formulaciones técnicas que permitían usarlo para determinar la posición central de la Tierra mediante el argumento que apelaba a la *experiencia de la bisección por parte del horizonte*, tal como ocurre en el *Almagesto* de Ptolomeo (s. II). Con este capítulo inicio el recorrido que permitirá sustentar las Tesis I a III.



1.1) Primeros usos del término "horizonte"

Por su etimología, el término "horizonte" remite a la tradición griega. Proviene del griego antiguo ὀρίζων (horizōn), que es el participio presente del verbo ὀρίζω (horizō), que significa "limitar" y que a su vez procede del sustantivo ὅρος (horos), que significa "límite". Pero más importante que su origen etimológico es el hecho de que fue en las obras astronómicas antiguas de la tradición griega que se configuró el sentido del concepto *horizonte* con el que dialogó la astronomía moderna de los siglos XVI y XVII. Por ello, en este trabajo que no tiene un carácter filológico ni persigue el objetivo de establecer una genealogía del concepto *horizonte*, resulta ineludible considerar los alcances de la concepción que se sometió a debate durante la modernidad y revisar brevemente sus orígenes.

Autólico de Pitania (c. 360-290 a. C.) es el primer astrónomo de quien se conservan obras completas en su formato original, y no a través de reconstrucciones posteriores (Evans 1998); ellas son *Sobre la esfera moviente* y *Sobre ortos y ocasos*. La primera de estas obras consiste en la exposición de doce proposiciones de carácter casi exclusivamente observacional (sin presencia de elementos para el cálculo ni de aplicación práctica). Las proposiciones cuarta, quinta y novena de dicho tratado señalan el modo en el que un observador apreciará el movimiento de las estrellas según varíe su posición relativa respecto del eje de rotación de la esfera celeste⁶. En la cuarta proposición, Autólico expresa que:

"Si sobre una esfera, un círculo máximo inmóvil perpendicular al eje divide [ὀρίζη] el hemisferio invisible del visible de la esfera, entonces durante la rotación de la esfera sobre el eje, ninguno de los puntos sobre la superficie de la esfera saldrá o se pondrá. En cambio, los puntos ubicados sobre el hemisferio visible son siempre

⁶ Para una aproximación general a las características de la esfera celeste y los movimientos relativos al observador terrestre, véase "Nociones Preliminares" en el Apéndice (Ap.1).

visibles; y aquellos en el hemisferio invisible son siempre invisibles” (Autólico 1885, 12-13).

Lo que se señala es el fenómeno del movimiento estelar para un observador situado en un polo terrestre, para quien ningún punto sale ni se pone dado que todas trazan círculos concéntricos en torno al polo celeste que estaría ubicado justo sobre la cabeza del observador (esto es, en su cenit). Lo que indica Autólico es que, para dicho observador, todas las estrellas son circumpolares; esto es, no salen ni se ponen sino que giran en torno al polo celeste puesto que el observador está parado justo sobre el eje de rotación de la esfera, por lo que nunca atraviesan ese círculo máximo⁷ que divide lo que se observa de lo que no. Esto es lo que más tarde se denominaría *esfera paralela* debido a que las estrellas describen círculos paralelos al horizonte.

En la quinta proposición, explica cuál será, en cambio, la situación para un observador situado sobre el ecuador:

“Si un círculo inmóvil que pasa por los polos de la esfera divide [ὀρίζη] la parte visible de la no visible, todos los puntos en la superficie de la esfera saldrán y se pondrán en el curso de su revolución” (Autólico 1885, 14-15).

Para este observador, explica, ningún punto de la esfera (y, por tanto, ninguna estrella) sería circumpolar, sino que todos saldrán y se pondrán en el curso de un día, manteniéndose visibles la misma cantidad de tiempo que invisibles. A esta esfera se la denominó más adelante *esfera recta* dado que las estrellas al moverse describen líneas que forman ángulos rectos con el horizonte.

⁷ En las obras que citaré aparecen términos que harían que una traducción más justa fuera “gran círculo”, o “círculo mayor”; pero puesto que en geometría tales conceptos son idénticos, y dado el interés en poder identificar este aspecto desde un principio, siempre utilizaré al citar en castellano “círculo máximo”. Un círculo máximo es un círculo que comparte el radio y el centro con una esfera, de manera tal que la divide en dos hemisferios; para mayores detalles, véase Ap.1.

En la novena proposición explica las apariencias para un observador en una posición distinta a las dos anteriores:

“Si en una esfera, un círculo máximo oblicuo al eje divide [ὀρίζη] la parte visible de la esfera de la invisible, entonces, de todos los puntos que salen al mismo tiempo, aquellos más cercanos al polo visible se pondrán más tarde; y, de todos los puntos que se ponen al mismo tiempo, los más cercanos al polo visible saldrán más temprano” (Autólico 1885, 40-41).

Esto es, que para observadores situados en cualquier punto distinto de los polos (*esfera paralela*) y el ecuador (*esfera recta*), las estrellas saldrían y se pondrían trazando ángulos oblicuos con el horizonte; lo que más tarde se definiría como *esfera oblicua* o *inclinada*.

Lo interesante aquí es notar que en todas las proposiciones incurre en lo que Evans denomina *circunlocuciones* de conceptos (Evans 1998, 87). Las circunlocuciones son expresiones típicas de momentos en los que los lenguajes técnicos no se encuentran completamente consolidados, por lo que expresan conceptos de manera más o menos inespecífica mediante términos no fijados. Ello es lo que ocurre con la expresión “un círculo máximo que divide la parte visible de la esfera de la parte invisible”; con esta circunlocución, Autólico refiere a lo que la misma tradición denominará, en un momento de mayor desarrollo de su lenguaje técnico, como *horizonte*. Netz (2004, 152-3) utiliza justamente este caso como un ejemplo de lo que denomina proceso de *elipsis* en las fórmulas; y muestra que en la propia obra de Autólico puede detectarse que la expresión “un círculo máximo inmóvil perpendicular al eje divide el hemisferio invisible del visible” (de la proposición 4) se va repitiendo en el curso de la obra, perdiendo algunas de las palabras que la componen, hasta llegar a “el que divide” (ὁ ὀρίζων), que es la fórmula utilizada en *Sobre ortos y ocasos*, a la que él considera posterior.

Simultáneamente, en la propia obra de Autólico aparece el término “horizonte”. Pero, contra la que sugiere Tannery (1976, 39), no parece expresar un concepto técnico. Lo usa, en un sentido lato, en el marco de

expresiones que buscan señalar un punto espacial como referencia para una posición. Algo análogo ocurre en otro trabajo que constituye un pilar fundamental en la tradición clásica de los estudio sobre el cielo: *Fenómenos*, de Arato de Solos (c. 310-240). Si bien allí el término “horizonte” es utilizado muchas veces en el marco de descripciones de distintos fenómenos celestes, no necesariamente se presupone el sentido técnico que luego asumiría el concepto. Lo más común es verlo utilizado para describir fenómenos celestes como el siguiente:

“Se pone la Corona y se pone el Pez hasta la espina; de la Corona en su descenso se puede ver la mitad por encima del horizonte, mientras que los límites del mundo hacen ya descender la otra mitad” (Arato 1993, 114).

Algo más tarde se puede apreciar que los trabajos astronómicos asumen una actitud distinta en el uso de este tipo de conceptos. En general, comenzando por una definición más acabada del sentido asumido por cada uno de ellos. Un ejemplo elocuente de ello es el tratado *Fenómenos* de Euclides (c. 325-265 a. C.), donde se establece lo siguiente:

“Y llámese horizonte al plano que pasa por nuestra vista e incide sobre el mundo y que delimita la parte que se ve sobre la tierra. Y es un círculo: pues si una esfera es cortada por un plano, la sección es un círculo” (Euclides 2000b, 268).

En la misma dirección, Marco Manilio (siglo I a. C.) en su *Astrología* —obra con un carácter distinto a las otras referidas— introduce una sección destinada a la definición de los elementos que componen la esfera. En el Libro I podemos leer una descripción de los círculos de la esfera que son independientes de la posición del observador sobre la superficie de la Tierra (sobre los que afirma que tienen “una morada permanente”), como el ecuador, la eclíptica o los coluros⁸. Y luego, una descripción de dos círculos que varían

⁸ El ecuador, la eclíptica y los coluros son círculos máximos de la esfera que dan cuenta de su movimiento y del movimiento del Sol. Al respecto, véase “Nociones preliminares” en el Apéndice (Ap.1).

según la posición del observador. Uno de ellos es el meridiano del lugar (que “corta el cielo en el centro y divide el día en dos”), y el otro:

“Por donde se encuentran la parte más baja del cielo y la más elevada de la Tierra, por donde el universo se une a sí mismo sin ninguna separación, por donde devuelve al océano o recibe de él las brillantes estrellas, y por donde un límite sutil circunda transversalmente el universo, una línea correrá a través de todo el cielo, dirigiéndose ya hacia la parte central y caliente del universo, ya hacia las siete estrellas y los astros que no se mueven. Esto es, a donde quiera que lleven a uno los pies viajeros, avanzando ya hacia esas tierras, ya hacia aquellas, siempre el círculo será nuevo y cambiará con el lugar. En efecto, mostrando un cielo y dejando otro, ocultará una mitad y desvelará la otra, con límites siempre distintos, que varían de la misma forma que la vista del observador [Éste será un círculo terrestre, puesto que abraza la tierra; también ciñe el cielo con una línea plana, y es llamado horizonte, como derivado de límite]” (Manilio 1996, 32).

Este proceso de delimitación de los conceptos en el marco de obras destinadas tanto al público especialista como a la divulgación se fue acentuando hasta asumir una forma estrictamente técnica. Un ejemplo temprano de este tipo de formulación puede ser advertido en la *Introducción a los Fenómenos* de Gémino de Rodas (S. I a. C.), quien formula definiciones de los círculos de la esfera y dice del horizonte:

“es el círculo que separa, para nosotros, la parte visible del Universo de la invisible, y que corta en dos la esfera entera del Universo, de manera que un hemisferio está situado por encima de la Tierra y el otro por debajo [...] Hay dos horizontes: uno perceptible y otro teórico. El horizonte perceptible es el que está descrito por nuestra mirada con el límite de la vista, ya que su diámetro no supera los 2.000 estadios. El horizonte teórico es el que se extiende hasta la esfera de las estrellas fijas y divide en dos el Universo” (Gémino 1993, 213).

Aquí aparece, ya con toda claridad no solo una definición técnica de *horizonte*, sino además una elucidación de su sentido que permite distinguir el *horizonte teórico* (al que técnicamente hoy se denomina *horizonte astronómico*) del *horizonte perceptible* (al que a veces se lo denomina

horizonte geográfico). Si bien ambos podrían estar vinculados eventualmente por la experiencia, son de naturaleza distinta.

El *horizonte teórico* es un plano (un círculo) que divide en dos hemisferios a la esfera celeste. Es teórico en el sentido de que no depende de la efectiva posibilidad de proyectar la visual de modo tal que deje un hemisferio por debajo y el otro por encima; de modo que no depende de la altura del observador sobre el nivel del mar o del accidente geográfico sobre el que pueda estar situado. El *horizonte perceptible*, por el contrario, depende estrictamente de tales variables.

1.2) El horizonte como dato

Conjuntamente con la consolidación del término técnico “horizonte” para referir a uno de los círculos celestes, durante la Antigüedad los griegos comenzaron a utilizar sus características observacionales como *dato* para la solución de tres problemas fundamentales relativos a la Tierra: su forma, su tamaño relativo y su ubicación en el mundo.

Una aproximación a la determinación de la forma y tamaño relativo puede verse ya en *Acerca del Cielo* (II.14) de Aristóteles (384-322 a. C.). De acuerdo con el argumento, dada la forma en la que se modifica el círculo del horizonte al desplazarse el observador hacia el norte o hacia el sur, la Tierra necesariamente es esférica y relativamente pequeña (Aristóteles 1996, 161-2). El dato es que el horizonte para un observador situado sobre la superficie de la Tierra —lo que actualmente se denomina *horizonte topocéntrico*— delimita un círculo en el cielo diferente según su latitud. A medida que el observador se dirige desde la zona ecuatorial hacia el norte o hacia el sur, el polo celeste visible se va elevando sobre su cabeza hasta alcanzar su cenit cuando llega al polo terrestre. Este fenómeno le permite a Aristóteles inferir la esfericidad de la Tierra (o, más precisamente, la circularidad en el sentido norte-sur), lo que es posible siempre que se extrapole a toda la Tierra esta propiedad solo

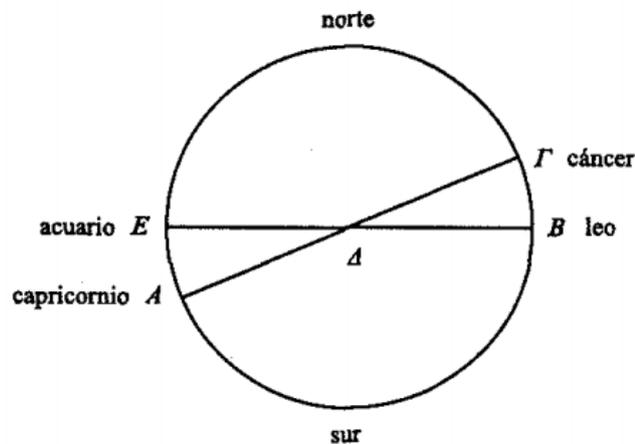
comprobada en aquel entonces para lo que los griegos denominaban *oikouménē* (οἰκουμένη), que era la tierra habitada.

En cuanto a la ubicación, una aproximación clara puede ya ser advertida en *Fenómenos* de Euclides, cuya Proposición 1 establece:

"La tierra está en medio del mundo y ocupa la posición del centro en relación con el mundo.

En el mundo, sea AB el horizonte; nuestra vista, la tierra en el punto Δ y sea Γ la parte del levante y A la del poniente y mediante una dioptra situada en el punto Δ contémplese a Cáncer levantándose en el punto Γ .

Entonces, mediante la misma dioptra se verá a Capricornio poniéndose: véase en el punto A. Y puesto que los puntos A, Δ , Γ se ven mediante la dioptra, la línea que pasa por A, Δ , Γ es una recta. De manera que A, Δ , Γ es un diámetro de la esfera de los astros no errantes y del zodíaco, puesto que separa seis signos del zodíaco por encima del horizonte.



(...) De la misma manera demostraremos que cualquier punto que se tome sobre la tierra es el centro del mundo.

Luego la tierra está en medio del mundo y ocupa la posición del centro en relación con el mundo" (Euclides 2000a, 270).

El argumento apela a lo que se puede observar mediante una dioptra, objeto generalmente tubular que permite establecer —dejándolo en reposo y mirando desde uno y otro extremo— qué objetos celestes se encuentran

opuestos en un determinado momento. Lo que señala Euclides es que cuando, desde la Tierra, por un extremo de la dioptra se puede ver un punto del zodíaco⁹, por el otro se puede ver el opuesto (por ejemplo, Leo y Acuario, o Capricornio y Cáncer); dada las características de la dioptra, se puede establecer que esa línea en la que se encuentran tales puntos y el observador es recta. Ahora bien, dado que tal línea recta une dos puntos opuestos de la esfera, se puede establecer que es un diámetro de ella. Por otra parte, es un dato que dicha línea pasa por la Tierra (dado que en ella está situada el instrumento). Y puesto que esto ocurre con cualesquiera puntos opuestos y desde distintos lugares de la Tierra, esto es solo posible estando la Tierra en el medio. El vínculo con el horizonte está dado en el texto en señalar que la dioptra lo que hace es dar cuenta mediante un instrumento de lo que ocurre en la observación del cielo: que quedan seis signos sobre el horizonte. Volveré sobre esto.

1.3) Uso y sentido ptolemaico del concepto *horizonte*

Con Ptolomeo, el uso del término “horizonte” ya es inequívocamente técnico y en su obra se sintetiza tanto el *uso* como el *sentido* que la tradición griega legaría a la astronomía medieval. En el Capítulo 4 del Libro I del *Almagesto* Ptolomeo recoge la observación aristotélica sobre la latitud y agrega que la salida del sol, de la Luna y de “las otras estrellas” se da con diferencias horarias según el observador se encuentre ubicado más hacia el Oriente o hacia el Occidente, lo que también ocurre con los eclipses, que no son registrados en el mismo horario en las diferentes partes de la Tierra. En este sentido, el razonamiento es análogo al de Aristóteles, aunque incorpora un nuevo fundamento: la proporcionalidad existente entre el cambio horario y la distancia recorrida sobre la Tierra permite descartar —extensión de las características del *oikouménē* a la totalidad de la Tierra mediante— no solo la

⁹ El zodíaco es la franja del cielo que rodea a la eclíptica, dividida por los griegos en doce partes de 30° cada una, asociadas a una constelación. Al respecto, véase “Nociones preliminares” en el Apéndice (Ap.1).

idea de una Tierra plana o cóncava sino también la de una con forma de pirámide, de cubo, o cualquier otra figura poligonal (Ptolomeo 1984, 41). Según Pedersen y Jones (2011, 38 y 39), los paralelismos entre el argumento aristotélico y el ptolemaico tendría sus límites, puesto que el de Aristóteles supone previamente (y por argumentos físicos) que la Tierra es el centro del universo, lo que hace que el tratamiento astronómico de Ptolomeo tenga mayor independencia, unidad y coherencia que el de Aristóteles. Discutiré tal consideración más adelante, en el Capítulo 4.

Conjuntamente con el uso del horizonte para la determinación de la forma de la Tierra, Ptolomeo lo emplea en el capítulo 5 del Libro I para dirimir su posición y su tamaño con relación a los cielos. El argumento que utiliza para tal fin constituirá el epicentro del debate al que estarán abocados los próximos capítulos de esta Tesis. Aquí ofreceré una versión sintética del argumento en la que se problematizarán solamente los aspectos necesarios para comprender el desarrollo histórico del debate. No obstante, y puesto que los comentarios de los más destacados especialistas (Pedersen y Jones 2011; Taub 1993; Evans 1998; Toomer 1984) se han limitado a reproducir el argumento sin problematizarlo, ofreceré en el Apéndice un desarrollo más detallado en el que, mediante un *diálogo* con dichos comentaristas, realizaré un aporte que considero original a la comprensión del argumento. La forma más sencilla de dar cuenta del argumento es mediante dibujos. Puesto que esta parte del escrito ptolemaico no los contiene, es necesario realizarlos. Para tal fin, la única referencia son sus palabras, y su interpretación en un gráfico puede ser materia de discusión. En el Apéndice (y parcialmente en los próximos capítulos) ofrezco una justificación de la conveniencia de dibujar del modo en que lo hago las situaciones propuestas en el argumento.

El argumento de Ptolomeo presupone lo que se probó de manera independiente en los capítulos previos: por una parte, que la Tierra es esférica y, por otra, que se encuentra en algún lugar dentro de un universo esférico (Pedersen y Jones 2011, 39). Lo que Ptolomeo pretende es establecer que la Tierra está en el medio de los cielos; lo hace mediante una prueba indirecta

dado que analiza qué sucedería si se negara la centralidad, para arribar a la conclusión de la negación de esa premisa (o la doble negación de la centralidad) mediante *modus tollens*. Las otras opciones, cualitativamente determinadas, son tres: a) que se encuentre fuera del eje de rotación de la esfera de las estrellas fijas y equidistante de los polos, b) que se encuentre sobre el eje y más cerca de uno u otro polo, c) que se encuentre fuera del eje y más cerca de uno u otro polo (Ptolomeo 1984, 41). Estas alternativas pueden ser graficadas como sigue, siendo cada uno de los pequeños círculos negros una de las distintas posiciones posibles (las posiciones alternativas son cualitativas y tanto la dirección del desplazamiento como su magnitud fueron definidas arbitrariamente):

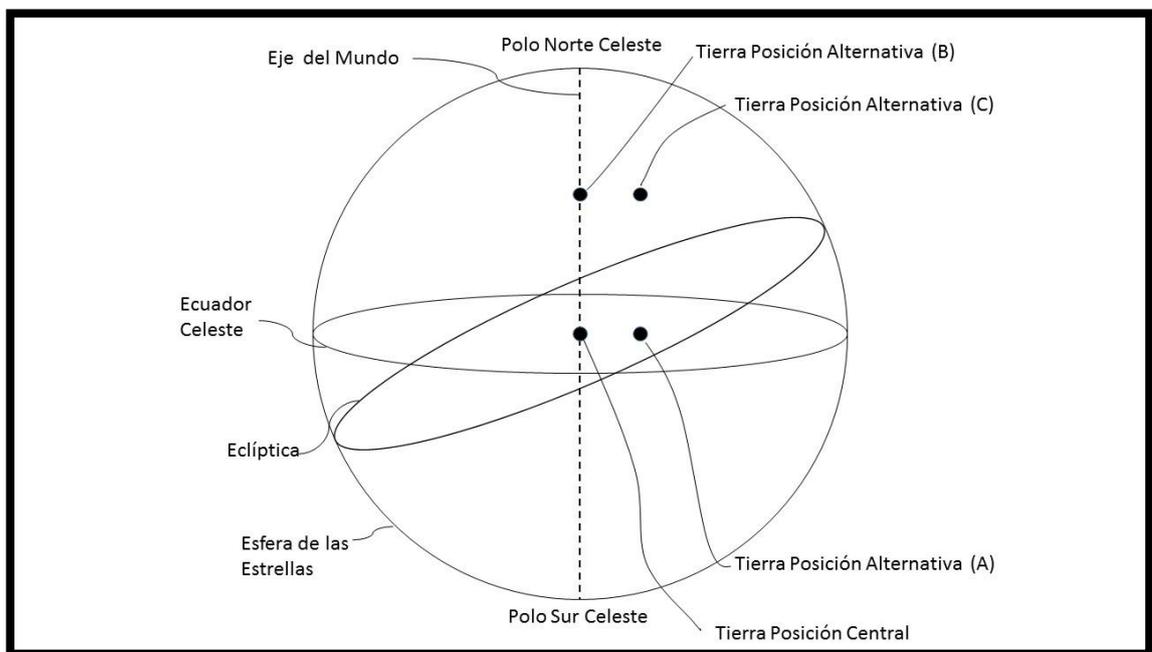


Figura 1.1: posiciones alternativas de la Tierra, según Ptolomeo.

El análisis, en cada caso, consiste en evaluar cuáles serían las consecuencias para un observador en una esfera recta (esto es, cuando el observador está situado sobre la línea del ecuador) y para un observador de una esfera oblicua o inclinada (esto es, con un observador situado en cualquier latitud excepto los polos y el ecuador).

Consideraré aquí solo la primera de las opciones y dejaré para el Apéndice las demás. Al respecto, dice:

“Si imaginamos [la Tierra] apartada hacia el cenit o hacia el nadir de algún observador, entonces, si estuviera en una esfera recta, él nunca experimentaría el equinoccio, porque el horizonte siempre dividiría los cielos en dos partes desiguales, una arriba y otra debajo de la Tierra” (Ptolomeo 1984, 41).

Lo que se puede graficar como sigue:

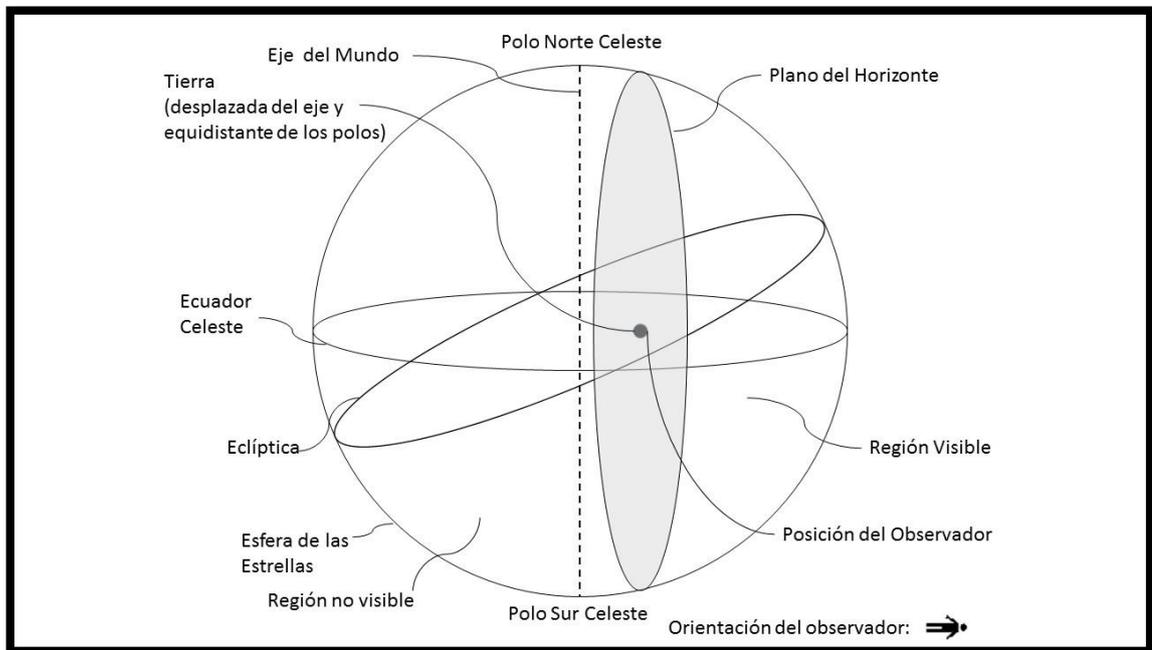


Figura 1.2: primera opción alternativa, con esfera *recta*.

El plano del horizonte (gris en las figuras) es tangente al pequeño círculo negro (la Tierra), que se ha desplazado en la dirección del cenit (esto es, “hacia arriba” de un observador cuya orientación es tal como la que se indica al lado de la leyenda “Posición del Observador”). Con un desplazamiento dado en esa dirección (podría haber sido la contraria, hacia el nadir), es claro como el horizonte dejaría por encima del observador una porción de cielo menor a la que dejaría debajo (situación exactamente inversa en caso de haber sido

desplazado hacia “abajo”). Al respecto, afirma Ptolomeo que ese observador nunca experimentaría equinoccio.

Lo que señala Ptolomeo es que en cualquier momento del año, estando el Sol en cualquiera de sus declinaciones ecuatoriales¹⁰ (esto es, al sur del ecuador, al norte del ecuador o en el ecuador) el Sol estaría más tiempo de un lado del horizonte que del otro de modo que nunca podría tener el día una duración igual a la noche para ese observador. En el caso dibujado, las noches serían siempre más largas que el día. Para poder visualizarlo, es necesario pensar al Sol en algún punto de la eclíptica y hacer girar a la esfera celeste (que arrastra a la eclíptica y al sol) dejando a la Tierra en su lugar.

El argumento continúa:

“si él estuviera en una esfera oblicua, o bien, otra vez, el equinoccio jamás ocurriría, o bien, [si ocurriera,] no estaría en una posición a mitad de camino entre los solsticios de verano y de invierno, dado que estos intervalos serían necesariamente desiguales, porque el ecuador —que es el más grande de todos los círculos paralelos dibujado con respecto a los polos del movimiento [diario]— ya no será bisecado por el horizonte; en su lugar [el horizonte bisecará] uno de los círculos paralelos al ecuador, o bien al norte o bien al sur de él” (Ptolomeo 1984, 41).

Lo que se puede graficar como sigue:

¹⁰ El Sol a lo largo del año va variando su *declinación ecuatorial* (que es la distancia a la que se encuentra un objeto celeste del ecuador) entre -23.5° y $+23.5^\circ$. Comprender este aspecto del movimiento solar es indispensable para seguir adecuadamente el argumento de Ptolomeo. Al respecto, véase “Nociones preliminares” en el Apéndice (Ap.1).

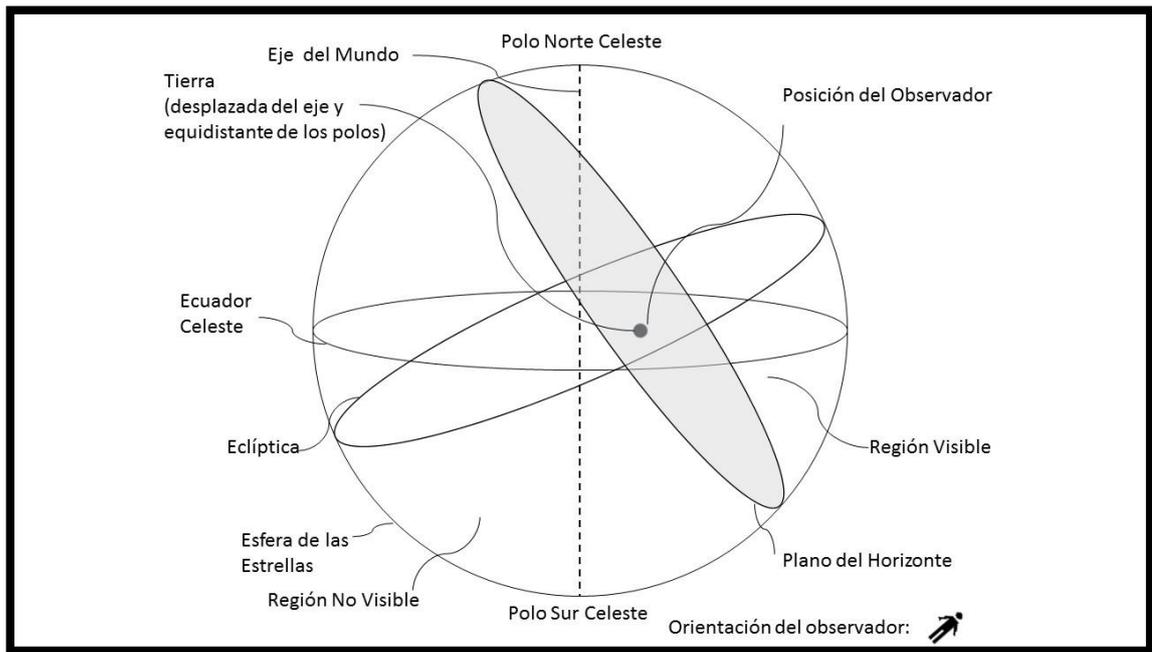


Figura 1.3: primera opción alternativa con esfera *oblicua*.

En este caso, debe considerarse a la Tierra desplazada en la misma dirección que antes; pero ahora ese desplazamiento no puede ser referido como “hacia el cenit” del observador puesto que éste ya no se encuentra parado sobre la línea del ecuador terrestre sino en algún otro punto de la Tierra, excluidos los polos (ver “orientación del observador” en la figura). Así, el horizonte ya no es perpendicular al ecuador sino que lo corta de manera inclinada (*esfera oblicua*). Para Ptolomeo, en este caso, según cómo se combinen las posiciones relativas, un observador terrestre podría experimentar o no equinoccio. Lo relevante, como se muestra en el Apéndice, es cuán apartada está la Tierra del centro en comparación con cuán apartado está el observador del ecuador terrestre. Intuitivamente, un observador muy poco apartado del ecuador (que es el más parecido desde el punto de vista de los fenómenos al observador sobre una esfera recta), tendrá equinoccio en la medida en que el apartamiento de la Tierra del centro del universo sea muy pequeño. A medida que a la Tierra se la ubica más lejos del centro, el observador debería estar cada vez apartado del ecuador. La clave está en que el horizonte corte al eje de rotación del cielo en una declinación por la que el Sol pase en algún momento del año. Puesto que el Sol nunca se encuentra más

allá de los 23.5° (norte o sur), hay una cota de apartamiento del observador para que tenga equinoccio. Porque si su horizonte corta más allá de los trópicos al eje, le sucederá algo análogo a lo que le sucedía al de la esfera recta: ningún día el Sol estaría tanto tiempo por encima como por debajo del horizonte.

Ahora bien, si ese observador estuviera en una posición relativa tal que fuera posible que experimentara el equinoccio, éste —señala Ptolomeo— no tendría lugar a mitad de camino entre los solsticios. Puesto que si, por ejemplo, el horizonte cortara al eje en los 15° N, es claro que estaría a $8,5^\circ$ del solsticio de junio y a 38.5° del solsticio de diciembre, con lo que las distancias temporales entre solsticios y equinoccios no serían equivalentes.

Luego añade que si el desplazamiento fuera hacia el este o el oeste del observador:

“encontrará que los tamaños y distancias de las estrellas no permanecerían constantes y sin cambios en los horizontes orientales y occidentales, y el intervalo de tiempo desde el amanecer hasta la culminación no sería igual al intervalo desde la culminación hasta la puesta” (Ptolomeo 1984, 42).

Este desplazamiento habría que considerarlo en la dirección de profundidad del dibujo. Que se mueva hacia el este significaría que se mueva hacia el fondo del dibujo, por donde las estrellas se elevan para ese observador; y que se mueva hacia el oeste significaría que se mueve hacia el frente, donde las estrellas descienden. En tales casos, el observador estaría más cerca de las estrellas en algún momento de la noche y más lejos en otros, por lo que deberían cambiar sus tamaños; adicionalmente, el intervalo de tiempo entre la salida y la culminación¹¹ sería distinto al intervalo entre la culminación y la puesta.

¹¹ Se denomina culminación de un astro al momento en el que alcanza su punto más elevado (respecto del horizonte) en su revolución diaria; esta se da cuando atraviesa el meridiano del

Ahora bien, todo esto que debiera ocurrir, señala Ptolomeo, no ocurre. La experiencia muestra, en primer lugar, que *siempre* una mitad del cielo se encuentra sobre el horizonte y la otra mitad por debajo, lo que puede ser apreciado en que siempre se ven seis de los doce signos del zodiaco —lo que constituye una observación estática¹²— o mediante la observación del movimiento de las estrellas: por ejemplo, para un observador en la esfera recta todas las estrellas fijas que se encuentran debajo del horizonte al iniciar una observación, se encontrarán sobre el horizonte al cabo de medio día, y para un observador en una esfera oblicua la estrella que se encuentra exactamente en el este en un momento determinado estará exactamente en el oeste al cabo de medio día (y viceversa). En segundo lugar, la experiencia muestra que los equinoccios tienen lugar al mismo tiempo en las diferentes latitudes de la Tierra y que los intervalos entre solsticios y equinoccios son isócronos. En tercer lugar, que el tamaño de las estrellas no varía con el correr de las horas, y el tiempo entre su salida y su culminación es equivalente al tiempo entre su culminación y su puesta.

Las consideraciones respecto de la posición “b)” son, como se ve en el Apéndice, bastante parecidas; y el motivo por el que la rechaza es exactamente el mismo: lo que se debería observar en tal situación no se observa. Descartadas las opciones “a)” y “b)” Ptolomeo considera conveniente rechazar “c)”, puesto que acumularía los errores de ambas. Quedan rechazadas, entonces, las únicas tres alternativas a la posición central de la Tierra dado que son contrarias a la experiencia observacional. Como lo dice el propio Ptolomeo:

“Para resumir, si la Tierra no reposara en la mitad [del universo], el orden entero de las cosas que observamos en

lugar (entendido como el perpendicular al horizonte que lo corta en sus puntos sur y norte). Al respecto, véase Ap.1.

¹² En el Capítulo 5, señalaré especialmente la relevancia de diferenciar entre las observaciones que requieren consistencia desde un punto de vista estático y las que lo requieren desde un punto de vista cinemático.

el incremento y decrecimiento del largo de la luz del día sería fundamentalmente desconcertante” (Ptolomeo 1984, 42).

Se trata, pues, de una estrategia de *inducción eliminatoria* que consiste en probar una hipótesis mediante la negación de sus alternativas. Dado que es una partición del espacio de probabilidades (esto es, son conjuntamente exhaustivas del espacio de posibilidades), la hipótesis no refutada queda verificada al modo de una *inducción por enumeración completa*. Consideraré en detalle este aspecto en el Capítulo 5.

Esta *experiencia de la bisección* implica una hipótesis defendida en *Almagesto I.6*: que el radio terrestre comparado con el de la esfera de las estrellas es despreciable. Esta hipótesis adicionalmente encuentra apoyatura en:

“el hecho de que los tamaños y las distancias entre las estrellas, en cualquier momento, parecen iguales y las mismas desde cualquier parte de la Tierra, así como las observaciones de los mismos objetos [celestes] desde distintas latitudes son halladas sin la más mínima discrepancia entre ellas” (Ptolomeo 1984, 43).

Esto es, que puesto que las observaciones desde distintas latitudes y longitudes no presentan diferencias detectables por medio de los sentidos o instrumentos en los tamaños y distancias angulares, dicha esfera está muy lejos. Consideraré esto, que técnicamente se denomina hoy como *falta de medición de paralaje estelar diurna*, con mayor detenimiento en el próximo capítulo.

Por otra parte, utiliza otras hipótesis que no son implicadas ni probadas independientemente, por lo que operan como supuestos; a ellas me refiero en la sección “Los supuestos” del Apéndice (Ap.3). Lo que aquí cabe señalar es que estas hipótesis presupuestas son las que permiten lo siguiente: que la Tierra sea desplazada hipotéticamente sin desplazar con ella a todos los círculos de la esfera celeste, lo que quedó expresado en mi forma de trazar los dibujos. Que Ptolomeo proceda de este modo solo es posible a condición de

que considere a la esfera como realmente existente, poseyendo ella un eje de rotación y siendo cada uno de los puntos y círculos del cielo los que definen los puntos y círculos de la Tierra, y no al revés; esto es, que el ecuador celeste define al terrestre, que los polos celestes definen al polo terrestre, etc. Por otro lado, y a partir de esto, es necesario que algunas de las partes de la esfera adquieran primacía sobre otras. Este aspecto es más difícil de apreciar, y quedará más claro a partir del desarrollo del trabajo. Por ejemplo, cuando al desplazar hipotéticamente a la Tierra supone que, bajo determinadas condiciones, no tendrían lugar los equinoccios, lo hace porque considera a la eclíptica como un círculo máximo de la esfera, y no como la mera proyección del movimiento solar sobre un fondo de estrellas. Analizaré las implicancias de estos supuestos en el Capítulo 5.

Considerado lo anterior, puede decirse a modo de síntesis que la prueba matemática más importante de Ptolomeo a favor de la posición central de la Tierra es establecida por la siguiente observación: el *horizonte* divide al medio a la esfera celeste y, por añadidura, a todos sus círculos máximos. A esto me refiero en este trabajo con *experiencia de la bisección de la esfera por el horizonte* (o, más sintéticamente y según el caso, *bisección de la esfera, o experiencia de la bisección*). Con esto, queda constituido lo que denomino *sentido ptolemaico de horizonte*. El *horizonte* es un círculo que resulta de la proyección de la visual de un observador sobre una esfera celeste realmente existente. Del hecho de que corte al medio a la esfera y a todos sus círculos máximos, se sigue que el *horizonte* es también un círculo máximo. De que sea un círculo máximo (siendo que es tangente a la superficie de la Tierra), se sigue que la Tierra está en el centro de la esfera y tiene un radio despreciable comparado con el de esta. Con este *sentido de horizonte*, y con todo lo que implica, dialogaría la astronomía a lo largo de 1500 años, lo que consideraré en los próximos capítulos.

CAPÍTULO

2

EL *HORIZONTE* Y EL HELIOCENTRISMO (I): LA *SOLUCIÓN COPERNICANA*

En este capítulo señalaré brevemente la vigencia del concepto ptolemaico de *horizonte* en la tradición astronómica occidental que recibió la modernidad. Analizaré la forma en la que Copérnico se apropió del concepto en el marco de su propuesta heliocéntrica, que requería necesariamente considerar a la Tierra desplazada del centro de la octava esfera. Para ello, señalaré sucintamente las ventajas que advertía el propio Copérnico sobre su sistema y la forma en la que se sobreponía a las posibles objeciones astronómicas. Ello permitirá apreciar las continuidades y rupturas en el *sentido* dado por Copérnico al concepto *horizonte* respecto de la tradición heredada. Lo anterior permitirá establecer el *sentido copernicano* de *horizonte*, y con ello avanzar en el sustento de las Tesis II y III.



2.1) La recepción medieval del concepto ptolemaico

Son comunes los señalamientos de que la astronomía occidental no había padecido grandes cambios desde las formulaciones de Ptolomeo. Esa tesis es demasiado general como para analizarla aquí. Lo cierto es que con relación al problema de la determinación por vías matemático-astronómicas de la posición de la Tierra, parece cierta. En los siglos siguientes a la formulación ptolemaica no se advierten grandes cambios en el *sentido* del concepto *horizonte* por parte de la tradición astronómica occidental. Algunos escritos de pensadores muy representativos del período permiten constatar la vigencia del argumento, y sospechar que no era materia de discusión.

Es el caso, por ejemplo, de Roberto Grosseteste (1175-1253), quien ofrece una definición explícita de *horizonte* que, con pequeñas variantes, es la que se puede encontrar en distintas obras (tanto *científicas* como *de divulgación*) del período medieval:

“El horizonte es el círculo que divide la mitad del cielo visible de la mitad del cielo no visible; horizonte se interpreta como ‘término de la visión’. Pues el rayo visual es como una línea recta que contiene a la tierra. Y si se considera una línea que toca a la tierra y proyectada desde algún punto de la tierra hasta el firmamento, rotando la línea por el punto en que toca la tierra, describirá al término del giro un círculo divisor del cielo en dos partes iguales, pues la magnitud de la tierra es insensible con respecto al cielo. Tal círculo es el horizonte desde el rayo visual descrito. Por lo cual es posible que haya tantos horizontes cuantos son los lugares sobre la tierra y la circunferencia” (Grosseteste 1988, 56).

Por una parte, la concepción general permanece y no desafía los términos en los que se planteaba la cuestión más de mil años antes: el *horizonte* es un círculo tangencial a la superficie terrestre que divide al cielo en dos partes iguales. Pero, por otra, puede advertirse un cierto anquilosamiento del concepto. Mientras que para Ptolomeo el *horizonte* no suponía la bisección (que le ocurría accidentalmente por estar la Tierra en el centro y ser su radio despreciable frente al del universo), en el caso de Grosseteste la bisección es

inherente a su definición: “es el círculo que divide la *mitad* del cielo visible de la *mitad* del cielo no visible”. Esto es, mientras que en la formulación ptolemaica no era una condición necesaria que fuera un círculo máximo aquí sí parece serlo; la propia definición establece que divide en mitades. Esto no es tan distinto de lo que se puede ver en los primeros fragmentos referidos en el Capítulo 1, pero sí pierde la sutileza alcanzada en las aproximaciones más técnicas consideradas allí (como las explícitas de Euclides y Gemino o la implícita de Ptolomeo). Algo análogo, quizá más sutil, puede verse en el *Tractatus De Sphaera* de Johannes de Sacrobosco (c. 1195-1256), donde después de presentar distintas partes de la esfera dice:

“Existe también otros dos círculos máximos en la esfera, a saber, el meridiano y el horizonte [...] el horizonte es realmente un círculo que divide el hemisferio inferior del superior. Por eso se lo denomina horizonte, esto es, limitante de la visión. El horizonte es llamado también círculo del hemisferio” (Sacrobosco 1478, Fol 11r).

Aquí nuevamente se puede ver que la condición de bisecar es inherente al concepto; no solo por cuanto se lo considera máximo, sino también porque deja testimonio de que en ese entonces también se lo llamaba círculo del hemisferio [*circulus hemisphaerii*]. Y los alcances del argumento, también permanecían intactos, aunque en lugar de apelar a los sentidos apelaba a la autoridad de Ptolomeo y los filósofos:

“Si la tierra se acercase más al firmamento en una parte que en otra, aquellos que estuvieran en aquella parte de la superficie de la tierra que se acercasen más al firmamento no verían la mitad del cielo; pero esto está en contra de Ptolomeo y de todos los filósofos que dicen que en cualquier parte en la que esté el hombre, seis signos salen y seis se ponen para él, y se le aparece siempre la mitad del cielo y la mitad se le oculta” (Sacrobosco 1478, Fol 11r).

Esa versión anquilosada de los conceptos era la que se reproducía en la época en la que Copérnico forjó su sistema astronómico¹³.

2.2) Los fundamentos del sistema copernicano

En el sistema copernicano, la Tierra era considerada un cuerpo esférico, móvil y desplazado del centro de las estrellas fijas, puesto que era más *razonable* considerar que la Tierra era la que se encontraba en movimiento y no la enorme esfera celeste. Si bien su trabajo completo e ineludible referencia para considerar su teoría es *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (publicado en 1543), ya en su breve opúsculo *Commentariolus* (c.1507) es posible apreciar las características principales de su sistema y advertir el conflicto que implica en términos del tema aquí estudiado. Los primeros tres postulados ya lo ponen de manifiesto:

“Primer postulado I: No existe un centro único de todos los círculos o esferas celestes.

Segundo postulado: El centro de la Tierra no es el centro del mundo, sino tan solo el centro de gravedad y el centro de la esfera lunar.

Tercer postulado: Todas las esferas giran en torno del Sol, que se encuentra en medio de todas ellas, razón por la cual el centro del mundo está situado en las proximidades del Sol” (Copérnico 1983, 27).

La principal característica implícita ya en ese tercer postulado en este cambio es la de haber convertido a la Tierra en un planeta más (Gingerich y MacLachlan 2005). Conviene considerar cuáles fueron los diferentes

¹³ Algo equivalente puede ser hallado en la astronomía islámica, a la que no me referiré en este trabajo. Un ejemplo es el tratado *Al-Qānūn al-Mas‘ūdi* de al-Bīrūnī (973-1048), que en sus capítulos iniciales reproduce por medio de paráfrasis aspectos centrales de Ptolomeo y, en especial, el argumento orientado a probar la centralidad de la Tierra (al respecto, véase Vernet 2000, 63 y ss.; y sobre la recepción de los textos griegos en el islam, véase Pines 1986).

argumentos ofrecidos por Copérnico en su *De Revolutionibus* para justificar la necesidad de redefinir la posición de la Tierra.

Uno de ellos es que el movimiento circular es connatural con la forma esférica de la Tierra. Pregunta Copérnico:

“por qué dudamos aún en concederle una movilidad por naturaleza congruente con su forma, en vez de deslizarse todo el mundo cuyos límites se ignoran y no se pueden conocer, y no confesamos sobre la revolución diaria que es apariencia en el cielo y verdad en la Tierra” (Copérnico 1997, 26).

Se trata, desde luego, mucho más de un argumento de tipo ontológico-metafísico que de uno astronómico: el movimiento terrestre es inferido a partir de una propiedad asignada como natural a la forma esférica, a partir de principios independientes de la experiencia (lo que, por otra parte, tiene la ventaja de no demandar del lector la aceptación de ningún *dato* ni *principio* estrictamente nuevo).

Un segundo elemento invocado en la fundamentación copernicana del movimiento de la Tierra también reposa sobre un dato por todos aceptado y conocido: el movimiento diurno de las estrellas. En un contexto en el que la existencia de la esfera de las estrellas fijas era algo indiscutido, la percepción de su movimiento podía deberse, o bien a su movimiento real, o bien al movimiento real del observador, o bien a una combinación de ambos. Copérnico señala que parece absurdo insistir en que el movimiento aparente del cielo fuera producto de su movimiento real: el trayecto que debería cubrir el cielo en veinticuatro horas para generar la apariencia del movimiento diario tendría que ser tan desmesuradamente grande, que la velocidad necesaria para tal revolución vuelve menos razonable a esta idea que a la de la rotación de la Tierra. En palabras de Copérnico:

“nos admiramos más de que tan vasto mundo dé la vuelta en un espacio de XXIII horas, en vez de hacerlo en una mínima parte del mismo que es la tierra” (Copérnico 1997, 23).

Curiosamente, esta segunda premisa demanda que se deje de lado no solo un aspecto central de la tradición ptolemaica sino también a la primera de las premisas señaladas: a saber, la connaturalidad entre la forma esférica y el movimiento circular, en este caso para el cielo, que es esférico y que no se mueve.

Un tercer elemento, y quizá el más decisivo, fue la posibilidad de hallar una única lógica tras los movimientos de los planetas sin necesidad de aceptar el carácter absoluto de la retrogradación:

“Séptimo postulado: Los movimientos aparentemente retrógrados y directos de los planetas no se deben en realidad a su propio movimiento, sino al de la Tierra. Por consiguiente, éste por sí sólo basta para explicar muchas de las aparentes irregularidades que en el cielo se observan” (Copérnico 1983, 27).

Aquí, nuevamente, lo determinante no fue tanto la información acumulada desde Ptolomeo como su nueva interpretación, que parecía ofrecer ciertas ventajas ¹⁴; incluso existen quienes señalan que las propias observaciones de Copérnico estaban más orientadas a hacer que su teoría funcionara que a constituir una base rigurosa a partir de la cual teorizar (Gingerich 1975). Lo cierto es que el hecho de suponer que los movimientos aparentes de retrogradación de los planetas no obedecían exclusivamente a su complejo movimiento absoluto —como proponía el sistema ptolemaico de epiciclos y deferentes— sino a la combinación de los movimientos de traslación absolutos de la Tierra y de cada planeta, simplificaba mucho la máquina del mundo, lo que equivalía —de acuerdo con Copérnico— a *perfeccionar* el sistema ptolemaico. Así, este tercer elemento de carácter más

¹⁴ El tema de las ventajas o desventajas comparativas del sistema copernicano fue objeto de cuantiosos debates que aún hoy siguen vigentes. Lakatos y Zahar (1975) señalaron que el sistema copernicano poseía una ventaja sobre el ptolemaico porque permitía el cálculo de las distancias planetarias, aspecto reseñado críticamente por Carman (2010). Swerdlow (2004, 88-89) alcanza a desglosar veintidós consecuencias de la teoría planetaria de Copérnico que sirven para explicar fenómenos que en el sistema ptolemaico requieren artificios adicionales.

astronómico invocaba en última instancia otro principio de carácter metafísico: la economía como *perfección*.

Una consideración adicional permite ponderar la naturaleza del quiebre copernicano. Me refiero a su necesidad (en el marco conceptual vigente) de postular un tercer movimiento de la Tierra, a veces tratado de manera anacrónica (y acaso incorrecta) como *movimiento de precesión*. Copérnico tenía, como todos los astrónomos desde Hiparco (c. 190-120 a. C.), conocimiento del desplazamiento relativo, en extensos períodos de tiempo, entre los polos del ecuador celeste y los de la eclíptica; adicionalmente, tenía información que Ptolomeo no había tenido sobre la irregularidad en tales desplazamientos (Swerdlow 1975). Pero el tercer movimiento, si bien servía para dar cuenta de tal desplazamiento, no había sido concebido para explicarlo; hubiera sido necesario, para Copérnico, aun si tal desplazamiento no hubiera existido. Al respecto dice en el *Commentariolus*:

“El tercer movimiento es el de la declinación. En efecto, el eje de rotación no es paralelo al eje del gran círculo, sino que en nuestros días guarda una inclinación de $23\ 1/2^{\circ}$ con respecto a éste. Por consiguiente, mientras que el centro de la Tierra yace siempre en el plano de la eclíptica (esto es, sobre la circunferencia del gran círculo), sus polos rotan, describiendo pequeños círculos alrededor de centros equidistantes del eje del gran círculo. El período de revolución es de aproximadamente un año, casi igual al del gran círculo. Pero el eje de éste mantiene una orientación invariable hacia ciertos puntos de la esfera de las estrellas fijas denominados polos de la eclíptica. Del mismo modo, el movimiento de declinación, combinado con el movimiento anual, mantendría a los polos de rotación orientados siempre hacia los mismos puntos del cielo si los períodos de revolución de dichos movimientos fueran exactamente iguales. Pero, sin embargo, con el paso del tiempo se ha evidenciado que esta inclinación de la Tierra con respecto a las estrellas fijas es variable” (Copérnico 1983, 27).

Así, entonces, sumado a los dos movimientos que simplificaban la máquina del mundo —el de traslación en torno al Sol (anual) y el de rotación sobre su eje (diario)—, era necesario postular un tercer movimiento. Si este

tercer movimiento tuviera el mismo período que el movimiento anual mantendría, combinado con él, a los polos “orientados siempre hacia los mismos puntos del cielo”; pero como ambos movimientos tienen períodos distintos, ocurre lo que hoy se denomina *movimiento de precesión*. Esto cobra sentido únicamente a partir de la idea de orbe. El eje de la Tierra está fijado a una esfera cristalina (su orbe) de manera tal que al cabo de medio año (medio giro del orbe), si solo tuvieran lugar el primer y el segundo movimiento, el eje terminaría apuntando en dirección contraria (cada polo en su hemisferio) de manera tal que su proyección habría descrito sobre el fondo del cielo un semicírculo en cada polo. Pero como esto no ocurre (los polos siempre apuntan aproximadamente en la misma dirección), eso significa que hay un movimiento compensatorio del eje respecto del orbe: este es el movimiento de declinación. Para ser más categórico: si el tercer movimiento no existiera, cada polo celeste describiría un círculo en torno a cada polo de la eclíptica (tal como lo hace con el movimiento de precesión) cada año. De modo que el tercer movimiento no es el *movimiento de precesión*; la precesión ocurriría por *ausencia de un movimiento* o, como es el caso, porque su presencia tiene un período distinto del movimiento con el que se compone. Esto es indicativo del grado de libertad con el que Copérnico trabajaba en el marco de la estructura conceptual de la astronomía preexistente: si bien podía postular el movimiento terrestre, debía considerar un movimiento *ad hoc* que más tarde resultaría superfluo.

Los argumentos mencionados le parecieron suficientes a Copérnico para proponer un sistema no geocéntrico y no geoestático. Su aceptación demandaba *únicamente* que se admitiera que los movimientos aparentes podían ser descompuestos en movimientos reales distintos de aquellos en los que se descomponía en el sistema dominante hasta ese entonces, con el que compartía muchos problemas (por ejemplo de adecuación empírica con los datos observacionales). Adicionalmente, presentaba problemas que eran mucho más graves a los ojos de las generaciones inmediatamente posteriores a la muerte de Copérnico (Westman 2011).

2.3) Los problemas astronómicos del sistema copernicano

Muchas veces las reconstrucciones historiográficas sobre la aceptación de la propuesta de Copérnico se centran en la dimensión física del problema en detrimento de la astronómica (Grant 1984). Sin lugar a dudas, existen razones para prestar mayor atención a los problemas físicos puesto que algunos de los obstáculos astronómicos más significativos fueron resueltos con posterioridad a la aceptación del copernicanismo sin que ello constituyera un problema. Pero no referir a las objeciones astronómicas o hacerlo solo de manera marginal es producto de una perspectiva historiográfica *whig* (Butterfield 1965), puesto que en ese entonces —y como mostraré en el próximo capítulo— tenían tanta jerarquía como los problemas físicos, o más. Por ello, y por la naturaleza de la indagación del presente trabajo, consideraré específicamente los argumentos astronómicos, lo que no implica desconocer su íntima articulación y co-determinación con los argumentos físicos (e inclusive teológicos). Entre ellos, en este capítulo consideraré dos conjuntos de problemas de los que el mismo Copérnico era perfectamente consciente.

Un primer conjunto de problemas resultaba del compromiso metafísico con el movimiento circular, a saber: las variaciones en la velocidad del Sol y la dificultad de poder establecer con claridad cuál es el centro del movimiento de los planetas y cuál el de la esfera de las estrellas fijas (de Solla Price 1969, 204-6). Al quitar del centro del mundo a la Tierra, Copérnico necesitó ocuparlo; y lo hizo, con cierto grado de ambigüedad, al menos de tres formas distintas¹⁵. Dicha ambigüedad se correspondía con la necesidad de *salvar las*

¹⁵ En el primer postulado del *Commentariolus* afirma que no existe un centro único de todos los círculos o esferas celestes y luego, en el tercero, que “Todas las esferas giran en torno al Sol, que se encuentra en medio de todas ellas, razón por la cual el centro del mundo está situado en las proximidades del Sol” (Copérnico 1983, 27). En este trabajo, no precisa en qué consiste esa proximidad. En el Capítulo X del Libro I de *De Revolutionibus*, el Sol es presentado como fijo pero sin ser el centro del universo: el centro de la órbita terrestre gira alrededor de un punto (el centro del mundo), el que a su vez lo hace en un círculo centrado en el Sol. La ventaja de esta segunda formulación consiste en que este centro desplazado se puede dar cuenta de las diferentes velocidades registradas en el movimiento aparente del Sol. Por último, en el Capítulo XXV del Libro Tercero de *De Revolutionibus*, Copérnico acepta la equivalencia matemática en caso de que sea el Sol sea el que se mueve en un pequeño

apariencias mediante movimientos circulares uniformes, lo que exigía una multiplicidad de ajustes matemáticos (Swerdlow y Neugebauer 1984). El principal problema, es que Copérnico no sacrificó la circularidad del mismo modo en que sacrificó la centralidad, posiblemente porque su concepción del cosmos continuaba comprometida con principios metafísicos y físicos (tal como el analizado a propósito del tercer movimiento de la Tierra). De modo que gran parte de los inconvenientes matemáticos que presentaba el modelo ptolemaico, persistían en el sistema copernicano con otro ropaje. Y su solución definitiva en el marco del heliocentrismo no tuvo lugar hasta que Johannes Kepler (1571-1630) formuló sus tres leyes sobre el movimiento planetario. En cualquier caso, no conviene considerar a esto como un problema específico de Copérnico. Algo análogo sucedía en el sistema ptolemaico respecto de la Tierra, que, aunque ocupaba el centro del universo, no era el centro de los movimientos de los planetas; estos se movían en epiciclos sobre deferentes que tenían por centro a la excéntrica (punto que no estaba en la Tierra) y tenían velocidad angular constante solo respecto del punto ecuante (situado a la misma distancia de la Tierra que la excéntrica, pero en dirección contraria (Pedersen y Jones 2011, 277 y ss.). No consideraré con mayor detalle el problema aquí, puesto que el argumento que apela a la experiencia de la bisección no depende del movimiento aparente de los planetas, sino únicamente del de la esfera de las estrellas y, en menor medida, del Sol.

El segundo conjunto de problemas estaba vinculado con las posiciones y los tamaños relativos de los cuerpos, lo que tuvo gran incidencia sobre el *horizonte*. La idea de la centralidad de la Tierra estaba, tal como se señaló, respaldada para los ptolemaicos por la *experiencia de la bisección de la esfera de las estrellas fijas por el horizonte* mientras que su reposo encontraba sustento, sobre todo, en la ausencia de medición de paralaje estelar en el curso del año.

círculo alrededor de un punto que no ocupa ningún cuerpo (Copérnico 1997, 219). Es más: plantea como razonable suponer que los planetas no giran exactamente en torno al sol, sino que lo hacen, en epiciclos de epiciclos, en torno al centro de la órbita de la Tierra.

Los datos que Copérnico manejaba al respecto continuaban siendo básicamente los mismos que aquellos utilizados en la Antigüedad y la Edad Media. Para poder negar, entonces, el geocentrismo y el geostatismo, Copérnico debió compatibilizar el movimiento terrestre con la ausencia de paralaje estelar y la descentración de la Tierra con la *experiencia de la bisección*. Su argumento en el capítulo VI del Libro I de su *De Revolutionibus* dice:

“El hecho de que esta tan gran masa de tierra no sea comparable a la magnitud del cielo, puede entenderse por lo siguiente: porque los círculos limitantes [horizonte] (pues así se traducen los *ὀρίζονταζ* de los griegos) cortan en dos toda la esfera del cielo, esto no podría suceder si la magnitud de la tierra comparada con el cielo, o su distancia desde el centro del mundo, fuera muy importante (...) En consecuencia, el círculo del horizonte cortará siempre en dos a la eclíptica, que es el círculo máximo de la esfera. Y como en la esfera, si un círculo corta por la mitad alguno de los círculos máximos, también el que corta es máximo” (Copérnico 1997, 22).

En un primera aproximación, este pasaje de Copérnico parece una reproducción casi exacta del argumento ptolemaico referido al tamaño relativo de la Tierra, con la inclusión de una definición de *horizonte* como *círculo limitante* y con una modificación que, como señalaré, resultará sustancial en el argumento. Con ella, se apunta a mostrar que, puesto que el horizonte divide al medio la eclíptica —que es un círculo máximo—, el horizonte mismo es un círculo máximo y comparte con la eclíptica su centro.

Ahora bien, que la Tierra no es un punto en sentido geométrico y que tiene una determinada extensión es algo innegable. Esto, como señalé en el Capítulo 1, impedía a Ptolomeo concebir al horizonte como un círculo máximo en sentido estricto, puesto que ello requería la coincidencia del plano que pasa por el centro de la Tierra —lo que hoy se denomina *horizonte geocéntrico*— y del que pasa por su superficie —hoy denominado *horizonte topocéntrico*—; lo anterior había instado a Ptolomeo a postular la despreciabilidad de la

distancia entre ambos horizontes respecto del octavo orbe. A este problema también se refirió Copérnico, del siguiente modo:

“a causa de la inmensidad con respecto a la tierra se asemejan a las paralelas, que parecen como una sola línea por la excesiva distancia del límite final, cuando el espacio mutuo que comprenden en relación a su longitud resulta de este modo incomparable para la percepción, como se demuestra en óptica” (Copérnico 1997, 22-3).

Este argumento, equivalente al de Ptolomeo, asume en la obra de Copérnico un papel diferente. Si bien en ambas obras afirmar eso supone aceptar la diferencia entre apariencia y realidad, en la obra copernicana dicha aceptación posee un carácter diferente. Porque constituye, de hecho, el primer paso en la concepción de la posibilidad de que la misma despreciabilidad se diese para el distanciamiento de la Tierra del centro de la esfera estelar. La clave está en afirmar que la bisección “no podría suceder si la magnitud de la tierra comparada con el cielo, o su distancia desde el centro del mundo, fuera muy importante”. La novedad es “o su distancia desde el centro del mundo”.

Utilizando el mismo procedimiento que Ptolomeo utilizaba para afirmar la despreciabilidad del radio terrestre en comparación con el octavo orbe, Copérnico postuló la despreciabilidad de la órbita terrestre: si el radio de la órbita de la Tierra fuese lo suficientemente grande (o la esfera de la estrellas lo suficientemente pequeña), el horizonte no bisecharía; el horizonte biseca, *ergo* la órbita de la Tierra es ínfima¹⁶. De aquí que sea impropio considerar, como lo hacen algunos exponentes de la *historia cognitiva* cuya propuesta consideraré en el Capítulo 6, que en la astronomía previa al siglo XVI el tamaño de la esfera era arbitrario: existen cotas mínimas que, en cada teoría, son distintas.

¹⁶ Tal como lo señala Kuhn, hay una equivalencia matemática en ambos argumentos: “[en el razonamiento de Copérnico] la observación sólo nos obliga a mantener la tierra dentro de una pequeña esfera concéntrica a la esfera estelar. Dentro de los límites de dicha esfera interior, la tierra puede desplazarse con total libertad sin violar las apariencias” (Kuhn 1984, 216).

Respecto de la paralaje estelar, la solución es análoga. Conviene recordar que por *paralaje* se entiende el fenómeno de variación de las distancias angulares de dos o más objetos observados conforme varía la posición del observador. El fenómeno depende, por una parte, de la razón entre el movimiento absoluto del observador y las distancias absolutas de lo observado y, por otra, de las condiciones técnicas para la observación y/o la medición. Ptolomeo había utilizado la ausencia de medición de paralaje estelar al desplazarse un observador sobre la superficie terrestre como medio para establecer la despreciable del radio de la Tierra comparado con el de la esfera estelar; esto es, había indicado que puesto que el movimiento del observador no implicaba un cambio en las distancias angulares de las estrellas (lo que hoy se conoce como *paralaje diurna*¹⁷), podía inferirse que el radio de la Tierra era despreciable (Ptolomeo 1984, 43). Copérnico utiliza el argumento de la no medición de paralaje diurna de las estrellas como modelo para extrapolarlo a la no medición de lo que hoy se denomina *paralaje anual* aplicándolo, ya no al observador en la superficie de la Tierra, sino a la Tierra en el orbe; señala que la falta de medición de paralaje se debe a que el radio del orbe terrestre es despreciable comparado con el de la esfera estelar¹⁸.

¹⁷ En un contexto geocéntrico, la paralaje de este tipo no se llamaba “diurna” (se la conocía simplemente como “paralaje”) por dos motivos. Primero, porque no había que diferenciarla de ninguna otra, dado que era la única concebida. Y segundo, porque con “diurno” se hace referencia los cambios que, de acuerdo con el heliocentrismo, padece un observador aun estando quieto sobre la Tierra producto de su movimiento de rotación (para diferenciarla de la *paralaje anual* producto de la traslación de la Tierra, que tiene mayor incidencia en la observación celeste).

¹⁸ La paralaje estelar anual fue medida por primera vez por Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), que en 1838 publicó un valor para la variación de la posición de Cygni 61 respecto del fondo de estrellas, en un contexto en el que ya muchos principios copernicanos habían sido completamente aceptados y otros habían sido superados (Bessel 1838). La paralaje estelar diurna es de menor incidencia, y aún hoy se la considera despreciable para la observación de las estrellas. Sobre los aspectos técnicos en la medición de paralaje estelar, véase van Maanen (1918); sobre las características de los intentos anteriores al de Bessel, véase Williams (1982).

2.4) Algunas consecuencias de la solución copernicana

Lo anterior muestra que el descentramiento de la Tierra fue, en términos de distancias relativas, despreciable: la Tierra pasó de estar en el centro a estar en un sitio que se encontraba muy próximo a él. El observador del sistema copernicano se encontraba, en términos relativos, tan distanciado del centro del mundo como lo estaba el observador del sistema ptolemaico. Esto ya estaba encerrado en la enunciación del cuarto postulado del *Commentariolus*:

“La razón entre la distancia del Sol a la Tierra y la distancia a la que está situada la esfera de las estrellas fijas es mucho menor que la razón entre el radio de la Tierra y la distancia que separa nuestro planeta del Sol, hasta el punto de que esta última resulta imperceptible en comparación con la altura del firmamento” (Copérnico 1983, 27).

Lo interesante, desde la perspectiva del presente trabajo, es que el *horizonte* pasaba, con ello, de ser un plano tangente a la superficie de la Tierra a ser, además, un plano tangente al orbe de la Tierra, de tamaño despreciable. Esa *pequeña* modificación conceptual referida al *horizonte* le bastaba a Copérnico para que su sistema salvara las apariencias; tanto la bisección como la ausencia de medición de paralaje estelar.

Esto muestra el alcance de las continuidades y rupturas en el concepto *horizonte* entre la formulación ptolemaica y la copernicana. El *horizonte* era definido en el contexto ptolemaico como un círculo máximo que pasa por los ojos del observador situado en la Tierra y que, dada la posición y el tamaño de la Tierra, divide a la esfera de las estrellas fijas en dos partes iguales. En líneas generales, el *horizonte* de Copérnico no presentaba variaciones relevantes respecto de esa definición explícita, lo que abona la tantas veces señalada continuidad que lo convertiría en un ptolemaico. Pero esto no es tan simple, puesto que, respecto del *uso*, sí hubo cambios. Mientras que para Ptolomeo el *horizonte probaba* la posición central de la Tierra, para Copérnico solo ponía una cota superior en el desplazamiento de la Tierra respecto del centro del octavo orbe (o, para decirlo de otro modo, *probaba solamente* su relativa

centralidad)¹⁹. Copérnico no desestimó la relevancia argumental de la bisección, sino que se esforzó por dar una interpretación de los datos que permitiera compatibilizarlos con una Tierra descentrada. Ello supuso un cambio de la función del horizonte en la estructura argumental; este cambio en su *uso* implicó en cierta medida un cambio en su *sentido*. El concepto *horizonte* debió articular satisfactoriamente las prerrogativas teóricas y los datos provenientes de la observación, y lo hizo bajo las condiciones de posibilidad existentes. Esto implicó ciertos cambios conceptuales; el más claro es el vinculado al tamaño relativo de la esfera de las estrellas, que supuso un cambio en el tamaño absoluto del horizonte. Por lo anterior, y aún a sabiendas de las enormes continuidades que presenta con Ptolomeo, es posible postular un *sentido copernicano*.

La variación más sustancial de algunos de los conceptos asociados (explícita o implícitamente) al concepto *horizonte* era condición necesaria para un cambio más profundo en el concepto. Esto, evidentemente o bien no era posible o bien no era necesario para Copérnico. Y sí lo fue para una generación posterior.

¹⁹ El tema de la relación entre la distancia de la Tierra al Sol y a la esfera de las estrellas fijas para Copérnico y Ptolomeo es interesante, pero demasiado extenso para considerarlo en detalle. Para Ptolomeo, en *Las hipótesis planetarias*, la distancia a la esfera de las estrellas fijas estaba dada por la contigüidad de las esferas de cada planeta; en la medida en que la de las fijas era la última debía estar más allá de la del último planeta (Saturno), cuya distancia mayor era 19.865 radios terrestres; por lo que, si no había vacío, esa era la distancia a la que se encontraba la esfera de las fijas (Ptolomeo 1967, 8-9). A los fines de este trabajo, alcanza con señalar que para Copérnico, debía ser mucho mayor puesto que la distancia al Sol debía ser despreciable, dado que al mirar el cielo no observaba paralaje estelar. Henderson (1991) ofrece un estudio comparativo detallado sobre el cálculo de la distancia al Tierra-Sol en Ptolomeo y Copérnico, y Van Helden (1985) ofrece un estudio sobre las técnicas de medición del universo a lo largo de la historia.

CAPÍTULO

3

EL *HORIZONTE* Y EL HELIOCENTRISMO (II): LA *SOLUCIÓN GALILEANA*

En este Capítulo consideraré la forma en la que fue recibida la propuesta copernicana a fines del siglo XVI y la importancia que adquirió entre los astrónomos el argumento que apelaba a la *experiencia de la bisección*. Revisaré las características de las objeciones recibidas, especialmente por parte de Tycho Brahe. Me detendré en un intercambio epistolar entre Francesco Ingoli y Galileo que permite apreciar el estado de la discusión a inicios del siglo XVII. A partir de la respuesta dada por Galileo a Ingoli, delinearé las características de la *solución galileana*, que, según mostraré, son de naturaleza muy diferente a las de la *solución copernicana*. Con este capítulo concluyo la primera parte del trabajo destinada a mostrar las Tesis I a III.



3.1) La recepción de la solución copernicana

El grado de satisfacción en la articulación entre teoría y observación en la propuesta de Copérnico solo puede ser valorado a partir del desarrollo histórico del copernicanismo²⁰. Si bien aún hoy existen muchas discusiones sobre la naturaleza de su difusión en las décadas inmediatamente posteriores a su muerte, existe cierto consenso al señalar que hasta las décadas del '70 o del '80 no hubo aproximaciones realistas a las ideas copernicanas, y que algunas de las primeras fueron realizadas justamente por pensadores que no adherían a ellas (Gingerich 1975, 10-15). De acuerdo con Westman (2011), pueden diferenciarse tres generaciones de copernicanos entre la obra de Copérnico y la consolidación de su sistema: la primera, personificada en Georg Rheticus (1514-1574), la segunda generación por Michael Maestlin (c. 1550-1631) y Thomas Digges (c. 1546-1595), y la tercera por Kepler y Galileo.

Contemporáneo de esa segunda generación fue Christoph Rothmann (1555-1597), quien defendió algunas ideas copernicanas y que pasó a la historia sobre todo por un intercambio epistolar con Tycho Brahe (1546-1601) a propósito de ellas (Moran 1982). Tradicionalmente, se suele ver a Tycho como un astrónomo reaccionario frente al cambio que Copérnico introdujo y que finalmente terminaría por conquistar el pensamiento occidental. Pero, despojados de esa perspectiva *whig*, podemos advertir en el pensamiento de Tycho una actitud rebelde frente a la tradición y, así, tanto o más revolucionaria que la del mismo Copérnico.

El sistema ticomónico apuntó a dar una buena explicación del movimiento planetario mediante la suposición de que el Sol se encontraba en el centro de sus movimientos, pero dejando a la Tierra como centro inmóvil del

²⁰ El término "copernicanismo" no está exento de objeciones, y existen quienes se resisten a utilizarlo (por ejemplo, Westman 2011, 21). Aquí lo utilizaré instrumentalmente para referir a las ideas de aquellos pensadores que con posterioridad a Copérnico a) afirmaron el heliocentrismo, sugiriendo que el Sol era (al menos aproximadamente) el centro del movimiento planetario y, simultáneamente, b) negaron el geoestatismo, mediante la defensa de la idea de que la Tierra posee al menos dos movimientos (de rotación y traslación).

movimiento solar. Tal como lo expresó el mismo Tycho en alguna ocasión, su sistema consistía en eliminar el absurdo matemático de Ptolomeo y el absurdo físico de Copérnico (Thoren y Christianson 1990, 239).

Pero esta solución traía aparejada una consecuencia que a los ojos de sus contemporáneos parecía tanto o más absurda: los orbes de Marte, Mercurio y Venus se entrecruzaban con el del Sol. Esta propuesta no era consistente con la idea vigente de las esferas celestes como materialmente constituidas, idea que Tycho habría abandonado producto de la interpretación de los cometas como cuerpos celestes (Rosen 1985) y, de acuerdo con algunos autores (Goldstein y Barker 1995), también gracias a los aportes teóricos de Rothmann, quien afirmaba que la sustancia del cielo era un fluido continuo en el que los planetas se movían libremente.

Generalmente, la radicalidad de esta transformación conceptual —que posiblemente fue condición de posibilidad para el aporte kepleriano de órbitas elípticas (Donahue 1981)— es opacada por la resistencia de Tycho a aceptar el movimiento de la Tierra, lo que tiende a ubicarlo como un pensador *reaccionario* frente a la denominada *revolución científica* (por ejemplo, Thoren y Christianson 1990, 255). Esto es, sin dudas, una apreciación parcial: tal como lo señala Blair, la actitud de Tycho frente a la autoridad de los antiguos no era de confianza ciega sino que, muy por el contrario, el cielo era para él la única guía que debía seguirse (Blair 1990, 375). Esa actitud puede apreciarse con total claridad en las características del rechazo al copernicanismo en distintos tramos de su obra y, muy en particular, en el marco del intercambio epistolar con Rothmann. En él puede advertirse la forma en la que Tycho interpretaba las ideas copernicanas concernientes a la posición y el movimiento de la Tierra (con el subsecuente problema del tamaño relativo tanto de su radio como el del radio de su supuesta órbita) y las razones de su rechazo.

En este contexto, el intercambio epistolar con Rothmann se ofrece como un espacio de condensación de algunos elementos especialmente

significativos desde el punto de vista de la presente indagación. Allí, como en otras partes de su obra, el rechazo al movimiento terrestre se conjuga con cierto respeto a Copérnico, que lleva a que por ejemplo exprese que le parece más absurda e intolerable la idea de ecuante de Ptolomeo que la idea de movimiento terrestre de Copérnico (Blair 1990).

Las razones fundamentales para el rechazo por parte de Tycho del movimiento terrestre tenían su fundamento en la continuidad de la concepción física de corte aristotélico. Simultáneamente, y tal como queda expresado a partir del intercambio con Rothmann, las escrituras sagradas no parecían dejar lugar a dudas sobre el reposo de la Tierra y Tycho se negaba a pensar que cualquier escritura sagrada pudiera contener falsedades (ni siquiera suponiendo que tuviesen un fin propedéutico o una estructura alegórica). A tal punto que, como señala Blair (1990), procuró buscar y establecer con claridad que no había pasaje de las escrituras que supusiera la existencia material de las esferas celestes, contra las que iba su sistema.

Pero si bien es cierto que parte del rechazo a Copérnico era por razones físicas y teológicas que eran incompatibles con el movimiento terrestre, el centro de atención estaba en las razones astronómicas que impedían pensar a la Tierra descentrada. Como se sabe, Tycho destinó gran parte de su esfuerzo a la tan mentada *restauración de la astronomía*, entendida ante todo como el despojo de aquellos elementos que hacían de las observaciones fuentes no fidedignas para la descripción y comprensión de los movimientos celestes. Así, el perfeccionamiento de técnicas e instrumentos para la medición posiblemente lo consagró como el astrónomo más preciso de la era pre-telescópica.

La equivalencia matemática entre los sistemas ptolemaico y copernicano, hizo que los rechazos de Tycho a uno y a otro fueran, en cierto nivel, análogos. Pero el sistema copernicano acumulaba, además, un conjunto de objeciones matemáticas que el sistema ptolemaico no. Entre esos problemas, se encontraban algunos que no consideraré aquí, como la cantidad de paralaje

(*diurna*) de los planetas y del Sol o la no retrogradación de los cometas. Y también se encontraba presente un argumento de interés para este trabajo: la ausencia de medición de paralaje estelar.

La *solución copernicana* al problema de la ausencia de paralaje estelar considerada en el Capítulo anterior, consistente en afirmar la despreciabilidad del radio de la órbita frente al radio de la esfera de las estrellas fijas, era insuficiente a los ojos de Tycho. Al respecto, decía en una de sus cartas a Rothmann que, para que eso fuera posible, las estrellas deberían apartarse 7.850.000 semidiámetros terrestres, lo que haría que:

“aquellas estrellas de tercera magnitud que poseen un minuto de diámetro serán necesariamente iguales a la órbita anual [de la tierra]; esto es, su diámetro comprendería 2284 semidiámetros terrestres. [...] Qué diremos de las estrellas de primera magnitud, de las cuales algunas ocupan dos y algunas tres minutos de diámetro visible [...] Deduce, si te place, geoméricamente y verás por inferencia cuantos absurdos [...] son concomitantes con esta presunción” (Brahe 1919, 6:197).

Como se puede apreciar, existe un problema matemático-astronómico intrínseco a la *solución copernicana*, a saber: suponer a la esfera de las estrellas fijas a una distancia suficiente para que la órbita de la Tierra no genere paralaje anual y que el horizonte continúe bisecándola, dado que el tamaño angular (aparente) de las estrellas es el mismo, obliga a concebirlas con un tamaño absoluto mucho mayor. Copérnico no había ofrecido una solución a este problema en el curso de su obra, con lo que desconocemos lo que podría haber argumentado. Sí podemos saber que el conjunto de argumentos resultó efectivo contra Rothmann, que abandonó el copernicanismo antes de su muerte.

3.2) La respuesta de Galileo a las objeciones

La contribución de Galileo a la solución de muchos de los problemas formulados por Ptolomeo y los ptolemaicos se encuentra sistematizada en sus *Diálogos sobre dos sistemas máximos* (publicados en 1632). Pero mucho antes

puede detectarse con toda claridad la clave de la reinterpretación de la experiencia de la bisección, justamente en un escrito que prefigura muchos de los aspectos del *Diálogo*. Dicho escrito fue desarrollado en el marco de un intercambio epistolar que tuvo lugar en torno a 1620, cuando Galileo se dispuso a responder un conjunto de objeciones que un jurista de Rávena, Francesco Ingoli, le había realizado al sistema copernicano mediante una carta que le había enviado casi una década antes tras una discusión oral²¹.

En el documento de Ingoli, las objeciones se encontraban agrupadas en argumentos teológicos, físicos y astronómicos. Entre los argumentos astronómicos se encontraba el de Ptolomeo sobre la bisección reforzado por la respuesta que Tycho le había dado a Rothmann en otra de sus cartas (Brahe 1919, 6:218 y ss.). En palabras de Ingoli:

“Que verdaderamente la mitad del cielo no sería observada si la Tierra no ocupara el centro, consta de la definición de semicírculo; de hecho, solamente el diámetro, que siempre pasa por el centro del círculo, divide el propio círculo en dos semicírculos iguales. Tampoco satisface totalmente la objeción por la cual se dice que el diámetro del círculo deferente de la Tierra en comparación con la distancia máxima del octavo orbe se hace para nosotros tan pequeño, que en el propio octavo orbe subtiende solamente 20'. En efecto para que la Tierra se corra una distancia imperceptible con respecto al orbe estelar, es necesario que esté distante de él 14 mil de sus semidiámetros, conforme el precepto de Tycho (...) y que su círculo deferente (...) diste de la octava esfera 50/14 de sus semidiámetros, lo que significa 16506000 semidiámetros terrestres: esa distancia tan inmensa no solo muestra que el universo es asimétrico, sino que también prueba (...) que las estrellas fijas son de tal tamaño que superan o igualan en grandeza al propio círculo deferente de la Tierra” (Ingoli 1933).

²¹ Sobre la historia, las características y los alcances de este debate, véase Mariconda (2005). En el mismo volumen pueden consultarse las correspondientes traducciones al portugués del intercambio epistolar, que fueron de suma utilidad para la traducción de los fragmentos aquí referidos de las cartas originales, en latín la de Ingoli y en italiano la de Galileo.

En primer lugar, se puede apreciar una insistencia en la vigencia del argumento ptolemaico. Esto es indicativo de cómo la propuesta copernicana no había modificado *per se* el estatus del argumento. Como muestra, y si bien no es mi interés realizar una aproximación especialmente al cambio conceptual en la propia obra galileana, vale señalar que menos de veinte años antes de recibir la carta de Ingoli, es posible leer un Galileo suscribiendo en su *Trattato della Sfera ovvero Cosmografia* el argumento de la bisección, señalando que es fácil probarla:

“observando dos estrellas diametralmente opuestas, de las cuales una nazca en el mismo momento en la que la otra se pone. Porque si el arco del cielo aparente, traspuesto de la estrella oriental a la occidental, fuese menor o mayor que medio círculo, cuando la oriental llegase al ocaso, la otra, no habría aun retornado al horizonte o ya lo habría pasado; lo que repugna a las observaciones, las cuales demuestran esto: que para tales estrellas diametralmente opuestas, el orto y el ocaso se hacen alternadamente en el mismo momento de tiempo; lo que es una evidencia cierta de que el arco entre tales estrellas es por encima de ellas igual al arco que está por debajo” (Galilei 1891, 221-2).

Lo anterior lo llevaba, hacia el capítulo denominado *Dell'Orizzonte*, a decir:

“estando la Tierra, como se ha dicho más arriba, en el centro de la esfera celeste, a nosotros, que estamos sobre la superficie de esta Tierra, solo la mitad del cielo se nos aparte y la otra está oculta; así que si imagináramos, que por nuestros ojos se produjera una superficie hasta el extremo del cielo aparente, ésta dividirá la esfera celeste en dos partes iguales, pasando por su centro y siendo, en consecuencia, un círculo máximo; el cual, de esta propiedad de dividir y distinguir la parte del cielo aparente de la oculta, se llama horizonte, esto es, divisor (...) los horizontes son infinitos: porque cualquier vuelta que demos sobre la superficie de la tierra, iremos, por su redondez, a descubrir y perder de vista una parte del cielo y, en consecuencia, a variar el horizonte. No pueden sino solo dos puntos sobre la tierra tener el mismo horizonte, y estos son los puntos opuestos diametralmente; y nuestras antípodas tienen el mismo horizonte que nosotros siendo a ellos aparente aquella mitad del cielo que a nosotros se nos esconde” (Galilei 1891, 227).

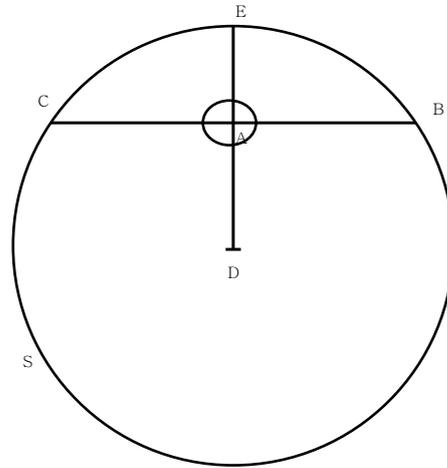
Pero esas ideas ya no las compartía el Galileo copernicano hacia 1624. Y es ese el que responde a la misiva de Ingoli, que tomando los cálculos de Tycho se escandaliza sobre la asimetría que tendría el universo y/o el tamaño excesivamente grande que tendrían las estrellas. A lo primero, Galileo le cuestiona el criterio de *simetría* y le objeta que no puede hablar de asimetría sin saber siquiera si el universo es o no finito. Sobre lo segundo, corrige el dato, y le recuerda que él ya mostró que ninguna estrella fija subtiende ni 2 ni 3 minutos sino como mucho 5 segundos. Esta observación galileana depende o bien de la aceptación práctica de la mayor fidelidad de la observación mediante el telescopio, o bien de la aceptación teórica de que la refracción atmosférica distorsiona la apariencia de las estrellas, haciendo que se vean varias veces más grandes de lo que se las vería sin atmósfera. A esto me referiré en el próximo capítulo.

Pero lo verdaderamente interesante es que a Galileo, a quien no le preocuparían tales asimetrías o tamaños absolutos, igualmente responde al argumento de la bisección de una manera original. Señala que si la Tierra se mueve, el horizonte lo hace con ella; y que, por tanto, si dos puntos celestes sobre el horizonte son advertidos como opuestos por un observador, necesariamente deberán aparecer opuestos al cabo de medio giro de la Tierra, no constituyendo prueba alguna el que lo sean para la determinación de la posición de la Tierra en el centro de la esfera de las estrellas fijas (sobre cuya existencia, tamaño y forma, por otra parte, confiesa que poco se puede afirmar).

Galileo advierte con ello que los pensadores anteriores (aun Copérnico) no habían podido abandonar las ideas previas y arribar a la “verdadera y facilísima respuesta” porque, interpreto, el concepto *horizonte* con el que continuaban comprometidos era en gran medida el ptolemaico. Su ejemplo es como sigue:

“Y para un entendimiento más claro, sea la esfera de las estrellas, cuyo centro es D, y la Tierra A alejada cuanto se

quiera de ese centro, y sea el horizonte siguiendo la línea recta CB.



Ahora, si nosotros, estando quietos la Tierra y el horizonte, supusiéramos que la esfera de las estrellas se mueve en torno a su centro D, y una estrella naciera en C, mientras la otra se pone en B, es claro que cuando la C esté en B, la B no habrá retornado a C (siendo el arco sobre la Tierra CEB menor del que permanece debajo de la Tierra); en cambio estará en S (supuesto el arco BS igual al arco CEB): tardará entonces la estrella B en nacer, después de la puesta de la C, cuanto es el tiempo del arco SC. Pero supongamos ahora que la esfera de las estrellas está fija, y la Tierra móvil sobre sí misma, la cual portará consigo el horizonte CB; y no hay duda alguna de que cuanto el término B del horizonte estará en C, el otro C estará en B; y donde la primera de las dos estrellas B y C una estaba en el término oriental y la otra en el occidental, hecha tal conversión de la Tierra retornarán en el mismo momento de tiempo invariablemente en los mismos términos; tal que, como ves, ese nacimiento y ocultamiento invariables nada prueban acerca del sitio de la Tierra. Como tampoco de aquello que acrecienta, esto es, que al notarse sobre el círculo vertical siempre 90 grados del cenit al horizonte, se puede inferir que nosotros vemos la mitad del cielo; porque representando en la misma figura la línea BC un horizonte cualquiera, si del centro A se levantara sobre BC una perpendicular que terminara en el punto vertical, ésta contendrá de aquí y de allá dos ángulos rectos, cada uno

de los cuales de 90 grados: pues, aquello que son los dos arcos BE, EC, ni se ve, ni se sabe ni se puede saber, ni le sirve a nadie saberlo” (Galilei 1933, 526-8).

El argumento de Galileo apunta a mostrar que, tanto quienes esgrimían el comportamiento de los astros sobre el horizonte para mostrar a la posición central de la Tierra como quienes lo utilizaban en sentido opuesto, incurrían en el mismo error: continuar pensando al *horizonte* como si la Tierra se encontrara en reposo. Al pensarlo de ese modo, el cielo y su movimiento eran absolutos y, dados los fenómenos, se podía inferir la posición del observador y, consecuentemente, de la Tierra. Pero no hay razones para pensar al *horizonte* de ese modo. Y si uno cambia los presupuestos respecto del *horizonte* y del movimiento celeste, alcanza el mismo grado de consistencia.

Lo que Galileo evidencia es que dos puntos opuestos en el horizonte no son opuestos sino en virtud de la posición del observador; y que, por tanto, el hecho de que al cabo de doce horas las mismas estrellas se encuentren opuestas estando en oriente la que antes estaba en occidente (y viceversa) no es prueba de la centralidad absoluta del observador sino de su centralidad relativa respecto a esos dos puntos. Lo mismo ocurriría, desde luego, con los puntos equinociales. Ahora bien, dado que esos dos puntos fueron escogidos desde la posición del observador (y, por tanto, fueron definidos por ella), entonces el hecho de que sean opuestos para ese observador no es prueba de nada.

Desde el punto de vista de la rotación diaria, es indistinto si la Tierra se encuentra en el centro del universo o no, dado que es ella la que define la rotación y por tanto, los puntos en oposición. Lo mismo ocurre con relación a la traslación: es indistinto si el sistema Tierra-Sol se encuentra en el centro o no. Desde luego, en ambos casos, tiene que suponerse una despreciabilidad de la distancia del observador respecto del centro de movimiento (centro de la Tierra, o Sol respectivamente), pero eso no constituye problema. Y tampoco es esa la clave de la *solución galileana*, como sí lo era en la *solución copernicana*.

3.3) El quiebre de la solución galileana

Galileo da un paso cualitativamente distinto al de Copérnico en el abandono de la identidad entre apariencia y realidad; asume a la esfera de las estrellas como una apariencia para cada observador dado, y al *horizonte* como un círculo máximo de esa esfera aparente con centro necesario en el observador. Esto le permite afrontar de conjunto a las objeciones relativas al *horizonte*.

Lo que Galileo está afirmando es que no existe un ecuador celeste que sea independiente del ecuador terrestre, dado que el ecuador celeste se encuentra definido por el movimiento de rotación terrestre y no por el movimiento de rotación celeste. Del mismo modo, no existe una eclíptica independiente del movimiento de traslación terrestre, dado que es esta la que define a aquella, y no el movimiento absoluto del Sol. Así, el horizonte no puede sino dividir al medio a la esfera y al ecuador, dado que los tres se encuentran definidos por la Tierra (independientemente de su posición en el universo). Y tampoco podría sino dividir al medio a la eclíptica siempre que la Tierra y el Sol constituyan un sistema (independientemente de cuál cuerpo se traslade en torno al otro). Por tal razón, las estaciones no pueden sino durar lo que duran; definido esto por las posiciones relativas del Sol y de la Tierra pero no por la posición absoluta de esta última.

Si fuera dado a Galileo dibujar una esfera celeste tal como la dibujé para interpretar las palabras de Ptolomeo en el Capítulo 1, no dudaría en llevar, en cada uno de los casos hipotéticos, al ecuador celeste y a la eclíptica junto con la Tierra. Así, el horizonte no es más uno de los dos únicos círculos relativos al observador (junto con el meridiano), tal como lo era para la tradición. Es uno de los tantos círculos relativos al observador, junto con el meridiano, pero también con el ecuador, la eclíptica, los coluros, etc. La forma en la que el horizonte se vincula con los otros círculos celestes, entonces, ya no prueba nada. Como tampoco probaba nada para la tradición anterior que el horizonte cortara al medio al meridiano del lugar, dado que era una verdad autoevidente.

Con Galileo, la totalidad del fenómeno visible se relativiza al observador, siendo consecuencia de una realidad muy distinta de la concebida por Ptolomeo (y por Copérnico), lo que condujo a que el concepto *apariencia* fuera radicalmente distinto. Así, el *sentido galileano* supone que el horizonte es un círculo que resulta de la proyección de la visual de un observador sobre una esfera aparente con radio indeterminado y con centro en el mismo observador. Del hecho de que la esfera y el círculo tengan el mismo centro y el mismo radio se sigue necesariamente que sea un círculo máximo y corte al medio a todos los círculos máximos. Por tanto, el hecho de que divida al medio a la esfera no es prueba de nada. Este es el sentido que asume hoy en la astronomía de posición el concepto *horizonte*.

Advierto en este nuevo *sentido* un quiebre radical respecto del *sentido ptolemaico* y del *copernicano*, que será objeto de consideración en la segunda y en la tercera parte de este trabajo. Este cambio en el sentido supone un cambio más general en el significado del concepto, puesto que el referente de este concepto ya no guarda casi semejanzas con el del concepto forjado con los sentidos ptolemaico o copernicano. Consideraré esto en las conclusiones.

CAPÍTULO

4

LA DIMENSIÓN ÓPTICA DE LA EXPERIENCIA DE LA BISECCIÓN

En este capítulo daré sustento a la Tesis IV. Para ello, estableceré el papel que la teoría óptica desempeñó en la determinación del carácter de lo observado en astronomía a propósito del argumento de la bisección estudiado en los Capítulos 1 a 3. Señalaré que si bien la dimensión óptica de la astronomía no era ignorada por los pensadores antiguos y medievales, el estudio del argumento permite establecer que la actitud con la que se enfrentaron a ella fue notablemente distinta a la de los astrónomos modernos, en lo que constituye un ejemplo claro de *carga teórica de la observación*. Este cambio de actitud, que se reflejó en un cambio disciplinar que dio origen a la óptica astronómica, supuso un cuestionamiento de la *base empírica* en la que se sustentaba el argumento ptolemaico.



4.1) La refracción en la observación celeste

De los distintos procesos mediante los cuales los astrónomos fueron abandonando a lo largo de la historia la identidad entre apariencia y realidad, hay uno que concita muy poca atención entre los historiadores de la astronomía: aquel que supuso reconocer que las posiciones *observadas* de los astros en el cielo no necesariamente coinciden con las denominadas posiciones *reales* (siempre entendidas como posiciones angulares). Esto es, que un astro que se observa en determinada dirección no necesariamente se encuentra en esa dirección en la que se lo observa, puesto que la luz puede sufrir algún tipo de desviación en el recorrido que traza hasta el observador. Esta desatención por parte de los historiadores se debe, al menos parcialmente, a que la importancia dada por los astrónomos a lo largo de la historia al posible divorcio entre posiciones observadas y posiciones reales fue bastante menor. Durante largo tiempo, el comportamiento de la luz constituyó un objeto de estudio casi exclusivo de la óptica, que mantuvo vínculos cambiantes con la astronomía. Aquí no pretendo realizar una historia de la óptica sino apenas un recorrido de los vínculos que tuvo con la astronomía a propósito del tema estudiado en la primera parte de la Tesis. En tal sentido, el problema medular a considerar será el de la refracción atmosférica.

Se denomina refracción al fenómeno que tiene lugar cuando un rayo de luz atraviesa una superficie que separa dos medios con diferentes densidades, como se puede ver en la Figura 4.1. En algunos casos se puede apreciar a simple vista, por ejemplo cuando ciertos objetos parecen deformarse cuando se los mira dentro de un medio acuoso desde afuera. Dependiendo de algunas variables (como el ángulo de incidencia del rayo de luz y las densidades relativas de los medios que atraviesa), la luz modificará la dirección en la que viaja acercándose o alejándose de la normal.

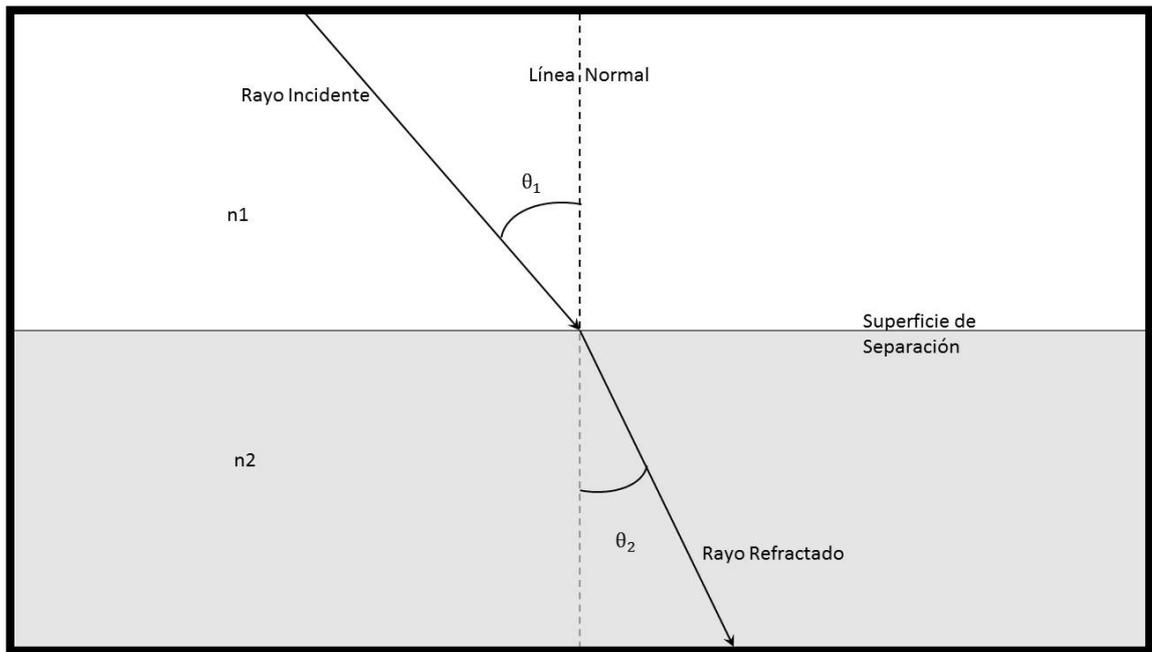


Figura 4.1: esquema de refracción entre medios con índices de refracción distintos.

Tal como lo estableció Snell (Willebrord Snel van Royen, 1580-1626) en el siglo XVII²², existe una relación entre las densidades relativas de los medios y las diferencias de los ángulos del rayo incidente y del rayo refractado respecto de la normal tal que:

$$n_1 \times \sin \theta_1 = n_2 \times \sin \theta_2$$

Donde n_1 y n_2 son valores que expresan la relación entre la velocidad de la luz en cada uno de los medios y la velocidad de la luz en el vacío (esto es, $n = c/v$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad en ese medio). Para el caso de un rayo de luz que incide por la normal (esto es, que es perpendicular a la superficie que separa los medios), no hay desviación, lo que

²² La Ley de Snell (o Ley de Snell-Descartes, ya que Descartes fue el primero en publicarla, en 1637) tiene una historia extensa y existen distintos debates al respecto. Se señalan distintos precursores, tanto en Oriente como en Occidente. A los fines de este trabajo, no es necesario considerar tal historia de la Ley (al respecto, véase Sabra 1967; Lindberg 1968; Chalmers 1990; Autier 1998), sino simplemente considerar la influencia de la refracción en la observación del cielo.

se expresa en la ecuación en que cualesquiera densidades relativas multiplicadas por el seno de 0° son iguales a 0.

Hoy se sabe que el espacio exterior y las distintas capas de la atmósfera tienen diferentes densidades; también se sabe que la refracción producida por esas diferencias de densidad no es despreciable. La situación se puede esquematizar como sigue:

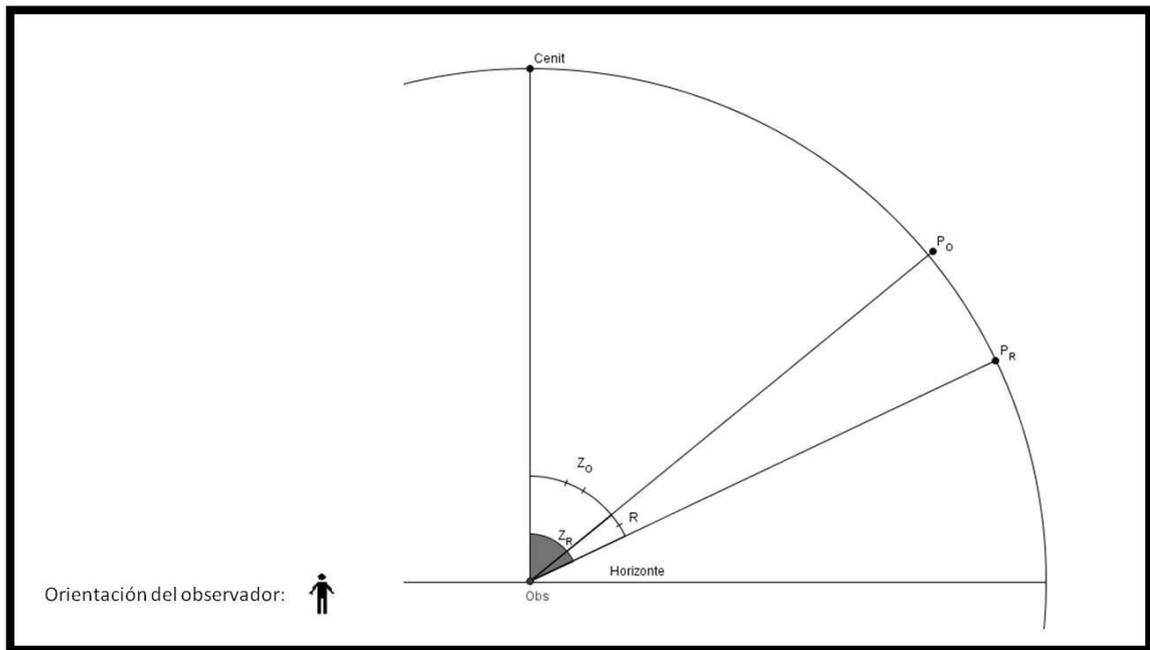


Figura 4.2: esquema de diferencia entre posición real (P_R) y posición observada (P_O).

En la Figura 4.2, Z_R es la denominada *distancia cenital real*, esto es, la distancia angular que se mediría respecto del cenit en ausencia de atmósfera; Z_0 es la *distancia cenital observada*, esto es, la que efectivamente puede medir un observador terrestre una vez que la luz pasó por la atmósfera. Las posiciones P (entendidas como las direcciones en las que hay que observar para encontrar el astro) son diferentes, siendo P_R la *posición real* que se observaría sin atmósfera y P_O la *posición observada* con atmósfera; R es la diferencia entre Z_R y Z_0 (lo que comúnmente se denomina “refracción”, aunque en rigor es la corrección a la P_O por refracción).

Para poder corregir las posiciones observadas (P_0) de los astros de modo de poder establecer sus posiciones reales (P_R) es necesario considerar factores como la temperatura y la presión atmosférica. Una fórmula por aproximación²³ para realizar la corrección a la posición observada es la siguiente, donde P es el valor de la presión atmosférica (en hectopascales) y T es el valor de la temperatura (en grados Celsius) y en el que se incluye una constante de refracción ($60''.3$):

$$R = 60''.3 \times \left[\frac{P}{1013} \times \frac{273}{273 + T} \right] \times \tan Z_0$$

Como se puede apreciar, la refracción aumenta cuando aumenta la presión, disminuye cuando aumenta la temperatura y depende directamente de la distancia cenital observada (Z_0). En condiciones normales de presión y temperatura, el cálculo se simplifica, de modo que:

$$R = 60''.3 \times \tan Z_0$$

Cuanto mayor sea la altura de un astro sobre el horizonte (o menor sea Z_0 , que es su complementario) menor será la refracción. En caso de encontrarse el astro observado en el cenit, su P_0 es igual a su P_R , y R es 0, lo que se advierte en que la tangente de 0° es igual a 0. Este cálculo es adecuado para distancias cenitales menores a 45° y puede llegar a utilizarse —dependiendo de la precisión que se requiera— hasta una distancia cenital de 70° . Para distancias cenitales mayores, el error de esta fórmula es considerable y, como es lógico, directamente no puede aplicarse a un astro sobre el horizonte, por cuanto Z_0 es igual a 90° . Para corregir la P_0 de astros en esas posiciones suele usarse tablas que indican los valores constantes de refracción para cada distancia

²³ Se trata de una fórmula de aproximación puesto que según las condiciones en las que se la aplique, el cálculo contendrá errores de diferente magnitud, lo que puede ser apreciado comparando las tablas de refracción con los número arrojados por estas fórmulas (Wüerschmidt 1950). Los modelos se complejizan en la medida en que se considere a las capas de aire que atraviesa el rayo de luz como capas planas o curvas (Karttunen 1987). El cálculo que se considera aquí supone capas planas.

cenital; para un astro situado sobre el horizonte estas tablas estipulan –para un observador en condiciones normales de presión y con una temperatura de 10°C– una corrección del orden de los 35´ de arco²⁴.

4.2) La refracción atmosférica en la astronomía antigua

El problema de la refracción fue considerado por los estudiosos de la óptica por lo menos desde los griegos. Ahora, el grado de comprensión sobre la forma en la que la refracción atmosférica afectaba el conocimiento astronómico es difícil de establecer. Por una parte se puede ver que Ptolomeo, en sus escritos sobre óptica, ofrecía aseveraciones elocuentes sobre la limitación que, sobre el conocimiento astronómico, implicaba el desconocimiento de la refracción atmosférica. En el Libro V de su *Óptica* señala que “es posible para nosotros notar que, en la superficie entre el aire y el éter hay una refracción del rayo visual de acuerdo con la diferencia en la densidad de estos dos medios” (Ptolomeo 1996, 238). Luego explica cómo opera esa refracción y señala que “cuanto mayor es su altura [hacia el cenit] menor es la diferencia entre la posición aparente y real de una estrella” (Ptolomeo 1996, 240) y que

“la cantidad de refracción es la misma cualquiera sea la dirección del pasaje; la diferencia es de tipo más que de grado. Porque al pasar de un medio rarificado a uno denso la línea se inclina hacia la normal, mientras que al pasar del medio denso al raro, se aleja de la normal” (Ptolomeo 1996, 242).

Con ello, Ptolomeo muestra un conocimiento adecuado sobre la conveniencia de tomar en cuenta el comportamiento de la luz al momento de calcular las posiciones reales de los astros. Pero más interesante aún es la declaración realizada sobre los alcances del conocimiento de la desviación

²⁴ Las correcciones por refracción se ven levemente compensadas por las correcciones por la *paralaje diurna*; pero esta corrección es despreciable para las estrellas (habida cuenta de su distancia) y bastante menor comparada con la refracción para el caso de los cuerpos del sistema solar.

óptica para las estrellas. Porque si bien la distancia de la interfaz entre ambos medios se encuentra

“más cerca de la esfera lunar [que de la Tierra], donde el éter termina, no es conocido si la distancia de interfaz se encuentra a la misma distancia que la superficie antedicha, o si se encuentra más cerca de la Tierra o si se encuentra más allá de la superficie antedicha” (Ptolomeo 1996, 242).

Esto es, no hay forma de establecer la distancia a la superficie que separa el aire del éter. Por lo tanto, es imposible procurar una forma de determinar el tamaño de los ángulos de desviación que ocurren en esta clase de refracción. De alguna forma, esta declaración puede ser entendida como un manifiesto sobre los límites de la integración de la óptica y la astronomía. Al menos en ese sentido lo interpreta Smith (1996, 46), quien asegura Ptolomeo se conforma con establecer dicha imposibilidad.

Reconocer que las posiciones observadas de los astros no dan cuenta de su posición real y que sus alturas pueden afectar de manera diversa sus distancias angulares relativas, debería afectar directa o indirectamente cualquier argumento en que ellas son fundamentales. Es el caso del argumento que apela a la *experiencia de la bisección* referida en los Capítulos 1 a 3. Si se sabe que lo que recorta aparentalmente el horizonte no es lo que recorta realmente, entonces difícilmente la bisección pueda ser invocada como argumento para probar la centralidad de la Tierra.

Aun así, estas consideraciones no parecen haber conducido a Ptolomeo a la revisión de las aseveraciones relativas a cómo la bisección puede ser utilizada como elemento suficiente para la determinación de la posición y tamaño de la Tierra. Una posible respuesta es que la *Óptica* es un trabajo posterior de Ptolomeo y que recién para ese entonces él tuvo un conocimiento más acabado del tema. Ciertamente, en el *Almagesto* son pocas y muy escuetas las referencias a la refracción, y algunas de ellas son sumamente equívocas, lo que permitiría aseverar que Ptolomeo no tenía un adecuado conocimiento del fenómeno en ese entonces. Es el caso de lo que establece en *Almagesto* 1.3,

donde –para descartar que el cambio de los tamaños de los astros en su movimiento diario pueda atribuirse a una forma no esférica del cielo– dice:

“el crecimiento aparente de sus tamaños sobre los horizonte es causado, no por decrecimiento de su distancia, sino por las exhalaciones de humedad que rodean la Tierra que se encuentran interpuestas entre el lugar desde el que observamos los cuerpos celestes, tal como los objetos en el agua parecen más grandes de lo que son, y cuanto más bajo se hundan, más grandes parecen” (Ptolomeo 1984, 39).

Para Pedersen (Pedersen y Jones 2011, 42), esta referencia al cambio de tamaño aparente de los astros sobre el horizonte es la única asociable a la refracción y, en interpretación de Toomer (Ptolomeo 1984, 39 n.24), se trata de un error de Ptolomeo puesto que refiere al cambio en el tamaño aparente de la Luna y el Sol cuando están cerca del horizonte, lo que atribuye correctamente a un efecto psicológico en la *Óptica*.

Pero en *Almagesto IX*, es posible hallar otra referencia a la refracción con un carácter diferente. Allí Ptolomeo dice:

“En general, las observaciones [de los planetas] con respecto a alguna de las estrellas, cuando son tomadas sobre una distancia comparativamente grande, implican cálculos difíciles y elementos conjeturales en las cantidades medidas, excepto que uno los lleve delante de una forma lo suficientemente competente y erudita. Esto no es solo porque las líneas que unen las estrellas observadas no siempre forman ángulos rectos con la eclíptica, sino porque pueden formar un ángulo de cualquier tamaño (por lo tanto podría esperarse un considerable error en la determinación de la posición de latitud y longitud debido a la inclinación variable de la eclíptica [con respecto al marco de referencia del horizonte]); pero también porque el mismo intervalo [entre las estrellas y los planetas] parece para el observador más grande cerca del horizonte y menor cerca de la mitad del cielo; por lo tanto, obviamente, el intervalo en cuestión puede ser medido en algunos momentos como mayor y en otros como menor que lo que es en realidad” (Ptolomeo 1984, 421).

Toomer (Ptolomeo 1984, 421 n. 8) considera que esta es la única posible referencia correcta al fenómeno de refracción, aunque deja entrever sus dudas sobre si efectivamente se trata de ello. Considero que no parece haber mayores motivos para dudar: efectivamente, las distancias angulares aparentes entre dos astros con diferente Z_0 varían según se encuentren ambos más cerca o más lejos del horizonte. Además, evidentemente, aquí no se está refiriendo al efecto psicológico, por cuanto habla de *medidas*. Además, es claro que el mismo Ptolomeo tuvo un adecuado conocimiento del fenómeno de refracción al escribir la *Óptica*. Por lo anterior, parece algo forzado insistir en desligar este pasaje de una adecuada descripción del fenómeno de refracción.

Adicionalmente, hay evidencias de que en la época el fenómeno era cualitativamente comprendido. Cleómedes, por ejemplo, consideró lo siguiente:

“Puesto que hay por naturaleza una amplia variedad de condiciones que afectan el aire, no sería imposible para nosotros hallar una imagen del Sol como si no se hubiera puesto cuando ya lo ha hecho (esto es, luego de que estuviera debajo del horizonte). La causa podría ser una nube lo suficientemente densa presente en el oeste que se encuentra iluminada por los rayos del Sol y nos los envía a nosotros. O (...) el rayo que surge de nuestros ojos podría también ser refractado en el aire que encuentra que es húmedo y encontrar al Sol luego de que ya se hubiera ocultado detrás del horizonte” (Cleomedes 2004, 162-3).

Si bien hay dudas sobre la datación de la obra de Cleómedes —podría ser tanto anterior como posterior a la obra de Ptolomeo (Bowen y Todd 2004)— existen quienes señalan que el conocimiento de este tipo de fenómenos no fue descubierto por él ni era del todo novedoso en su época (por ejemplo, Pedersen y Jones 2011, 457). En su *Historia Natural*, Plinio el Viejo (s. I d. C.) señala que alguna vez había tenido lugar un eclipse lunar durante la salida del Sol y el ocaso de la Luna y que ello había ocurrido permaneciendo ambos cuerpos sobre la línea del horizonte (Caius Plinius Secundus 1841, 40).

Cleómedes, que aparentemente entendía el fenómeno de refracción, curiosamente creía imposibles este tipo de eclipses, a los que consideraba un invento de personas que deseaban imponer problemas a los astrónomos y filósofos (Cleomedes 2004, 160-1). Hoy se sabe que es perfectamente posible ver un eclipse en esas condiciones dado que los diámetros aparentes del Sol y de la Luna (de unos 30' de arco) son del mismo orden que la refracción sobre el horizonte (de unos 35'), tal como se puede apreciar en la Figura 4.3:

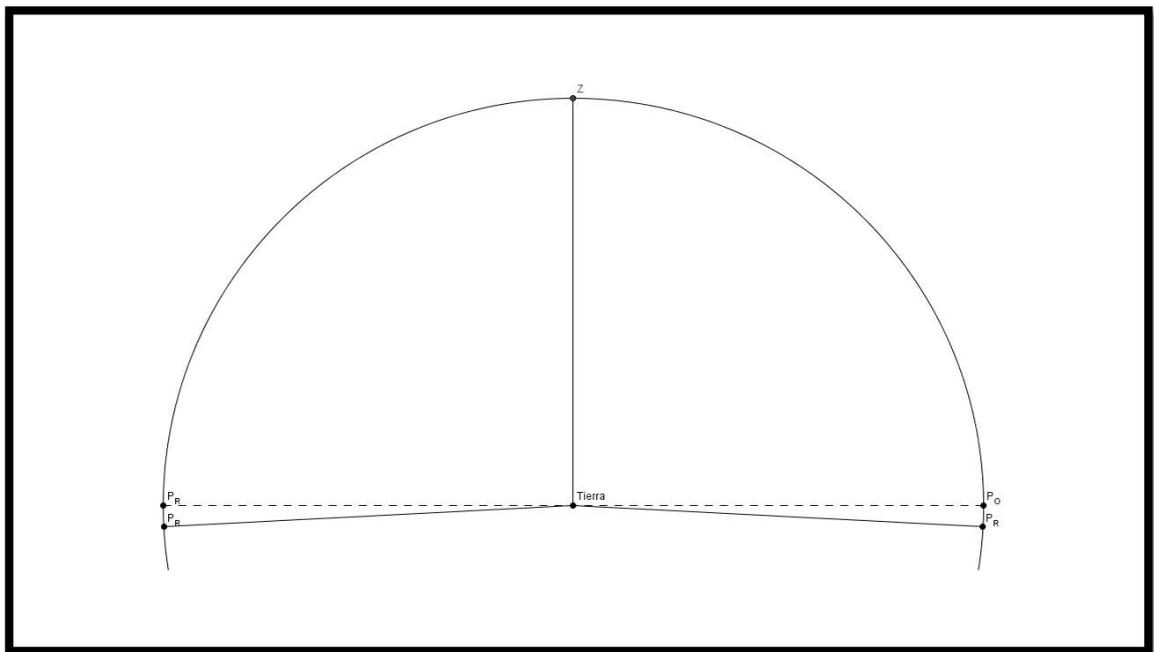


Figura 4.3: esquema de la observación sobre el horizonte con refracción.

Toomer (1980, 105-6) adicionalmente, considera que es plausible que Hiparco efectivamente lo haya observado el 26 de noviembre del año 138 a. C., fecha en la que tuvo lugar un eclipse que pudo ofrecer ese espectáculo a un observador en Rodas (dado que en esa fecha la salida y la puesta de la Luna y el Sol se dieron en zonas del horizonte no obstaculizadas a la visión por accidentes geográficos).

También se tenían en la Antigüedad registros de que un equinoccio tuviera lugar dos veces en el mismo día. Hoy se sabe que esto es perfectamente posible. Por ejemplo, si el Sol pasa del hemisferio sur al hemisferio norte en un instante en el que se encuentra muy cerca del

horizonte, puede tratarse de un paso aparente producto de la refracción; esto es, que P_0 pase a estar al norte del ecuador mientras P_R continúa al sur. Luego, si el Sol se encuentra en el este, a medida que pasen las horas se irá elevando, por lo que perderá refracción (acercándose P_0 a P_R); de modo que podría volver a estar al sur del ecuador. Finalmente, la P_R podría pasar en el mismo día nuevamente al hemisferio norte, teniendo lugar el equinoccio verdadero. Estas observaciones habían sido registradas mediante un anillo ecuatorial²⁵, y el resultó más fácil culpar al instrumento antes que a asumir la relevancia de la refracción (Britton 1992).

Parece claro, entonces, que si bien no había claridad cuantitativa sobre cómo la refracción afectaba las observaciones celestes, había sobrados elementos para dudar de que las observaciones sobre el horizonte fueran lo suficientemente fiables. Incluso algunos consideran que Ptolomeo poseía elementos suficientes para una buena aproximación cuantitativa a la magnitud de la refracción en el horizonte (Knorr 1985, 97 y ss.). La pregunta, entonces, es por qué motivo era invocado el comportamiento del horizonte para la determinación de la posición de la Tierra en un contexto en el que los estudios de la óptica parecían señalar que de ninguna manera esas observaciones eran fiables para tal determinación.

La respuesta parece encontrarse en el *status* epistemológico de las observaciones a partir de las cuales se analizaban los datos; lo que se expresa, con claridad, en la relativa autonomía de las consideraciones realizadas en el ámbito de la óptica y el ámbito de la astronomía en ese período.

²⁵ Un anillo ecuatorial es una estructura armilar que se la ubica de modo tal que quede calibrada en el mismo plano que el ecuador. Cuando el Sol pasa por el ecuador (teniendo lugar el equinoccio), la sombra de la parte del anillo más cercana al Sol proyecta su sombra sobre la parte más lejana, a la vez que las partes superior e inferior del anillo se encuentran igualmente iluminadas por él (al respecto, véase Evans 1998, 206-7).

4.3) Desarrollo histórico de la escisión antigua

Considerar el desarrollo histórico de esta relación permitirá sustentar la idea antepuesta. Para ello, convendrá revisar si, así como señalé en el Capítulo 1 la total vigencia en la Edad Media del argumento de la bisección para mostrar la centralidad de la Tierra, se puede advertir esa misma continuidad en la escisión disciplinar entre óptica y astronomía en la ciencia occidental. Tomaré como ejemplo la obra de Grosseteste. La elección responde a que, por un lado, es uno de los pensadores a los referidos al considerar el argumento de la bisección en el período medieval y, por otro, a que se interesó por el comportamiento de la luz al punto de ser considerado hoy por algunos como el responsable de la ulterior prosperidad de la óptica en la Europa medieval (Lindberg 1968, 29).

Una de sus obras en las que el fenómeno de refracción es atendido con cierta sistematicidad es *De Iríde, seu de iríde et speculo*, donde Grosseteste estudia la formación del arcoíris. Allí comienza afirmando que la investigación sobre el *quid* del arcoíris corresponde al físico mientras que la del *propter quid* corresponde al óptico, siendo su decisión dedicarse en ese tratado a lo segundo. Luego señala que las partes de la perspectiva son tres, según el paso de los rayos a la cosa vista: recto, reflejado o refractado (Grosseteste 1985, 59-61). Esta tercera parte, que según Grosseteste había sido intratada y desconocida hasta el momento —lo que es indicativo de su desconocimiento de la tradición al respecto—, es la que puede ofrecer elementos para el estudio *propter quid* del arcoíris.

Más allá de las precisiones que establece para la explicación del fenómeno, el tratamiento de la refracción por parte de Grosseteste es ilustrativo de ciertas características de la óptica medieval y permite valorar la apreciación que él tenía sobre la relación de la óptica con la astronomía. Lo primero, puesto que su estudio de la refracción estaba más orientado a una valoración y comprensión cualitativa que a una cuantitativa, a la vez que se ocupaba más de encontrar una explicación causal que de matematizar sus

características (como sí sucedería en el período moderno). Lo segundo, puesto que no obstante la relevancia primordial de la luz en la cosmogonía (Lindberg 1968), el estudio de la refracción para el arcoíris contrasta con la ausencia de referencias a ella en obras con temas astronómicos tales como *De Motu Supracaelestium*, *De Sphaera* o *De Generatione Stellarum*; esto parece indicativo de la vigencia de la escisión de la óptica respecto de la astronomía.

Podemos señalar en este sentido que, más allá de las divergencias entre los estudiosos sobre el grado de contacto de Grosseteste con la obra óptica de Ptolomeo, la premisa para la distinción de ámbitos entre óptica y astronomía vista en Ptolomeo gozaba de vigencia en el período medieval, de igual modo en que persistían las ideas fundamentales en torno al horizonte y sus implicancias en la determinación de la posición de la Tierra. Esto, si bien no supone la ausencia de novedades en el período, señala una continuidad en la medida en que las ideas aristotélico-ptolemaicas referidas al tema continuaron siendo las hegemónicas y favorece la percepción de un quiebre acelerado en el período moderno.

La historiografía de la ciencia suele enfatizar la importancia radical que tuvo el telescopio como instrumento novedoso que exigió que se desarrollaran estudios ópticos orientados al conocimiento de la propagación de la luz en el espacio (Hon y Zik 2009). Es claro que el uso astronómico de ese instrumento dio enormes posibilidades a la comprensión del funcionamiento del universo y dio un respaldo muy fuerte al sistema copernicano (Drake 1983; Swerdlow 1998). La primera noticia que en el ámbito científico se tuvo de la propuesta de utilizar el telescopio como medio para la indagación del cielo fue la publicación del *Sidereus Nuncius* de Galileo Galilei (1610; 1984). Entre los aportes más significativos se encuentran la observación de las lunas de Júpiter, que era elocuente respecto de la disputa que podía haber en torno al Primer Postulado del *Commentariolus* (considerado en el Capítulo 1), y la posibilidad de tener una imagen más acabada de las irregularidades de la superficie lunar (a la que referiré en el Capítulo 9), lo que iba en contra de la imagen aristotélica del cielo. Adicionalmente, permitía establecer (no sin

discusión) que el tamaño angular de las estrellas es menor que el que se puede establecer a ojo desnudo debido a lo que Galileo denominó irradiación²⁶, aspecto relevante para lo considerado en el Capítulo 3.

A este escrito galileano respondió Kepler con su *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (1610; 1984) ofreciendo a Galileo un conjunto de elementos teóricos para la comprensión del fenómeno óptico que subyacía al uso del telescopio²⁷. Este intercambio es a veces señalado como el inicio de la óptica astronómica. Pero existen ciertos desfases temporales que deben ser atendidos.

4.4) La ruptura kepleriana

El interés de Kepler por el estudio óptico como parte del estudio astronómico es anterior al uso del telescopio (Di Liscia 2015), y aparece en todo su esplendor ya en *Ad Vitellionem Paralipomena, quibus Astronomiae Pars Optica Traditur* de Kepler (1604; 2000). Allí Kepler recogía el estado de situación sobre la óptica en su relación con la astronomía, y en especial el estado de conocimiento de la refracción atmosférica. A fines del siglo XVI, Rothmann y Brahe —referidos en el Capítulo 2 a propósito de la *solución copernicana* al problema de la bisección— tuvieron un intercambio que es elocuente respecto de los alcances del conocimiento de la refracción atmosférica. Si bien ambos coincidían en las causas de la refracción desde un punto de vista estrictamente óptico, tenían serias dificultades para ponerse de acuerdo sobre cómo debían

²⁶ El telescopio no solo amplía los objetos que se observan. Así como agranda la imagen de los planetas, hace más pequeña a la de las estrellas; adicionalmente, por ejemplo, muestra a Júpiter más grande que a Venus (a diferencia de lo que ocurre a ojo desnudo). Lo anterior condujo a Galileo a postular que el telescopio eliminaba los *rayos extraños*, a lo que luego — en la Primera Jornada de los Diálogos (Galilei 1632)— llamó “irradiación” (al respecto, véase Chalmers 1985, 176 y ss.; Swerdlow 1998, 251-2; Chalmers 2013, 152-3). Hermann von Helmholtz (1821-1894) estudió el fenómeno, al que llamó “ilusión de irradiación” (von Helmholtz 1896). Esta “ilusión” hoy continúa siendo objeto de investigación entre neurocientíficos (Kremkow et al. 2013).

²⁷ La historiografía insistió en señalar que Galileo tenía un conocimiento práctico del instrumento, pero no uno teórico, aunque esa propuesta fue fuertemente discutida en los últimos tiempos (al respecto, véase Zik 2002).

ser interpretadas las observaciones celestes y las mediciones, detrás de las cuales no hallaban una única lógica (Moran 1982).

Según Kepler, los observadores, basados en la diligencia y el cuidado que habían puesto a lo largo de sus observaciones, menospreciaban el hecho de que la naturaleza de la luz pudiera amenazar la precisión de los instrumentos para la observación. De esas falencias no se salva ni siquiera Tycho Brahe. En la dedicatoria al Emperador con la que comienza su obra señala dos virtudes de su “maestro” en lo relativo a la óptica; a saber: consideraciones sobre la refracción de la luz de los cuerpos celestes y sobre la disminución del diámetro lunar durante los eclipses. Sobre la primera —de vital importancia para esta indagación— Kepler señala que si bien Brahe se esforzó en medir la refracción en las distintas latitudes, la ausencia de una explicación óptica del fenómeno condujo a debates que no arrojaban claridad sobre la influencia de la refracción para observadores situados en distintos lugares y/o en distintos momentos. Kepler introdujo la necesidad de diferenciar posición *aparente* de posición *real*, señalando las causas y las características de esa diferencia.

El programa de su óptica, entonces, estaba explícitamente orientado a saldar falencias en la integración de la óptica con la astronomía. En su prefacio señalaba:

“dado que todas las observaciones celestes tienen lugar a través de la mediación de la luz o la sombra, y puesto que los medios entre las estrellas y el ojo tienen una variedad de modificaciones y porque esas cosas que observamos en el cielo son o bien movimientos (...), o bien arcos (...) o bien cuerpos luminosos; y porque todas esas cosas son consideradas en la ciencia óptica; por tanto, se eleva la tercera parte de la astronomía: la óptica” (Kepler 1604, 1-2; Kepler 2000, 13).

Con esta tercera parte, se refiere a una de las cuatro partes orientadas a la investigación y comprensión de los movimientos de los cuerpos celestes: la mecánica, la histórica, la óptica (cuya demostración se basa en la observación) y la física (cuya demostración se basa en los axiomas físicos o matemáticos). Todo lo anterior se hallaba integrado en una de las grandes partes de la

astronomía (regida por la geometría) y diferenciada de la otra gran parte de la astronomía (basada en la aritmética) que poseía una orientación más práctica y que buscaba establecer las bases para la prognosis (Kepler 1604, 1-4; Kepler 2000, 13-16).

Dado ese objetivo, y luego de dedicarse al estudio de la naturaleza de la luz, de su forma y de su reflejo en los primeros tres capítulos, orienta su estudio a la medición de la refracción. En el capítulo 4, que lleva por título *Sobre la medición de las refracciones*, analiza detalladamente el tema a partir de un recorrido histórico y de distintas consideraciones teóricas. Respecto de la refracción atmosférica en particular, Kepler busca establecer los medios a través de los cuales poder cuantificar su influencia. En tal sentido, establece que cuando la luz incide con mayor oblicuidad es refractada en un ángulo mayor (puesto que la resistencia se vuelve mayor cuanto mayor es la oblicuidad) y que el incremento de los ángulos de refracción es mayor proporcionalmente al aumento de la oblicuidad de la incidencia. Si bien no alcanza a desarrollar una fórmula de la refracción aplicable a la astronomía, sí desarrolla tablas a partir de estudios empíricos. A través de ellas, entre otras cosas, establece que no hay diferencia entre la refracción de una luz débil y la de una fuerte, y que la distancia de los astros no incide en el ángulo de refracción.

El paso dado por Kepler respecto de la refracción constituye una ruptura en un doble nivel. Por una parte, en el nivel conceptual interno, puesto que da un nuevo paso en la desarticulación del par apariencia-realidad; por otra —y en cierto sentido como causa de la anterior—, en el nivel de articulación disciplinar, determinada por el esfuerzo en señalar cómo todas las partes de la astronomía se encuentran atravesadas por la dimensión óptica.

Ambos quiebres llevaban el sello de un cambio más profundo y que excedía al propio Kepler: la jerarquización de la observación. Este paso, en la forma en la que lo asumió Kepler, servía para dar explicación a viejos problemas no resueltos, como el del eclipse referido por Plinio o la ocurrencia

de dos equinoccios en un mismo día (a los que Kepler hace referencia explícita en su obra). Pero también obraba en contra de argumentos bien consolidados, como el que apelaba a la *bisección de la esfera*. En el fondo, impugnaba el éxito empírico que poseía la prueba ptolemaica y denunciaba la desatención que históricamente había recibido este problema.

4.5) El papel de la observación

Podemos preguntarnos: ¿qué papel jugó la observación en la construcción y perpetuación del argumento que apelaba a la bisección? ¿hasta qué punto se puede decir que en el *Almagesto* la prueba de la centralidad de la Tierra es astronómica (y no física ni metafísica) cuando las bases observacionales son tan endebles? Señalé que posiblemente Ptolomeo sabía, al escribir el *Almagesto*, que la observación del cielo en el horizonte era problemática. Y si acaso él no lo supo, sí lo conoció toda la tradición ptolemaica posterior a él. No obstante, esto no conmovió el argumento. Tampoco está claro cómo podría haber impactado. Que se vea más de medio cielo no necesariamente destruye al argumento, pero le establece ciertos límites en la medida en que no se puedan establecer sus causas y cuantificar su impacto.

En cualquier caso, pretender establecer eso es un ejercicio contrafáctico, porque al parecer nadie utilizó esas observaciones ni a favor ni en contra del argumento de la bisección a lo largo de la Antigüedad y la Edad Media. Simplemente las mantenían en un ámbito disciplinar con el que la astronomía no tenía que interactuar. La pregunta entonces es: ¿a qué se debe la escisión antigua? El estudio del vínculo entre óptica y astronomía introduce un problema de tipo epistemológico sobre la forma en la que se estructuraron distintos discursos consistentes con distintas formas de ver la realidad. La caracterización del sistema ptolemaico como simple manifestación astronómica del sistema aristotélico parece exagerada. El propio prefacio del *Almagesto* es una declaración de principios que invierte la jerarquía aristotélica del conocimiento (Pedersen y Jones 2011). No obstante, el tratamiento del tema de la refracción permite establecer que la escisión entre

astronomía y óptica creció al amparo de la distinción disciplinar aristotélica y, en particular, de los principios de su física. Lo cierto es que las consideraciones de la óptica, como ciencia de fenómenos sublunares, se mantuvieron durante largo tiempo al margen de la astronomía. En tal sentido, conviene no confundir el hecho de que el argumento a favor de la centralidad que apela a la bisección sea una justificación matemático-astronómica con el hecho de que esa haya sido la vía para el establecimiento de la posición central de la Tierra (al respecto, véase Ap. 3).

Esto es indicativo de la fortaleza de la matriz conceptual aristotélica. Y en el caso particular de la integración de la observación del horizonte en la determinación de la posición de la Tierra, puede ser concebido como un caso ejemplar de carga teórica de la observación, en el sentido planteado por Hanson (1958; 1969; 1971). En el ámbito astronómico, la teoría presupuesta impedía que determinada información (técnicamente disponible) fuera obtenida por la observación; por tal motivo, la *base empírica* (o *base de contrastación*) no estaba constituida por una experiencia de observación directa e inmediata, contra el requisito del empirismo lógico y otras concepciones empiristas (Suppe 1977). Para ser categórico: la bisección, estrictamente, nunca pudo ser observada, aunque sin lugar a dudas los astrónomos por cerca de dos mil años dejaron constancia de haberlo hecho²⁸.

La pregunta que quiero dejar planteada en este punto es ¿a qué se debe la unificación disciplinar moderna que supuso, entre otras cosas, disputar este aspecto de la carga teórica en la observación del cielo? Si bien es posible señalar esta transformación teórico-disciplinar como resultado o bien de los desarrollos de la astronomía (por el propio interés en el perfeccionamiento de

²⁸ Esto no es algo que sucediera exclusivamente con esta experiencia de la bisección. Jones (2016) señala que es posible detectar en Ptolomeo una actitud que denomina *pseudo-empirista*. Esta actitud consiste en realizar afirmaciones concernientes a objetos observables, pero que no podían ser confirmadas o refutadas dadas las condiciones para la observación; la consciencia de Ptolomeo a este respecto no lo inhibía de apelar a ellas como si fueran verdaderas pruebas.

instrumentos para la observación o por) o bien de los desarrollos de la óptica (por mera evolución de la óptica medieval, occidental o islámica), también parece posible señalar que el paso teórico (y disciplinar) hacia la articulación entre óptica y astronomía obedeció a la aparición de una relevancia práctica de la astronomía antes inexistente. Mientras que en la Antigüedad y en la Edad Media cuantificar el comportamiento de la luz proveniente de las estrellas no reportaba mayores beneficios (ni mayores perjuicios el dejar de hacerlo), durante la Modernidad esto cambió drásticamente. Desarrollaré esta idea en los capítulos de la tercera parte, especialmente en el Capítulo 7.

En cualquier caso, tal cuestionamiento a la *base empírica* no fue lo históricamente decisivo para dejar de lado el argumento ptolemaico; ni Copérnico ni Galileo utilizaron esa vía, aun estando disponible, al menos para Galileo. Consideraré la naturaleza de sus argumentos en el próximo capítulo.

CAPÍTULO

5

LA CRUCIALIDAD DE LA EXPERIENCIA DE LA BISECCIÓN

En este capítulo daré sustento a la Tesis V. Sostendré que el argumento astronómico utilizado por Ptolomeo para probar la centralidad de la Tierra apelaba a una experiencia que fue diseñada y funcionó como una *experiencia crucial*. Indicaré que tanto Copérnico como Galileo desactivaron su carácter crucial, pero que lo hicieron mediante estrategias distintas; mientras que Copérnico utilizó una hipótesis *ad hoc* que afectaba levemente el sentido de los conceptos utilizados en la construcción y descripción de la experiencia, Galileo lo hizo modificando radicalmente el significado de tales conceptos. Sugeriré que entre Copérnico y Galileo medió un cambio en la *interpretación natural* de la *experiencia*.



5.1) Las experiencias cruciales

De manera general (Cassini 2015), una *experiencia crucial* es aquella que permite contrastar de manera simultánea dos o más hipótesis (o teorías) rivales que predicen observaciones incompatibles entre sí. Que sean *hipótesis rivales* impone dos condiciones: i) que refieran a un mismo dominio de fenómenos y ii) que no pueda ser verdadera más que una de ellas. Que predigan observaciones incompatibles entre sí quiere decir que debe ser posible hallar un conjunto de condiciones iniciales (C) que implique, para cada una de las hipótesis rivales, consecuencias observacionales (O) contrarias entre sí. El hecho de que las consecuencias observacionales sean contrarias implica que como máximo una de ellas puede verificarse, aunque desde luego puede no verificarse ninguna. Solo en caso de que se verifique una de ellas, la experiencia crucial sería exitosa, puesto que de ese modo permitiría confirmar o corroborar alguna de las hipótesis; caso contrario, refutaría o disconfirmaría a todas.

Esquemáticamente, entonces, se podría indicar como sigue para el caso de dos hipótesis (H_1 y H_2) rivales entre sí de las cuales se deducen dos consecuencias observacionales contrarias entre sí (O_1 y O_2 , respectivamente):

$$H_1 \models (C \rightarrow O_1)$$

$$H_2 \models (C \rightarrow O_2)$$

C

O_1

$\neg H_2$

Esto es, deduciéndose de H_1 que, bajo determinadas condiciones C se cumplirá O_1 y deduciéndose de H_2 que, bajo esas mismas condiciones C se cumplirá O_2 , dado el cumplimiento de las condiciones C y verificada una de las consecuencias observacionales (en este caso O_1), se puede deducir que H_2 es falsa. Así, O_1 refuta H_2 y, y bajo la concepción deductivista de la confirmación de acuerdo con la cual las hipótesis se corroboran mediante la verificación de sus consecuencias observacionales, se corroboraría H_1 .

Este uso es distinto de otros usos de *crucial*, como el que en cierta bibliografía se utiliza para referir a las experiencias cuya *función histórica* fue la de orientar a la comunidad científica en la elección de una hipótesis o teoría en detrimento de otra con la que competía (por ejemplo, Farrington 1974, 39). Esto se manifiesta en que algunas definiciones de *experiencia crucial* parecen poner como condición necesaria que hayan orientado a la comunidad científica en favor de una u otra hipótesis o teoría (por ejemplo, Hempel 1991, 47). Si bien una misma experiencia podría ser *crucial* tanto en uno como en otro sentido, ciertamente no es condición necesaria ni suficiente que una experiencia sea crucial en uno de los sentidos para que lo sea en el otro. Por lo anterior conviene, siguiendo a Cassini, distinguir entre *experiencias cruciales* y *experiencias decisivas*, siendo las primeras aquellas que proporcionan evidencia contrastadora para dos o más hipótesis (o teorías) rivales y las segundas aquellas que proporcionan evidencia considerada suficiente para la aceptación o el rechazo de una hipótesis o teoría (Cassini 2015, 130).

5.2) El planteo ptolemaico como experiencia crucial

El planteo de Ptolomeo consiste en diseñar cuatro hipótesis sobre la posición de la Tierra. La hipótesis H sostiene que la Tierra está “en el centro del mundo” (o, lo que es lo mismo “en el eje y equidistante de los polos”), H' que está “fuera del eje y equidistante de los polos”, H'' que está “sobre el eje y más cerca de uno de los polos”, y H''' que está “fuera del eje y más cerca de uno de

los polos”. Evidentemente, se trata de *hipótesis rivales* dados los términos de acuerdo con los cuales Ptolomeo enuncia cada hipótesis²⁹.

	Tierra en el eje del mundo	Tierra equidistante de los polos
H	sí	sí
H'	no	sí
H''	sí	no
H'''	no	no

Ahora bien, para Ptolomeo se trata no solo de cuatro hipótesis incompatibles entre sí; son, además, exhaustivas del dominio de posibilidades. Esto es, las tres opciones que compiten con la de la posición central de la Tierra son las únicas tres opciones alternativas posibles. Este es un aspecto relevante del argumento, dado que es lo que le permite a Ptolomeo afirmar H tras haber descartado H' , H'' y H''' . Dicho de otro modo, la negación de cada una de las hipótesis alternativas a la de la posición central le permitió afirmar la centralidad puesto que la disyunción de esas tres hipótesis alternativas es contradictoria con la que pretendía defender; ese paso no hubiera sido posible en caso de tratarse de hipótesis que no agotaran las posibilidades. Por tanto, y dada la recepción histórica del planteo ptolemaico, es posible y parece conveniente reducir las hipótesis rivales a dos, siendo H_1 : “la Tierra se encuentra en el centro del mundo” y H_2 la disyunción de las demás opciones ($H' \vee H'' \vee H'''$), que se podría expresar como “la Tierra se encuentra en un lugar distinto del centro del mundo”.

Es momento de considerar qué pasa con las observaciones, dejando de lado los aspectos ópticos problematizados en el Capítulo 4; esto es, suponiendo, tal como lo hicieron Ptolomeo y todos después de él (hasta Kepler), que el horizonte efectivamente divide a la mitad el cielo. Recordemos que para cada una de las posiciones, las observaciones predichas en cada caso (esfera recta u esfera oblicua) eran diferentes. Pero, es posible, parece

²⁹ La rivalidad entre estas hipótesis no viene dada porque cada una de ellas fuera defendida por distintos grupos de astrónomos. Es una rivalidad construida por el propio Ptolomeo. Consideraré las implicancias de esto más adelante.

conveniente y —hecha la síntesis de las hipótesis— resulta necesario reducirlas a dos. Así, denominaré O_1 a la observación predicha por H_1 (esto es: “el horizonte biseca a la esfera de las estrellas, al ecuador y a la eclíptica”), y O_2 a la disyunción de las observaciones predichas por cada una de las alternativas de H_2 (esto es “el horizonte divide en partes desiguales a la esfera de las estrellas fijas o al ecuador o a la eclíptica”). Si bien O_1 y O_2 pueden ser expresadas una como la negación de la otra, por claridad visual y expositiva mantendré la numeración de modo de identificarlas con las respectivas hipótesis.

Hecho lo anterior, se podría formalizar de manera simplificada el argumento ptolemaico del siguiente modo, donde H_1 , H_2 , O_1 y O_2 expresan los enunciados hasta aquí referidos y C las condiciones ideales posibles para la observación del horizonte:

$$H_1 \vDash (C \rightarrow O_1)$$

$$H_2 \vDash (C \rightarrow O_2)$$

C

$\neg O_2$

$\neg H_2$

Esto permite apreciar cómo la estructura del argumento ptolemaico es la señalada para una experiencia crucial. De H_1 (que “la Tierra se encuentra en el centro del mundo”) se deduce que, bajo las condiciones C , se observará O_1 (que “el horizonte biseca la esfera de las estrellas, al ecuador y a la eclíptica”) y de la H_2 (que “la Tierra se encuentra en un lugar distinto del centro del mundo”) se deduce que, bajo las mismas condiciones C , se observará O_2 (que “el horizonte corta en partes desiguales a la esfera de las estrellas fijas o al ecuador o a la eclíptica”).

Ahora bien, y como ya señalé, H_1 y H_2 no solo son incompatibles sino que además son contradictorias, por lo que H_1 se puede expresar sin más como $\neg H_2$. Esto tiene especiales consecuencias sobre la naturaleza de la experiencia, puesto que ahora se puede señalar lo siguiente:

$$H_1 \models (C \rightarrow O_1)$$

$$H_2 \models (C \rightarrow O_2)$$

$$\neg H_2 \equiv H_1$$

C

$\neg O_2$

H_1

Esto es, dada la misma situación, pero supuesta la identidad entre H_1 y la negación de H_2 (puesto que H_1 y H_2 son contradictorias), la negación de O_2 implicaría no solo la negación de H_2 sino también la verificación de H_1 . Así, no se trata de una experiencia crucial regular sino de una de las que Klimovsky (1994, 192-3) denominaba de *segunda especie*, único caso bajo el cual persiste la idea de que algunas hipótesis empíricas se pueden verificar.

Ahora bien, en el desarrollo de los Capítulos 2 y 3 mostré que, históricamente, la verdad de H_1 que podía deducirse de esta experiencia crucial no solo fue cuestionada, sino que además fue cuestionada con éxito. Por lo que conviene considerar las situaciones.

5.3) La descrucialización copernicana

En primera instancia el rechazo de la H_1 no fue producto ni del reemplazo de O_1 por O_2 ni del rechazo a la concepción de acuerdo con la cual ambas

hipótesis eran incompatibles (incluso contradictorias). Copérnico, defensor de una de las variantes de H_2 , admitía O_1 y, sin dudas, advertía la incompatibilidad entre H_1 y H_2 . Y su solución al problema de la bisección de la esfera por el horizonte (referida en el Capítulo 2) consistía en postular un tamaño de la esfera de las estrellas fijas lo suficientemente grande como para que el desplazamiento de la Tierra del centro del mundo (exigido por su movimiento anual en torno al Sol) fuera insignificante.

Así, la estrategia de Copérnico no consiste en impugnar la experiencia invocada por Ptolomeo, que es aceptada con la siguiente consideración:

$$(H_1 \& A_1 \& \dots \& A_{Ptol}) \models (C \rightarrow O_1)$$

$$(H_2 \& A_1 \& \dots \& A_{Ptol}) \models (C \rightarrow O_2)$$

$$H_1 \equiv \neg H_2$$

C

$\neg O_2$

$$\neg (H_2 \& A_1 \& \dots \& A_{Ptol})$$

Aquí, las A representan las hipótesis auxiliares presupuestas en el diseño de la experiencia. Por definición, para esta o para cualquier otra experiencia (crucial o no), las hipótesis auxiliares no se encuentran contenidas en las hipótesis principales que se contrastan, y sin ellas no podría nunca llegar a deducirse una consecuencia observacional. Lo que Copérnico hace es aceptar que de la conjunción de las H con las A de Ptolomeo se deduce, para cada H una O diferente. En especial, acepta la incompatibilidad entre la H_2 y la hipótesis auxiliar que denominé A_{Ptol} , reflejando que —a diferencia de otras hipótesis auxiliares compartidas por ambos— es defendida exclusivamente por Ptolomeo. Me refiero a la hipótesis auxiliar de acuerdo con la cual la esfera

de las estrellas fijas posee un tamaño que, si bien admite que respecto de ella el radio terrestre sea despreciable, no admite que lo sea una presumible distancia de la Tierra respecto del centro del mundo. Bajo esta consideración, O_1 ya no refuta a H_2 y mucho menos verifica H_1 ; apenas puede señalarse que queda refutada la conjunción de H_2 con las A de Ptolomeo.

La estrategia de Copérnico consiste, entonces, en modificar alguna de las hipótesis auxiliares sin necesidad de modificar otras —como la esfericidad del mundo, la circularidad de los movimientos celestes o la existencia de los orbes, sobre las que se encuentra sustentada la distinción entre H_1 y H_2 —. Esto es, juzga suficiente reemplazar únicamente A_{ptol} por una distinta (a la que llamaré A_{cop}) que sí admita que la distancia Tierra-Sol pueda ser despreciable respecto del octavo orbe. Así, las premisas del razonamiento de Copérnico pueden expresarse como sigue:

$$H_1 \equiv \neg H_2$$

$$(H_1 \& A_1 \& \dots \& A_{ptol}) \vDash (C \rightarrow O_1)$$

$$(H_2 \& A_1 \& \dots \& A_{ptol}) \vDash (C \rightarrow O_2)$$

$$(H_1 \& A_1 \& \dots \& A_{cop}) \vDash (C \rightarrow O_1)$$

$$(H_2 \& A_1 \& \dots \& A_{cop}) \vDash (C \rightarrow O_1)$$

C

O_1

En este caso, no podemos deducir ninguna conclusión sin incurrir en una falacia por afirmación del consecuente. Únicamente podemos afirmar que se corroboran:

$$H_1 \& A_1 \& \dots \& A_{ptol}$$

$$H_1 \& A_1 \& \dots \& A_{cop}$$

$H_2 \& A_1 \& \dots \& A_{Cop}$

O, más sintéticamente, que se corrobora:

$((H_1 \vee H_2) \& A_1 \& \dots \& A_{Cop}) \vee (H_1 \& A_1 \& \dots \& A_{Ptol})$

La aceptación de A_{Cop} permite, entonces, la corroboración tanto de H_1 como de H_2 , lo que por otra parte no aporta mucho dado que “ $H_1 \vee H_2$ ” no necesitaba ninguna clase de apoyo dado que dicha disyunción es tautología dadas las premisas. Así, tiene lugar una descrucialización de la experiencia de la mano de Copérnico dadas las posibilidades para la observación del cielo³⁰, puesto que toda vez que dos hipótesis incompatibles no puedan predecir, a su vez, observaciones incompatibles bajo las mismas condiciones queda inhibido el proceso de contrastación simultánea crucial.

Esto parece ir en apoyo de la tesis general del holismo de que nunca se evalúa mediante una experiencia o experimento una sola hipótesis o teoría sino a un conjunto extenso de hipótesis auxiliares explícitas o implícitas. Pero, por otra parte, la simple agregación de hipótesis auxiliares no siempre es viable. En este caso, tal limitación se encarna con claridad en la crítica de Tycho a la incorporación de la auxiliar copernicana. Recordemos que Tycho objetaba que suponer a la esfera de las estrellas fijas lo suficientemente lejos (A_{Cop}) traía aparejado suponerlas de un tamaño absoluto muy grande, lo que, dados los presupuestos de la época, constituía una posible refutación de esa auxiliar. Esto señala los límites a la simple agregación de hipótesis auxiliares. Ellas deben ser resistentes y, en caso de no serlo, exigirán la incorporación de otras que las complementen o respalden, como es la introducción de un conjunto de nuevas hipótesis auxiliares o teorías subyacentes. Solo la

³⁰ Es posible suponer que para Copérnico la imposibilidad de distinguir entre las observaciones para H_1 y H_2 está determinada por la precisión del ojo humano para observar y de sus instrumentos para medir (algo análogo a lo que ocurre con el problema de la falta de medición de paralaje anual). O_1 y O_2 serían *en principio* distinguibles observacionalmente. Pero dadas las condiciones C , solo se puede observar O_1 .

aceptación de esas modificaciones –que constituyó un proceso histórico complejo– permitió la aceptación de la A_{Cop} .

5.4) La descrucialización galileana

La solución de Galileo constituye una nueva descrucialización de la experiencia de Ptolomeo, que si bien depende parcialmente de la aceptación de la hipótesis auxiliar copernicana, establece condiciones completamente diferentes para la interpretación de la experiencia. En especial, porque impugna la neutralidad de los términos con los que se encontraba diseñada. Convertida la esfera, tal como se señaló en el Capítulo 3, en una apariencia con centro *necesario* en el observador (en *cualquier* observador) e independiente de una esfera real externa, se convierten los diferentes círculos máximos (eclíptica, ecuador, horizonte) en círculos necesariamente máximos puesto que pasan por el necesario centro de esa esfera aparente y se proyectan sobre sus límites, independientemente de la naturaleza de éstos.

Por lo anterior, el cambio en un concepto puede ser advertido en los otros. Mientras para Ptolomeo, el horizonte era un *círculo* que resultaba de la proyección de la visual de un observador terrestre sobre la esfera de las estrellas fijas, para Galileo era un círculo que resulta de la proyección de la visual de un observador terrestre (o no terrestre) sobre la esfera celeste. Mientras que la esfera sobre la que se proyectaba para Ptolomeo era una esfera real (material o inmaterial) con un radio determinado (conocido o desconocido, solo delimitado en su cota inferior) que definía la distancia de su centro a las estrellas fijas, para Galileo era una esfera aparente (independientemente de la existencia de una real) con centro necesario en el ojo del observador, por lo que su radio era indeterminado. Tal esfera tenía para Ptolomeo tenía dos puntos que eran los polos de rotación de un movimiento absoluto mientras que para Galileo tenía dos puntos que eran los polos de rotación de un movimiento relativo de la Tierra con relación a la esfera celeste. El ecuador y la eclíptica eran, por tanto, para Ptolomeo, dos círculos máximos de la esfera, mientras que para Galileo eran dos círculos

máximos proyectados en la esfera. Analizaré estas diferencias en detalle en el próximo capítulo.

Podríamos decir, entonces, que dados los cambios señalados en tales conceptos el enunciado “el horizonte biseca la esfera de las estrellas, al ecuador y a la eclíptica” a ser un juicio implicado por las definiciones de los conceptos utilizados en él. Si la esfera celeste es una esfera con centro en el ojo del observador, y el ecuador y la eclíptica son círculos máximos de esa esfera, entonces el horizonte —que también tiene centro en el ojo del observador, por lo que es un círculo máximo— divide al medio *por definición* a la esfera, al ecuador y a la eclíptica.

Luego, que las estrellas se comporten como lo hacen o que la eclíptica tenga la ubicación y la forma que tiene, efectivamente responde a que sean verdaderas las hipótesis de Copérnico o las de Ptolomeo, pero la experiencia no permite —dado el cambio conceptual implícito en la concepción galileana— dirimir la situación. Para poder apreciar cabalmente la naturaleza del cambio, conviene introducir una distinción entre los aspectos dinámicos y estáticos de la experiencia; y, para ello, servirá utilizar algunas hipótesis contrafácticas.

Se puede pensar qué hubiera ocurrido con la experiencia si en el cielo no hubiera habido ningún movimiento (ni absoluto ni relativo). Es factible pensar que para Ptolomeo, aceptada la idea de una esfera real, el hecho de que se vieran por ejemplo seis de los doce signos del zodíaco siempre desde cualquier punto de la Tierra hubiera constituido prueba suficiente (más débil que las que tuvo, por cierto) para mostrar que, por cuanto el horizonte corta al medio a ese círculo máximo de la esfera que atraviesa los seis signos, entonces es un círculo máximo que indicaría la posición central de la Tierra³¹. Para

³¹ En realidad, sin movimientos, los astrónomos posiblemente no hubieran llegado a la idea de una esfera. Por otra parte, es claro también que, sin un movimiento solar aparente, no tiene sentido pensar en la eclíptica o en el zodíaco. Pero no es eso lo que quiero plantear aquí; simplemente deseo utilizarlo como paso para diferenciarlo de Galileo suponiendo qué hubiera considerado Ptolomeo si hubiera tenido la certeza de la existencia de una esfera y de la eclíptica como círculo máximo de ella.

Galileo, esto no tiene sentido puesto que cualquier observación se construye radialmente en torno al observador; los seis signos del zodiaco no son otra cosa que 180° de un círculo que se proyecta radialmente hacia un centro de observación. Los signos del zodiaco existen como existen porque los observadores estamos donde estamos; no al revés.

También se puede pensar qué hubiera ocurrido con la experiencia si solo el Sol hubiera tenido el movimiento relativo que tiene. Para Ptolomeo, aceptando el movimiento circular del Sol en torno al centro de la esfera, hubiera sido posible conocer la posición central de la Tierra gracias a algunas otras consecuencias observacionales. Por ejemplo, y teniendo en cuenta el movimiento anual, las referidas a la duración de los días y las noches o a los intervalos entre equinoccios y solsticios. Para Galileo, esto nuevamente no tiene sentido. Él tiene plena consciencia de que cualquier movimiento de traslación circular de un punto respecto de otro puede ser descrito desde el punto en movimiento como un movimiento circular respecto de sí. Esto lo había entendido bien Copérnico. Ciertamente, si el Sol se mueve observado desde la Tierra (movimiento aparente) es *necesario* admitir o bien un movimiento absoluto del Sol o bien un movimiento absoluto de la Tierra o bien un movimiento absoluto de ambos. Galileo entiende entonces, que para que el Sol se mueva por la eclíptica como lo hace, es necesario que o bien las hipótesis de Ptolomeo o bien las de Copérnico (o bien alguna otra que contemple el movimiento relativo) sean correctas. Pero, nuevamente, estar en el centro aparente no *prueba* más que el hecho de que nos encontramos en el centro de la observación.

Por último, se puede pensar qué sucede en el caso de las estrellas que se mueven como lo hacen, recorriendo 360° por día (sidéreo). Aquí la situación se parece a la del Sol, pero considerando que en lugar de un movimiento de traslación de un punto respecto de otro es necesario pensar un movimiento de rotación de una esfera respecto de su centro. Nuevamente, ese fenómeno requiere que se lo explique mediante hipótesis que sean consistentes. Aquí, al igual que en el caso del Sol, las posibilidades son tres: o se mueve el centro, o

se mueve la esfera o se mueven ambos. Pero la diferencia es que mientras que en el movimiento de traslación relativo entre dos puntos es indistinto si uno está en el centro efectivo de movimiento del otro, en el caso de la esfera en torno a un punto, esto se da de manera restringida. Si lo único que se mueve realmente es la esfera, es un requisito que el centro de rotación y el centro de observación sean el mismo para que, desde el punto de vista de los fenómenos, sea equivalente a la rotación del centro. Si la esfera no se mueve, en cambio, es condición suficiente que el observador esté en el centro del movimiento, puesto que así coincidirían el centro de rotación y el de observación. En este segundo caso no sería exigible que, además, estén en el centro geométrico de la esfera, siempre que no haya otros elementos perceptuales mediante los cuales se pueda dirimir la posición relativa respecto de la esfera (tal como sucede en el caso de la esfera de las estrellas fijas).

Respecto de la combinación del movimiento del Sol y de las estrellas, las respectivas soluciones se siguen de lo anterior. Para Ptolomeo, es necesario que la Tierra sea centro geométrico y centro de observación de ambos; para Galileo, en cambio, es suficiente que ambos movimientos sean compatibles. Y la consideración del movimiento diurno de las estrellas por rotación terrestre y anual del Sol por traslación son compatibles entre sí y respecto de cualquier posición relativa del sistema Tierra-Sol con las estrellas, siempre que se cumpla la hipótesis auxiliar A_{Cop} . Pero este cumplimiento, cabe insistir, no es un requisito para la interpretación de una esfera estática, sino que responde a la necesidad de dar cuenta de la cinemática del cielo. Si el sistema Tierra-Sol estuviera, por ejemplo, muy cerca de alguna otra estrella, los movimientos aparentes serían muy distintos, pero un observador sobre una Tierra que rota vería siempre la mitad de la esfera.

Entonces, que el cielo o la eclíptica se comporten como lo hacen efectivamente responde a que sea verdadera alguna hipótesis que sitúe al observador en el centro de la observación y, simultáneamente, en el centro de los movimientos. Tanto una como otra hipótesis lo hacen. La de Ptolomeo,

porque estamos en el centro de los movimientos absolutos; en la de Galileo porque, desde el momento en que asume las hipótesis copernicanas, todos esos movimientos son relativos a la Tierra, que es donde se encuentra el observador.

Así, dados los conceptos de Galileo, que recogen una verdadera relativización al observador del conjunto de observaciones celestes, cualquiera fuera la realidad de los movimientos relativos, el horizonte —en tanto círculo máximo— cortaría a la mitad a la esfera con centro en el observador. Y lo mismo ocurriría, desde luego, con cualquier círculo máximo de la esfera. De modo que O_1 no podría utilizarse jamás para refutar una de las H , por cuanto jamás podría deducirse O_2 de la otra. Claro está, que entonces su apoyo en el marco de una corroboración no tendría valor alguno.

Por otra parte, y respecto del diseño de la experiencia por parte de Ptolomeo, la formulación de las cuatro hipótesis es inadmisibles para Galileo (y debiera haberlo sido para Copérnico). Los enunciados “la Tierra está fuera del eje y equidistante de los polos” o “sobre el eje y más cerca de uno de los polos” o “fuera del eje y más cerca de uno de los polos”, requieren que se acepte que tales opciones son posibles. Pero ¿qué sentido puede tener para un copernicano que la Tierra se encuentre “fuera del eje”? ¿de qué eje? Si la Tierra es la que rota, entonces no puede suponerse nunca una Tierra fuera del eje. Y lo mismo respecto de los polos, en tanto puntos definidos respecto del eje.

La aceptación de los conceptos de Ptolomeo encerraba las condiciones para la aceptación de las conclusiones de su argumento. Dentro del ámbito astronómico Galileo fue el primero en comprender acabadamente la naturaleza de este problema. Esta comprensión no solo fue condición de posibilidad para la aceptación de un resultado diferente de la experiencia, sino que —lo que es más importante— fue determinante de un cambio en el carácter asignado a la propia experiencia.

Esto parece especialmente significativo dado que la percepción no parece haberse modificado. Galileo tenía la misma impresión visual que Copérnico o que Ptolomeo al observar el movimiento de las estrellas sobre el horizonte (el telescopio en nada influyó al respecto). Es algo análogo a lo ocurrido en ese mismo período con el denominado *experimento de la torre* (que también resolvió satisfactoriamente Galileo), con el que comparte un notable parecido desde un punto de vista epistemológico. La comparación es valiosa.

5.5) Parangón con el experimento de la torre

Uno de los argumentos fuertes contra el movimiento de la Tierra era de índole física y señalaba que no era consistente ni con el comportamiento de los graves al caer ni con los proyectiles al ser lanzados. En una de las formulaciones más clásicas del argumento, se apelaba al problema de qué ocurría con un grave (por ejemplo, una piedra), cuando se la dejaba caer desde el extremo superior de una torre.

De acuerdo con los presupuestos físicos antiguos y medievales, lo que debía observarse con una Tierra en movimiento era que el grave contactara el suelo en un punto distinto al de la vertical trazada entre el punto en el que se lo dejaba caer y el centro de la Tierra. Lo que creían era que, una vez que dejaba de estar en contacto con lo que lo sostenía en la punta de la torre, el grave comenzaba a describir una línea recta de caída en un espacio absoluto hacia el centro de la Tierra. Por tanto, debía caer a una distancia de la base de la torre (una distancia que, además, debía ser mayor cuanto más alta fuera la torre). Luego, como eso no sucedía, se traducía el resultado del experimento en la necesidad de admitir que la Tierra debía estar en reposo.

Para asimilarlo más directamente a lo analizado respecto de la bisección, se puede decir que en este caso para los defensores del geoestatismo las consecuencias observacionales de la H_1 (“la Tierra se encuentra en reposo”) y de H_2 (“la Tierra se mueve”), serían O_1 (“la piedra cae al pie de la torre”) y O_2

("la piedra no cae al pie de la torre"), respectivamente. Luego, como se verifica O_1 , se verifica H_1 , dado que O_1 es la negación de O_2 , y H_1 de H_2 .

Algunas diferencias con el caso del horizonte son evidentes. En particular, que mientras que la bisección del horizonte es lo que suele denominarse una *experiencia*, el de la torre es un *experimento*; lo que daría cuenta de que mientras las condiciones iniciales de la primera no son modificables, las condiciones iniciales de la segunda sí lo son. Por tal motivo utilicé hasta aquí la noción de *experiencia* (y no *experimento*) para referir a la bisección; porque fui respetuoso de la distinción entre las situaciones en las que el científico puede controlar variables y aquellas en las que no. Aunque esta aproximación merece algunas consideraciones complementarias.

En primer lugar, porque no todas las condiciones iniciales son modificables en el experimento de la torre, a la vez que existen ciertas condiciones manipulables en el caso del horizonte. Y no son necesariamente más relevantes las condiciones iniciales manipulables en el caso de la torre que en el caso del horizonte. Así como se pueden modificar la forma y el tamaño de los graves, la altura de la caída y otras variables en el caso de la torre, se pueden modificar la altura de observación (un observador situado en un valle no ve lo mismo que uno situado sobre una montaña), las latitudes y las longitudes en el caso del horizonte, o las condiciones atmosféricas.

Por otra parte, en ambos casos la condición inicial fundamental se encuentra postulada y es inmodificable: el estado de la Tierra en lo que hace a su movimiento o reposo. Quienes apelaban al experimento de la Torre como prueba contra el movimiento terrestre, no tenían a su alcance la posibilidad de analizar qué sucedía *realmente* en una Tierra distinta a la postulada por ellos; como mucho, podían analizarlo mentalmente y/o por analogía con lo que ocurría en contextos con condiciones iniciales completamente manipulables (como un barco y un grave arrojado desde la punta del mástil). Lo mismo ocurre con la experiencia del horizonte. En este sentido, ambas tienen una componente mental fuerte; en ambos casos se señala cómo la experiencia-

experimento rechaza la hipótesis a partir de condiciones iniciales diferentes (en lo que hace a la posición y movimiento de la Tierra), que son imaginadas.

Lo anterior permite considerar más directamente otros paralelismos. La solución que se dio al problema de la torre en el marco de una física inercial no supuso que el objeto arrojado cayera en un lugar distinto al punto inferior de la vertical que une el punto en el que fue lanzado el objeto y el centro de la Tierra. Lo que sí era necesario aceptar (aunque no suficiente) es que dicha vertical se movía con la Tierra por lo que, lógicamente, admitir que las coordenadas terrestres del contacto con el suelo fueran las mismas no implicaba que las coordenadas absolutas lo fueran. Así, el enunciado observacional expresado en coordenadas terrestres es el mismo para la hipótesis geoestática que para la no geoestática, aunque expresado en coordenadas celestes no lo fuera. Ambos comportan una relativización de las posiciones en el espacio.

Otro paralelismo relevante, es que la reinterpretación del experimento de la torre mediante la física inercial no es un argumento *a favor* del movimiento terrestre. La física inercial no apoya (de manera aislada y a través de esta sola experiencia) el movimiento de la Tierra: en un sistema inercial con una Tierra en reposo, la piedra también caería al pie de la Torre. Lo que hace entonces la física inercial en este caso es apoyar la *posibilidad* del movimiento terrestre. Lo mismo ocurría con la bisección de la esfera por parte del horizonte, cuyas sucesivas reinterpretaciones daban lugar a la *posibilidad* de considerar una hipótesis de descentramiento terrestre, pero sin apoyarla directamente nunca. En ambos casos, las hipótesis rivales predicen en cierto sentido una misma observación O_1 ; en el de la bisección, puesto que ambas hipótesis predicen que el horizonte corta efectivamente al medio a la esfera, y, en el de la torre, puesto que ambas predicen que la piedra concluirá su recorrido al pie de la torre. Desde luego, la interpretación de las experiencias es distinta para cada hipótesis. En el caso de la torre, por cuanto Galileo admite que el punto relativo al que cae la piedra (en un sistema de referencia terrestre) es el mismo, pero no el punto absoluto (en un sistema de referencia estelar), para

lo que —entre otras cosas— debe redefinir el concepto *caída*. En el caso de la esfera, por cuanto Galileo admite que el *horizonte* corta al medio a la *esfera*, pero esa esfera no es absoluta sino relativa a un observador que la define.

Por último, y como síntesis relevante de lo anterior, es posible constatar que para la aceptación de la compatibilidad del movimiento terrestre con la caída de los graves es necesario modificar los conceptos fundamentales utilizados para describir la experiencia. Galileo lo hizo señalando que en el caso de una Tierra en movimiento esa caída es solo vertical en nuestro sistema de referencia terrestre. Para un sistema de referencia absoluto, la piedra describiría una parábola. Entonces, así como en el caso del horizonte, la clave estaba en la modificación de los conceptos *horizonte*, *ecuador*, *eclíptica*, *esfera*, *polo*, etc., en el caso del experimento de la torre es necesaria la modificación de conceptos como *movimiento*, *espacio*, *caída*, *lugar* y *velocidad*, entre otros. .

5.6) Las interpretaciones naturales

Para dar cuenta de los procesos inherentes a la aceptación de los cambios conceptuales necesarios para compatibilizar el experimento de la torre con el movimiento terrestre, Feyerabend desarrolló la noción de *interpretación natural*. Las *interpretaciones naturales* son operaciones mentales que siguen tan de cerca a los sentidos y que están tan firmemente conectadas con sus reacciones que resulta difícil conseguir una separación (Feyerabend 1970, 47 y ss.). Es la forma en la que elementos ajenos a la observación propiamente dicha pueden determinar lo que se observa y, convergentemente, contribuir al vínculo semántico establecido entre el término y su referente. Al ser inherentes a la observación, cumplen un papel fundamental en la resistencia al cambio semántico, siendo necesarias condiciones de diversa índole (racionales y no racionales) para su cambio. Por ello, son especialmente relevantes para caracterizar los momentos de grandes cambios científicos, entendidos desde esta perspectiva como reemplazos de una *interpretación natural* por otra. La idea subyacente es que la interpretación de un lenguaje está determinada por las teorías utilizadas para explicar lo que se observa

(Feyerabend 1981) por lo que los términos observacionales se erigen como caballos de Troya de la teoría que los forjó. Así concebida, la noción de Feyerabend se ofrece como una herramienta útil para comprender el proceso subyacente al caso estudiado en esta tesis³².

La observación del horizonte y, conjuntamente con ella, los conceptos utilizados para describir y comprender esa observación, se encontraron atravesadas sucesivamente por diferentes *interpretaciones naturales*. Fueron ellas las que definieron el carácter de lo observado e, indirectamente, su valor epistemológico como prueba para la determinación de la posición de la Tierra en el mundo. Fue, por otra parte, la desnaturalización de la *interpretación natural* preexistente lo que permitió a Galileo la compatibilización absoluta de la experiencia con cualquier posición terrestre. Fue, por último, el establecimiento de una nueva *interpretación natural* lo que permitió la construcción de vínculos semánticos diferentes de los términos utilizados para describir la experiencia y lo que vehiculizó un nuevo sentido de realidad.

Tales consideraciones son las que permiten sostener un aspecto central de la Tesis V de este trabajo: el cambio en el concepto *horizonte* no procede de un cambio *en* lo observado sino que, por el contrario, propició un cambio en el propio carácter de la observación; más que captar aspectos de una realidad externa, constituyó la premisa para esa captación; en tal sentido, *construyó* un nuevo sentido de exterioridad.

³² Existen distintas periodizaciones y caracterizaciones de la obra de Feyerabend. Generalmente, coinciden en señalar la década del setenta (especialmente la primera mitad, en la que Feyerabend desarrolló la noción de *interpretación natural*) como aquella en la que el eje central fue la defensa del *anarquismo epistemológico*, caracterizado por la defensa del *proliferacionismo* y del *contrainductivismo* (al respecto, véase Feyerabend 1995; Preston 1997; Oberheim 1999; Preston, Munévar, y Lamb 2000; Oberheim 2006). No abordaré en este trabajo las discusiones en torno a la originalidad de esta propuesta de Feyerabend o al grado de familiaridad que puede presentar respecto de otras. Tales consideraciones podrían ser objeto de estudio suficiente para trabajos de tesis destinados exclusivamente a tal fin. Adopto la noción de *interpretación natural* porque resulta especialmente esclarecedora de los cambios subyacentes a la reinterpretación de experiencias por parte de Galileo (al respecto, véase Tula Molina 2011).

5.7) La existencia de experiencias cruciales

Planteada de este modo, la crucialidad de las experiencias depende de los términos en los que estas se describen. Lo que pareciera sugerir que las experiencias cruciales *no existen* y que, como mucho, existen las *experiencias decisivas* (en el sentido dado más arriba). Ahora bien, que exista una dimensión histórica que determina las condiciones para la observación, la interpretación y la propia caracterización de una experiencia ¿realmente implica que las experiencias cruciales *no existen*? Deseo sugerir que la respuesta es negativa.

En primer lugar, porque parece razonable tratar a las experiencias cruciales de acuerdo con algún parámetro común al de cualquier experiencia. Y no se suele considerar suficiente el hecho de que nunca una hipótesis es evaluada de manera aislada para aseverar la *inexistencia* de las experiencias comunes. Como mucho, se señala la necesaria limitación de cualquier proceso investigativo que incurra en experiencias, incluidos los problemas vinculados a la carga teórica de la observación como el visto en el Capítulo 4. Algo análogo debiera ocurrir entonces con las experiencias cruciales. Que los filósofos de la ciencia hayan detectado las dificultades de encontrar experiencias verdaderamente cruciales por motivos parecidos a los tratados aquí, no parece suficiente para negarles su valor.

En segundo lugar, porque este caso muestra que la descrucialización de una experiencia respecto de H_1 y H_2 producto de un cambio en los conceptos utilizados para describir la experiencia es consistente con la conservación de su carácter crucial en otro nivel. Concluir " $H_1 \vee H_2$ " parece trivial, pero no lo es. La formulación de Galileo no prueba que la Tierra esté fuera del centro; prueba que no se puede saber mediante esa experiencia si la Tierra está en el centro o no. Así, si bien es cierto que no permite afirmar H_2 , permite afirmar su irrefutabilidad por vía de esa experiencia; de ello se sigue un cierto valor epistemológico *crucial* de una experiencia donde ahora se cruza H^* (que establece que "solo es posible H_1 ") y H^{**} (que dice que "es posible H_1 y es

posible H_2 ”). Visto de este modo, se preserva el valor de *crucial* respecto de una H de segundo orden (o meta-hipótesis): la posibilidad o imposibilidad de pensar en la plausibilidad de H_2 .

Esto impone que se evalúe las condiciones que intervienen en la (re)interpretación de una determinada experiencia al momento de atribuirle o quitarle el carácter crucial. El camino recorrido hasta aquí permite sostener que el cambio conceptual profundo subyacente a la *solución galileana* no fue resultado del mero cambio teórico, así como tampoco fue producto de cambios en la propia experiencia. La necesidad de Copérnico de salvar las apariencias relativas a la experiencia de la bisección no lo condujo a impugnar los conceptos ptolemaicos. Resolvió el problema, *simplemente*, rechazando una de las hipótesis auxiliares y reemplazándola por otra. Es importante insistir en que Galileo podría ampararse en la misma estrategia que Copérnico y que el telescopio, como señalé, antes que horadar tal solución, le daba un respaldo muy sólido: no era necesario aceptar que las estrellas tuvieran un tamaño absoluto tan grande. No obstante, Galileo dio un paso en otra dirección.

El desafío explicativo reside, entonces, en lo siguiente. Dos respuestas a un mismo problema fueron dadas en un intervalo de tiempo menor a un siglo sin que mediaran nuevas observaciones categóricas a este respecto ni un cambio general en la teoría astronómica. La nueva respuesta depende del cambio en el sentido de los conceptos que ordenan la experiencia. Históricamente, el hecho de que haya existido una *solución copernicana* muestra que el cambio teórico no fue condición suficiente para este cambio conceptual. Por otra parte, la posibilidad que tenía Galileo de respaldar su copernicanismo en esa misma hipótesis auxiliar muestra que no es condición necesaria la ausencia de una respuesta satisfactoria para que se dé un cambio conceptual como el que él protagonizó.

En el próximo capítulo sistematizaré la naturaleza del cambio conceptual que supuso la propuesta galileana y consideraré la potencia explicativa del

enfoque teórico-metodológico desarrollado en el ámbito de la denominada *historia cognitiva*.

CAPÍTULO

6

REPRESENTACIÓN Y EXPLICACIÓN DEL CAMBIO CONCEPTUAL

En este capítulo daré sustento a la Tesis VI. Para ello, señalaré las características generales de la denominada *historia cognitiva* y, en particular, de las técnicas utilizadas por algunos de sus exponentes para describir y explicar el cambio conceptual (los *frames* y *dynamic frames*). Señalaré por qué los *frames* no son útiles para describir cambios en los conceptos como los estudiados en esta tesis y procederé a representarlos mediante *dynamic frames*. Hecha la descripción mediante esa técnica, evaluaré su aspiración de ser una herramienta que explica el cambio conceptual y concluiré que no es exitosa para el caso estudiado aquí. Lo anterior justificará la necesidad de introducir la tercera parte de este trabajo.



6.1) La historia cognitiva

En las últimas décadas, un espacio multidisciplinar desarrollado desde las *ciencias cognitivas* se orientó al estudio de las dinámicas asumidas por los conceptos tanto en los procesos de aprendizaje como en el desarrollo histórico de la ciencia. La publicación a fines de 2008 (y posterior reedición ampliada en 2013) del *International Handbook of Research on Conceptual Change* (Vosniadou 2008; Vosniadou 2013) se exhibe como la culminación del proceso de constitución de dicho espacio en lo que podría denominarse un *campo de investigaciones sobre cambio conceptual*³³.

Si bien este *campo* debe su existencia a estudios realizados desde diversos espacios de producción académica, suele considerarse a sí mismo deudor, preponderantemente, de la obra de Kuhn. El giro que, según sus exponentes, supusieron las tesis desarrolladas en *The Structure of Scientific Revolutions* (Kuhn 1962) constituyó, junto con la crítica de Feyerabend al principio de invarianza del significado (Feyerabend 1965), la condición de posibilidad para la aceptación de que los conceptos científicos están relacionados en las leyes fundamentales de las teorías y que, por tanto, sus significados dependen de, y cambian con, ellas. Así, las tesis de Kuhn y Feyerabend, las críticas que recibieron (Shapere 1966; Davidson 1974; Achinstein 1964) y sus respuestas (Kuhn 2000; Feyerabend 1965), son percibidas por este *campo* como el hito fundamental del reconocimiento del problema del *cambio conceptual*, quedando generalmente relegadas las consideraciones sobre los conceptos trazadas con anterioridad desde la filosofía de las ciencias³⁴. También es reconocido el desarrollo de las consideraciones sobre los conceptos que se

³³ Realizo una caracterización más general de este *campo* en Szapiro (2010).

³⁴ La *novedad* de las propuestas de Kuhn y Feyerabend es objetable en la medida en que es posible hallar *anticipaciones* de tales ideas, incluso entre los exponentes del empirismo lógico. Por ejemplo, Gentile (2013, 185 y ss.) señala distintos fragmentos en los que Carnap muestra plena consciencia de algunos aspectos generalmente considerados originales de la *filosofía histórica de la ciencia*. Los exponentes del campo que considero aquí son menos sensibles a tales continuidades (por ejemplo, Arabatzis y Kindi 2013).

realizó desde la psicología cognitiva y desde la didáctica de la ciencia (entre ellas, Chi et al. 1981; Posner et al. 1982), espacio en el que los estudios se centraron en el análisis de la dinámica de acuerdo con la cual los individuos logran apropiarse de conceptos desde sus conocimientos previos y desde el que se ha apuntado a una mejor comprensión de las formas en las que los humanos utilizan los conceptos en los razonamientos.

A partir de la aplicación de algunas de estas herramientas desarrolladas en el ámbito de las *ciencias cognitivas* al estudio de casos históricos de cambio de teorías científicas, surgió lo que algunos denominaron *historia cognitiva* (Nersessian 1994; Andersen, Barker, y Chen 2006). Entre ellas, se destacan dos técnicas para representar organizaciones conceptuales: los *frames* (marcos) y los *dynamic frames* (marcos dinámicos).

6.2) Los frames

El uso de *frames* está orientado al reconocimiento de los vínculos taxonómicos existentes entre los conceptos en el marco de una teoría; mediante esta técnica, investigadores en *ciencias cognitivas* buscaban resolver algunos problemas que manifestaba otra forma pretérita de representar conceptos que apuntaba a señalar sus rasgos salientes para cada individuo o sociedad, pero relegando su clasificación (por ejemplo, Rosch et al. 1976). Para su diseño recuperaron algunas herramientas elaboradas en ámbitos vinculados a la inteligencia artificial (por ejemplo, Minsky 1974; Hinton 1988) y establecieron formas de representar las taxonomías conceptuales y los vínculos entre las partes y el todo existentes para cada concepto. Un ejemplo genérico sería como el que se puede ver en la Figura 6.1, donde a uno y otro lado de la línea divisoria quedan representadas dos organizaciones conceptuales distintas, siendo cada uno de los globos un concepto:

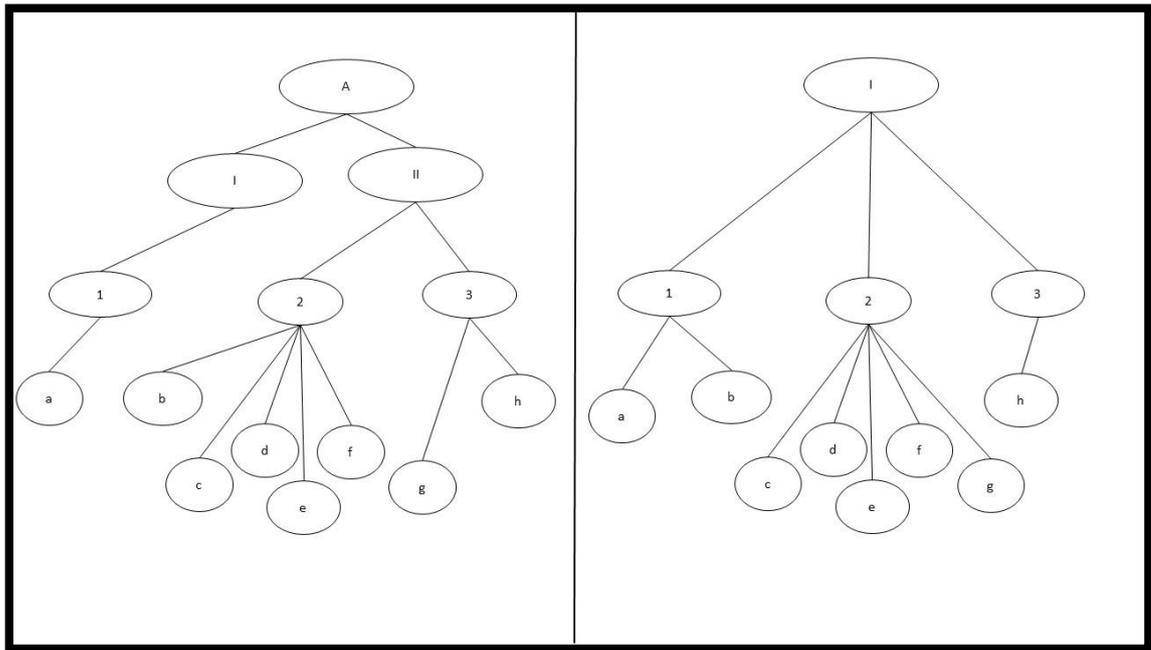


Figura 6.1: estructura conceptual genérica representada mediante un *frame*.

En este ejemplo, suponiendo que el *frame* de la derecha es la representación de evolución del *frame* de la izquierda, se puede apreciar que, si bien siguen existiendo los conceptos *a-h, g* dejó de ser parte de 3 para pasar a ser parte de 2, los conceptos 1-3 pasaron a estar todos subordinados a *I*, y *A* y *II* desaparecieron.

Un ejemplo temprano de la aplicación de esta técnica para representar cambios históricos en la ciencia puede hallarse en el libro *Conceptual Revolutions* de Thagard (1992). Para el autor, la manera de clasificar los conceptos de acuerdo con su pertenencia a conjuntos es lo que distingue de manera más evidente a un sistema de otro, teniendo lugar una *revolución* cuando se reemplaza abruptamente una clasificación conceptual por otra. Uno de los ejemplos brindados por Thagard es el de la reforma astronómica introducida por Copérnico, que puede, según el autor, ser caracterizada como una *revolución conceptual* por cuanto supuso una reclasificación que caracteriza del siguiente modo:

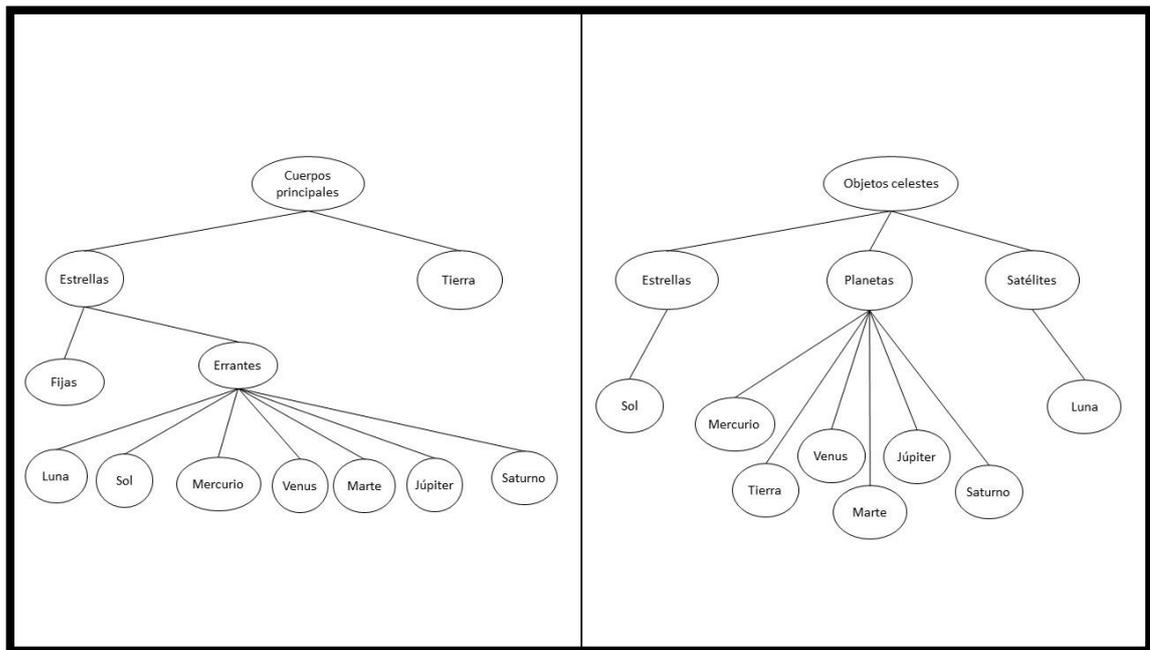


Figura 6.2: *frame* de conceptos astronómicos c. 1500 y c. 1700, según Thagard (1992)

La comparación de *frames* en la Figura 6.2 permite detectar un cambio *revolucionario* entre c. 1500 (a la izquierda) y c. 1700 (a la derecha): la distinción entre cuerpos celestes y terrestres fue eliminada, las *errantes* dejaron de ser *estrellas*, *Sol* y *Luna* dejaron de ser *errantes* (para pasar a ser *estrella* y *satélite*, respectivamente) y *Tierra* pasó a ser un *planeta* conjuntamente con los *errantes* anteriores (excepto *Sol* y *Luna*).

Las representaciones mediante *frames* son ciertamente limitadas. Permiten la identificación de las continuidades o rupturas a nivel taxonómico pero operan en detrimento de la comprensión de dinámicas de cambio de significado que pueden tener lugar en los procesos de cambio científico. En especial, no expresan los cambios que pueden tener lugar en el *sentido* o la *intensión* de los conceptos. Y si dichos cambios no se manifiestan en cambios en la extensión, entonces este tipo de representación podría hacer parecer que no hubo cambios de significado cuando sí los hubo.

Esto es lo que ocurriría, por ejemplo, si se los quisiera utilizar para representar los cambios en los conceptos de *astronomía de posición* entre los que se encuentra *horizonte*. Tomando la jerarquización interna de los

conceptos más significativos se podría sugerir que no hubo cambios conceptuales puesto que los vínculos taxonómicos entre ellos no se modificaron. Por ejemplo, *círculo celeste* como concepto de clase continuó reuniendo a los conceptos *horizonte*, *meridiano*, *ecuador*, *eclíptica*, etc. Pero esto contrasta con lo establecido en los capítulos precedentes: los conceptos de astronomía de posición sí tuvieron un cambio en su significado en ese período.

6.3) Los *dynamic frames*

La crítica en el ámbito de las ciencias cognitivas a esta falta de complejidad dio lugar al desarrollo de nuevas formas de representar evoluciones conceptuales mediante diagramas que también fueron utilizados para caracterizar *revoluciones científicas*: los *dynamic frames* (en adelante, *DF*). La característica saliente y diferenciadora de los *DF* es que, por oposición a los *frames* y mediante una forma de diagramación diseñada por Barsalou (1992), buscan señalar atributos de conceptos que permitan apreciar su variabilidad en el tiempo y, así, captar su dinamismo. El elemento novedoso de este tipo de representación es que ya no se limita a establecer las relaciones taxonómicas. Expresa más acabadamente los elementos que median entre un concepto subordinado y uno superordinado. Un ejemplo genérico es el siguiente:

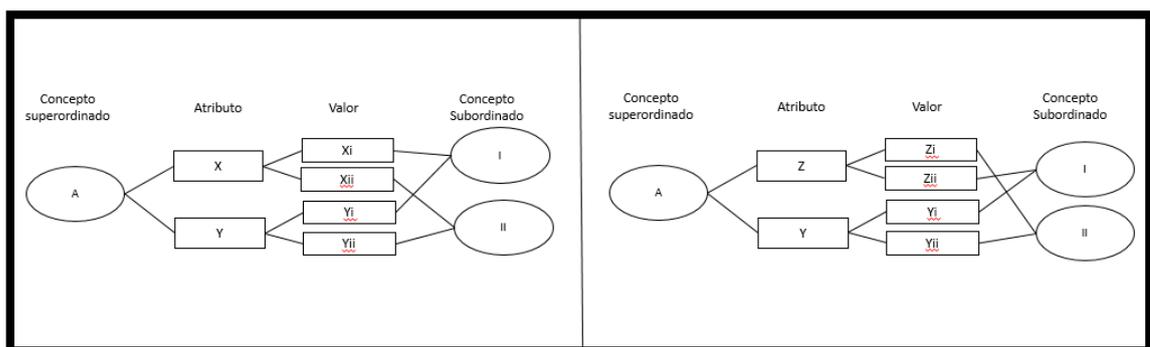


Figura 6.3: estructura conceptual genérica representada mediante un *DF*.

Nuevamente, considerando al *DF* de la derecha de la Figura 6.3 como la evolución del de la izquierda, y tal como se puede apreciar, aunque los

conceptos *I* y *II* siguen subordinados a *A*, los motivos de tal subordinación variaron. Ello queda expresado mediante esta técnica en que la subordinación se da mediante los *valores* de cada *atributo* que activan los conceptos *I* y *II*, que ya no son los mismos en el de la derecha. Los *valores* son casos de los *atributos*, siendo ambos también conceptos. El procedimiento es recursivo y los conceptos subordinados pueden a su vez tener valores y atributos que den lugar a conceptos subordinados a los que originalmente eran subordinados; lo mismo, respecto de los valores y atributos que, en tanto conceptos, pueden tener su respectivo *DF*. Por tal motivo, los *DF* son siempre parciales, puesto que de cada concepto utilizado como valor o atributo podría hacerse un nuevo *DF*.

Los *DF* explicitan los criterios de acuerdo con los cuales los conceptos se encuentran agrupados en relaciones jerárquicas de clase, tal como los que representan los *frames*; de manera que no los excluyen sino que los incorporan (aunque en este caso, tales jerarquías quedan expresadas horizontalmente y no verticalmente como en el caso de los *frames*). Por otra parte, admiten en su construcción conceptos de distinta clase, lo que no se puede hacer con los *frames*; así, por ejemplo, para subordinar los conceptos *planeta*, *luna*, *Sol* y *estrella* al concepto *objeto celeste* en 1500 y 1700, Andersen, Barker y Chen (2006) utilizan atributos muy diferentes (*movimiento angular*, *distancia*, *luminosidad*, etc.), como se puede apreciar en la Figura 6.4.

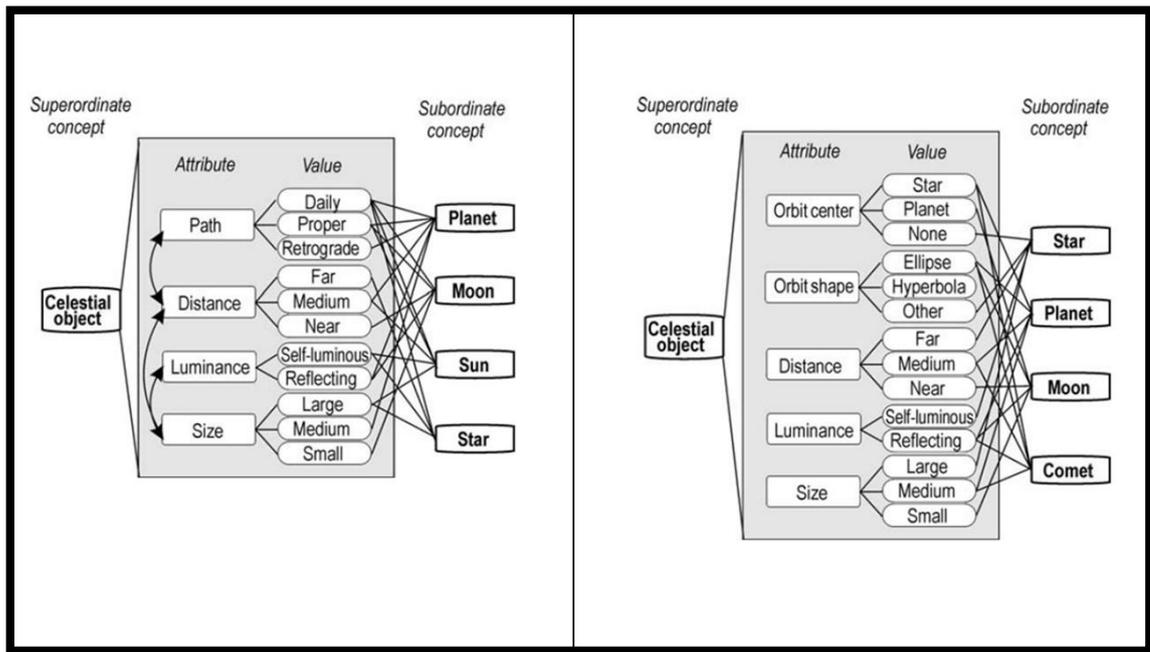


Figura 6.4: DF de “objeto celeste” c. 1500 y c. 1700, según Andersen et al. (2006).

Esto los vuelve un instrumento más adecuado para representar conceptos científicos en su desarrollo histórico. La posibilidad de indicar atributos y valores para cada concepto permite captar el cambio aun allí donde el cambio en las taxonomías no se da.

Si bien existen intentos de utilizar esta técnica para dar cuenta de cambios en la historia de la astronomía en general y en la reforma astronómica que tuvo lugar en los siglos XVI y XVII en particular (Chen y Barker 2000; Andersen, Barker, y Chen 2006) ninguno de ellos buscó dar cuenta de los que aquí considero como conceptos de *astronomía de posición*. Todas sus indagaciones se encuentran estrictamente ceñidas al problema del movimiento angular de los cuerpos celestes, al que entienden en el *explanandum* básico de la astronomía desde la Antigüedad hasta el siglo XVI, puesto que consideran anacrónicamente que el tamaño de la esfera fue siempre arbitrario (Andersen, Barker, y Chen 2006, 130-3); según mostré en los capítulos precedentes, esto es cierto desde Galileo, pero no antes.

Considero que la representación de los conceptos geométricos utilizados en la *astronomía de posición* es necesaria para complejizar esa imagen de los

conceptos astronómicos del período. Ninguna representación que omita esa multiplicidad de esferas, círculos, puntos y ángulos de los que estaba plagado el universo conceptual de los astrónomos puede aspirar a ser una descripción adecuada. En lo que sigue, buscaré realizar un aporte en tal dirección, lo que permitirá i) esclarecer lo considerado hasta aquí sobre estos conceptos, y ii) examinar críticamente las virtudes de esta técnica de representación con miras a justificar la Tesis VI. Para tal fin, iré explicitando los criterios utilizados en cada paso de su construcción.

6.4) Los conceptos subordinados y el concepto superordinado.

El conjunto de conceptos al que quiero referir es aquel que permanentemente se relaciona en las fuentes con el concepto *horizonte*. Ellos son aquellos que designé hasta ahora como conceptos de *astronomía de posición* y que, a los fines de esta representación, restringiré a: *esfera de las estrellas, ecuador, eclíptica, coluro, horizonte, meridiano, polo, equinoccio, solsticio, vertical*. Debí recurrir al concepto *vertical* (concepto no del todo canónico) que es el único existente en la literatura que permite reunir *cenit* y *nadir* del mismo modo en que se encuentran reunidos ambos solsticios, ambos polos y ambos equinoccios (que también son puntos opuestos entre sí en cada caso). Por otra parte, no incluí aquellos otros conceptos que, como *paralelo* y *meridiano celeste*, son utilizados solo ocasionalmente.

Consideraré que tales conceptos se encuentran todos subordinados al concepto superordinado *objeto geométrico celeste observable*. Considerar a las entidades referidas por ellos como *objetos* como *geométricos* y como *celestes* no parece requerir justificación. Sí, en cambio, parece requerirla el hecho de considerarlos *observables*. Puede parecer oximorónica la idea de puntos, líneas y circunferencias *observables*, pero cobra sentido a partir del estudio histórico. Justificaré la decisión desde el concepto *horizonte*.

Hay distintas razones para decir que el horizonte no se observa. La primera, y más sencilla, es que se trata de un plano perpendicular al

observador, por lo que se manifiesta como una línea que, por no tener espesor, no es observable. Adicionalmente, su propia definición como *límite* entre lo que se observa y lo que no se observa (lo que se aplica a todas los sentidos considerados en los primeros capítulos de este trabajo) implica que no pueda ser en sí parte de lo que se observa, lo que de acuerdo con las primeras propuestas del empirismo lógico a este respecto (Carnap 1936), debiera conducirnos a considerar al término "horizonte" como teórico.

Lo anterior contrasta con la práctica de los propios astrónomos que, si bien lo consideraban geoméricamente invisible y como límite, no obstante ello lo utilizaban no solo como punto de referencia para la observación sino que, mucho más aún, apelaban a su observación para establecer la centralidad de la Tierra; por lo anterior es claro que para los astrónomos era posible obtener información acerca del horizonte independientemente de si lo observaban directamente. Esto permitiría considerarlo observable suscribiendo, por ejemplo, la *teoría informacional de la observación* que señala que para que una entidad sea observable es suficiente que se pueda obtener información de ella a partir de la interacción con objetos en el mundo (Kosso 1989).

Pero, por otra parte, no es mi interés aquí tomar posición a partir de la evaluación de las distintas consideraciones que los filósofos han hecho en torno a la observabilidad (tema para el que considero fértil, aunque complejo, el caso estudiado), sino sustentar una elección del concepto superordinado que permita distinguir significativamente a estas entidades geométrico-celestes de otras cuya naturaleza es bien distinta (como *ecuante, excéntrica, foco* u *órbita*). Y es claro que para los astrónomos estudiados, tales entidades (a diferencia de otras) eran observables independientemente del juicio que podamos trazar al respecto; tal como lo advertía el propio Carnap, los filósofos y los científicos utilizan de manera muy diferente los términos "observable" e "inobservable" (Carnap 1969, 229), y tiene sentido —tal como lo señaló van Fraassen (1987)— tomar como referencia lo que en la propias teorías es considerado observable. La elección, entonces, se sustenta en la conveniencia

de representar lo que para los astrónomos estudiados diferenciaba a unas entidades de otras.

Aunque se impone una consideración. Mientras que para Ptolomeo la observabilidad de estas entidades era independiente de cualquier posición del observador en el cosmos, para Copérnico y Galileo la observabilidad de algunas de ellas dependía de que el observador estuviera situado en la Tierra (o en otro cuerpo que se comportara de igual manera). Así, de acuerdo con Copérnico y Galileo, para un observador situado en el Sol carecerían de sentido los conceptos *ecuador*, *eclíptica*, *polos*, etc.

6.5) Atributos y valores

Mi interés es desarrollar un *DF* que dé cuenta del cambio en el sentido asumido por el concepto *horizonte* entre Ptolomeo, Copérnico y Galileo. Por tal motivo, los atributos y valores utilizados están especialmente escogidos para tal fin, y consideraré algunos atributos para algunos pensadores, aun cuando todos los conceptos activen el mismo valor. Esto tiene por fin exclusivo dar cuenta del cambio entre pensadores. Si bien puede parecer arbitrario, creo que ese tipo de arbitrariedad está implícita en cualquier construcción de un *DF*, y que en todo caso lo que estoy realizando aquí es explicitarla. Volveré sobre este aspecto más adelante.

Un primer atributo útil para distinguir entre estos conceptos es el de la *forma* de la entidad a la que refieren. Claramente, entre tales entidades se pueden diferenciar esferas, círculos y puntos. Este atributo admite entonces tres valores que operan perfectamente bien para clasificar los conceptos, y lo hacen de manera adecuada tanto para describir el *sentido ptolemaico*, como el *copernicano* y el *galileano*.

Un segundo atributo que es posible utilizar es la *distancia* al observador de la entidad a la que refieren. Esto requiere una aclaración; desde luego, no es lo mismo la distancia a un *punto* que a un *círculo* o a una *esfera*. Estos dos últimos requieren ser claros respecto de qué parte de la forma se está

considerando. Puesto que tanto en el caso de *círculo* como en el de *esfera* la idea presentes en las tres estructuras conceptuales que deseo representar es que el ojo del observador se encuentra *dentro* de ellas, por *distancia* entenderé la distancia del ojo a alguno de sus puntos externos (en el caso del *círculo*, de la circunferencia, y en el caso de la *esfera*, de su superficie). Por otra parte, y respecto de los *atributos*, no pretenderé aquí incluir distancias absolutas (lo que demandaría considerar problemas sobre distintos tamaños de universo aun dentro de una misma teoría) sino una cualidad: si es *determinada* o *indeterminada*. Por *determinada* entenderé que existe alguna cota (máxima, mínima o ambas) que condicione la distancia a la que se debe hallar el límite de la forma, y por *indeterminada*, que acepta que pueda estar a cualquier distancia.

Un tercer atributo que consideraré es el de *cantidad*. Con ella pretendo dar cuenta de cuántos de esos objetos se le presentan a los observadores terrestres. Para lo que también escogí dos valores cualitativos: *finita* o *infinita*. A los fines de esta comparación, podrían haberse señalado *uno*, *dos* e *infinito*, pero parece innecesario y es claro que la distinción cualitativa es la verdaderamente sustancial.

Un cuarto atributo es el de *movimiento*, con el que deseo referir a los movimientos de los objetos que puede percibir un observador respecto de sí. Y los valores que representaré son *nulo*, *aparente* y *real*. Con *movimiento nulo* me refiero a aquellos objetos que no se mueven respecto del observador, aun cuando éste se mueva; esto es, objetos que se mueven solidariamente con el observador. Con *movimiento aparente* me refiero a movimientos de objetos que son considerados en reposo absoluto y que, por tanto, tienen lugar solo si el observador se mueve en el espacio absoluto (según lo que cada sistema considere). Y por *movimiento real* me refiero a aquellos movimientos que tendrían lugar aun cuando el observador permaneciera en reposo en el espacio absoluto (nuevamente, según lo que cada sistema entienda por ello). Para considerar cualquiera de estos movimientos dejaré de lado aquellos que

son producto de lo que hoy conocemos como movimiento de precesión de los equinoccios.

Un quinto atributo busca dar cuenta del carácter de lo percibido: la *equidistancia* al observador. Nuevamente, y teniendo en cuenta lo señalado a propósito del atributo *distancia*, esto requiere especificar en qué sentido se lo utiliza. En el caso del concepto *punto (solsticio, equinoccio, vertical)* y puesto que todos son de cantidad par, *equidistancia* significa que los dos puntos del par se encuentran a la misma distancia del observador. Con *equidistancia* en una *esfera* y en un *círculo* me refiero a la equidistancia de los puntos de la superficie esférica y de los puntos de la circunferencia, respectivamente. Ahora, y por las consideraciones históricas realizadas en los Capítulos 1 a 3, la equidistancia como fenómeno es común a todos los conceptos en todas las estructuras conceptuales (dado que todos postulan que, en caso de haber diferencias, son despreciables); por lo que los atributos que deseo incluir aquí no son *sí* y *no*, sino si esa equidistancia (que doy por aceptada por todos) es *necesaria* o *contingente*. Esto es, si la equidistancia percibida depende de la posición en la que se encuentra el observador o si es independiente de ella.

6.6) Construcción del *dynamic frame*

Hechas tales consideraciones, en los *sentidos ptolemaico, copernicano y galileano*, el concepto *horizonte* activa los valores establecidos en la Tabla 6.1 (indicados para cada pensador en su respectiva columna con una cruz). En los tres casos, el *horizonte* es un *círculo*, dado que para los tres se trata de una proyección la visual de un observador (por lo que toma la forma de un plano perpendicular a él) sobre una esfera que lo contiene; y de la intersección de un plano con una esfera, la figura formada es necesariamente un círculo. También para los tres su movimiento respecto del observador es *nulo* (cuando el observador se mueve, el horizonte se mueve con él). También en los tres la *cantidad* es *infinita*, aunque quizá Ptolomeo y Copérnico lo crean de este modo porque hay tantos horizontes como puntos en la Tierra, y Galileo porque los hay tantos como puntos en el universo. Ahora bien, mientras que para

Ptolomeo y Copérnico la *distancia* es *determinada* y la *equidistancia* es *contingente*, para Galileo es *indeterminada* la primera y *necesaria* la segunda.

Atributo	Valor	Sentido Ptolemaico	Sentido Copernicano	Sentido Galileano
Forma	Esfera			
	Círculo	X	X	X
	Punto			
Distancia	Determinada	X	X	
	Indeterminada			X
Cantidad	Finita			
	Infinita	X	X	X
Movimiento	Nulo	X	X	X
	Real			
	Aparente			
Equidistancia	Contingente	X	X	
	Necesaria			X

Tabla 6.1: concepto *horizonte* comparado.

Esto se debe a que el horizonte remite al límite de la esfera de las estrellas, cuya representación es la presentada en la Tabla 6.2:

Atributo	Valor	Sentido Ptolemaico	Sentido Copernicano	Sentido Galileano
Forma	Esfera	X	X	X
	Círculo			
	Punto			
Distancia	Determinada	X	X	
	Indeterminada			X
Cantidad	Finita	X	X	
	Infinita			X
Movimiento	Nulo			
	Real	X		
	Aparente		X	X
Equidistancia	Contingente	X	X	
	Necesaria			X

Tabla 6.2: concepto *esfera celeste* comparado.

Si bien para los tres se trata de una *esfera*, para Ptolomeo su movimiento es *real* mientras que para Copérnico y Galileo se mueve solo porque el

observador se mueve dado que la Tierra, en la que se encuentra situado, rota. Por otra parte, para Ptolomeo y Copérnico se trata de una única *esfera* real por lo que su cantidad es *finita*; y para Galileo se trata de una *esfera* para cada observador posible, por lo que su *cantidad* es *infinita*. Para los primeros el hecho de que parezca *equidistante* es *contingente* por cuanto depende de la posición que tiene el observador en el cosmos, que geométricamente podría ser la que tiene (que es en el centro o relativamente cerca de él) pero también podría ser más cerca del borde, caso en que vería algo distinto y se percibiría unos puntos de la esfera (algunas estrellas) más cerca que otros. Por el contrario, para Galileo, puesto que la esfera es una proyección que tiene centro necesario en el observador, su equidistancia respecto de él es *necesaria*. Por lo anterior, para Ptolomeo y Copérnico, la distancia es *determinada* dado que cada uno requiere de determinada distancia mínima a la esfera para que las distancias que postulan respecto del centro de la octava esfera (radio terrestre, y radio del orbe terrestre, respectivamente) sean despreciables. Para Galileo, por el contrario, esa distancia es indeterminada, puesto que su radio puede tener cualquier medida.

Se puede advertir, entonces, la co-depedencia del concepto *horizonte* respecto del de *esfera*. Para Galileo, la *distancia* al *horizonte* es indeterminada porque la de la *esfera* también lo es. Y lo mismo respecto de la *necesidad* de la equidistancia. De los atributos que asume el *horizonte* se siguen también, en lo relativo a su *movimiento*, *cantidad*, *distancia*, *equidistancia*, los que asumen los otros conceptos que se encuentran fijados al observador, *meridiano* y *vertical* (cada uno con su respectiva *forma*). Esto se puede observar en la Tabla 6.3, en la que son elocuentes las continuidades y rupturas entre Ptolomeo, Copérnico y Galileo. Mientras que los tres comparten *forma*, *cantidad* y *movimiento* para cada concepto, Ptolomeo y Copérnico comparten los valores en los otros atributos y se diferencian, conjuntamente, de Galileo.

Atributo	Valor	Horizonte			Meridiano			Vertical		
		P	C	G	P	C	G	P	C	G
Forma	Esfera									
	Círculo	X	X	X	X	X	X			
	Punto							X	X	X
Distancia	Determinada	X	X		X	X		X	X	
	Indeterminada			X			X			X
Cantidad	Finita									
	Infinita	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Movimiento	Nulo	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Real									
	Aparente									
Equidistancia	Contingente	X	X		X	X		X	X	
	Necesaria			X			X			X

Tabla 6.3: conceptos *horizonte*, *meridiano* y *vertical* comparados.

De los atributos que asume la *esfera* se siguen también, en lo relativo a su *movimiento*, *cantidad*, *distancia*, *equidistancia*, los que asumen los otros conceptos que se encuentran fijados a ella: *ecuador*, *eclíptica*, *coluros*, *solsticios* y *equinoccios*. Esto se puede apreciar en la Tabla 6.4.

Atributo	Valor	Esfera			Ecuador			Polo			Eclíptica			Coluro			Equinoccio			Solsticio		
		P	C	G	P	C	G	P	C	G	P	C	G	P	C	G	P	C	G	P	C	G
Forma	Esfera	X	X	X																		
	Círculo				X	X	X				X	X	X	X	X	X						
	Punto							X	X	X							X	X	X	X	X	X
Distancia	Determinada	X	X		X	X		X	X		X	X		X	X		X	X		X	X	
	Indeterminada			X			X			X			X			X			X			X
Cantidad	Finita	X	X		X	X		X	X		X	X		X	X		X	X		X	X	
	Infinita			X			X			X			X			X			X			X
Movimiento	Nulo																					
	Real	X			X						X			X			X			X		
	Aparente		X	X		X	X	X	X	X		X	X		X	X		X	X		X	X
Equidistancia	Contingente	X	X		X	X		X	X		X	X		X	X		X	X		X	X	
	Necesaria			X			X			X			X			X			X			X

Tabla 6.4: conceptos *esfera*, *ecuador*, *polo*, *eclíptica*, *coluro*, *equinoccio* y *solsticio* comparados.

En estos otros conceptos, se puede identificar adecuadamente el grado de quiebre de Copérnico con la tradición. Mientras que en *forma*, *distancia*,

cantidad y equidistancia, cada concepto activa los mismos valores que para Ptolomeo, en *movimiento* no. Es allí donde se exhibe la continuidad entre Copérnico y Galileo. De hecho, todos estos conceptos (excepto el de *esfera*) son los que, como adelanté, carecerían de sentido para un observador en reposo respecto del espacio absoluto. Para un observador, por ejemplo, en el Sol, tales conceptos no darían cuenta de nada observable en el cielo. Por otra parte, y respecto de la distinción entre valores *finito* e *infinito* que puede notarse entre Copérnico y Galileo conviene aclarar lo siguiente. La cantidad *infinita* en la concepción galileana responde exclusivamente al hecho de que existen *infinitas esferas*, y en cada una de ellas se proyectan tales puntos y círculos. Pero esto no debe confundirse con los aspectos cinemáticos que Galileo reconoce en el universo, que son los mismos que los de Copérnico; esto es, del movimiento de los cuerpos tal como es, se sigue que la Tierra tiene *dos* polos de rotación y que los equinoccios tienen lugar *dos* veces al año, y así con los demás. Con lo que si esta fuera una representación de esa clase de conceptos, tales cantidades no serían infinitas. Lo son porque estos *DF* representan el concepto *objeto geométrico-celeste observable* para un astrónomo que habita la Tierra.

Hecho lo anterior, se pueden disponer los *DF* en el formato que usualmente utilizan los exponentes de la *historia cognitiva*. En las Figuras 6.5, 6.6 y 6.7 se presentan los *DF* de *objeto geométrico-celeste observable* para Ptolomeo, Copérnico y Galileo, respectivamente.

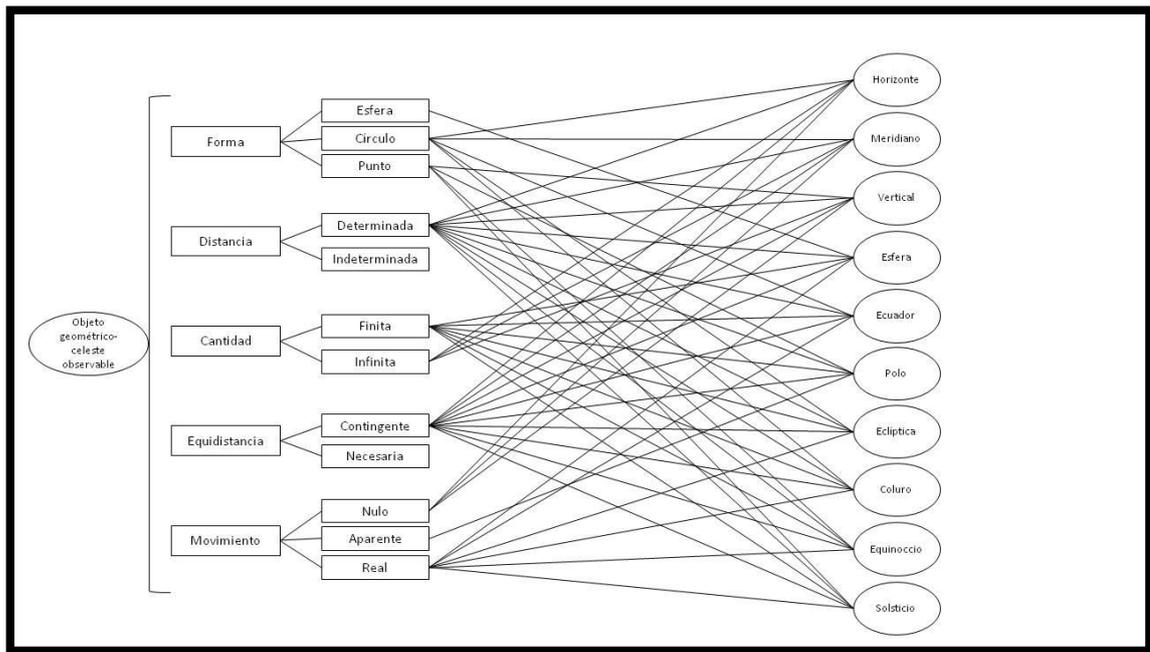


Figura 6.5: propuesta de *DF* para *objeto geométrico-celeste observable* (Ptolomeo).

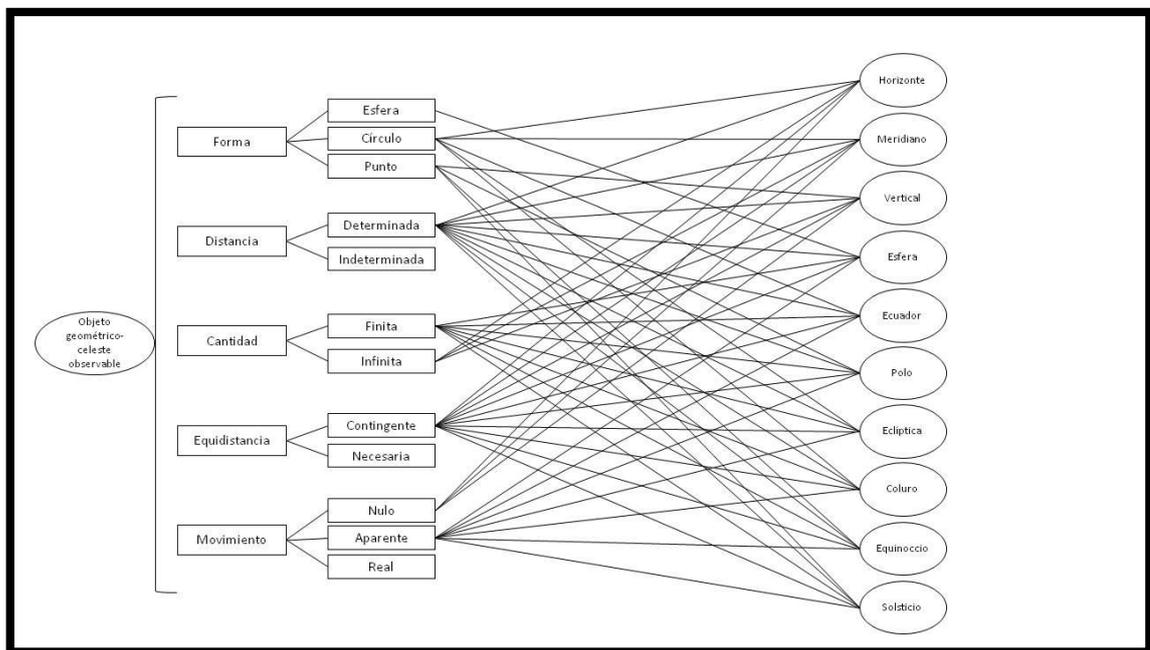


Figura 6.6: propuesta de *DF* para *objeto geométrico-celeste observable* (Copérnico).

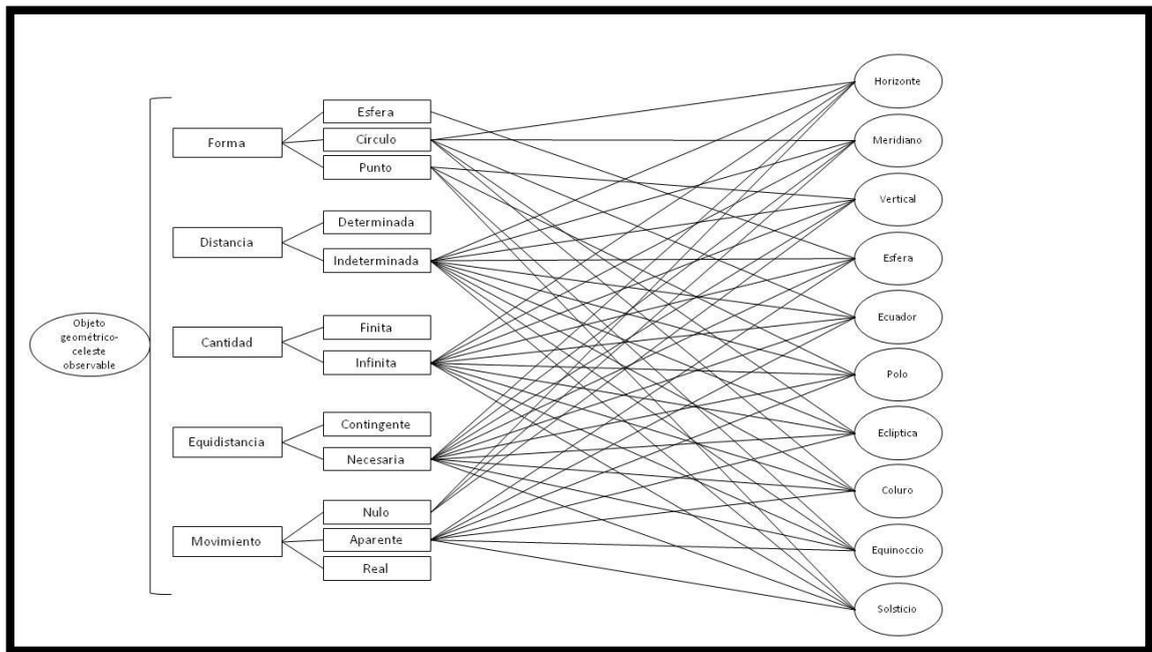


Figura 6.7: propuesta de DF para objeto geométrico-celeste observable (Galileo).

Estos *DF* expresan adecuadamente algunos aspectos sostenidos a propósito de las Tesis I a V, y fueron los que propiciaron un cambio en el propio carácter de la observación. Más allá de que, en cierta medida, la percepción fuera la misma, el hecho de que la experiencia observacional fuera ordenada de acuerdo con los conceptos tal como quedó expresado en cada caso, permite comprender la forma en la que cada uno enfrentó la *experiencia de la bisección*.

Para Ptolomeo, de la bisección se seguía que la Tierra debía estar en el centro de la esfera de las estrellas; ello, por cuanto la *equidistancia* era contingente. De igual modo, para Copérnico, que buscó resolver el conflicto entre la *necesidad* de la *centralidad* (dada la *contingencia* de la *equidistancia*) y la necesidad de una Tierra dada su teoría no geostática mediante una *hipótesis ad hoc*, que hiciera que sensiblemente fuera equidistante aunque realmente no fuera así (explotando el hecho de que Ptolomeo había tenido que aceptar tal despreciabilidad para el radio terrestre). Para Galileo, por el contrario, la *necesidad* de la equidistancia volvía *contingente* la centralidad: la Tierra podía estar en el centro del universo o no estarlo dado que siempre la

esfera tendría centro en el observador y el *horizonte* bisecaría *necesariamente* a la esfera y a los círculos máximos.

6.7) Consideraciones en torno al éxito descriptivo

Con lo expuesto hasta aquí, considero acreditado el éxito descriptivo de la técnica de representación mediante *DF*. Aunque quiero dejar asentadas algunas consideraciones al respecto. El éxito descriptivo de esta técnica es un éxito exclusivamente subordinado a los intereses de la representación que el *historiador* desee realizar. En este caso, propuse una variedad de valores y atributos que *permiten* dar cuenta adecuada de los cambios y continuidades en los conceptos estudiados tal como fueron advertidos en el marco de la investigación. Pero no se puede aspirar a que tal representación sea una descripción acabada del sentido que asumían los conceptos para los científicos de las épocas estudiadas. Innumerables valores y atributos no fueron incluidos, y la imagen del cambio conceptual podría ser bien distinta. Aunque es indemostrable, creería que cualquiera de los pensadores estudiados hubiera diagramado de manera muy distinta sus conceptos si se les hubiera explicado cómo hacerlo de acuerdo con esta técnica. Mi sospecha se funda en que muchos de los atributos o valores tienen utilidad para quienes conocemos su proyección histórica y la reconstruimos a partir de ellos.

El procedimiento de elección de los conceptos, sus atributos y sus valores puede albergar un mayor o un menor grado de representatividad respecto de la estructura conceptual de una determinada teoría. Por ejemplo, y tal como señalé, creo que una representación que considere a los conceptos que yo incluí será, indudablemente, más completa y acabada que una que no los incluya. Pero esto no quita que cualquier representación comporte cierto grado de arbitrariedad. Un ejemplo muy claro a partir de la construcción hecha aquí es el siguiente: el único concepto que tiene activado el valor *aparente* para el atributo *movimiento* en Ptolomeo es *polo*; esto es así por cuanto los polos no tienen movimiento respecto del observador terrestre (despreciado, como adelanté, el movimiento de precesión) a menos que el

observador se desplace en el espacio absoluto. Pero tal rasgo que parece igualar a Ptolomeo y a Copérnico, es solo producto de las limitaciones de los valores y atributos escogidos. Porque es claro que para Ptolomeo, el *reposo* de los polos es tan absoluto como el *movimiento* del ecuador, la eclíptica, etc.

Representarlo del modo en que hubiera sido adecuado para Ptolomeo, hubiera colisionado con el interés que perseguí yo al utilizar los *DF*. Considero que esto no constituye un problema en sí mismo desde el punto de vista descriptivo, entendiendo que una descripción siempre implica un recorte y hace que imperen ciertas necesidades propias de quien realiza la descripción.

6.8) La aspiración explicativa de los *DF*

Ahora bien, de acuerdo con los exponentes de la *historia cognitiva*, la representación de los conceptos mediante *DF* tendría una utilidad no solo descriptiva del cambio conceptual, sino también explicativa. Según ellos, los patrones de acuerdo con los cuales se desarrolló la ciencia a lo largo de la historia no podrían seguirse de aspectos históricos generales puesto que las dimensiones institucionales, culturales, educacionales, de clase social o de formación de los científicos fueron demasiado variadas a lo largo de la historia (Andersen, Barker, y Chen 2006, 66). En cambio, las estructuras cognitivas (demostradas, según ellos, universales por la psicología y la ciencia cognitiva) permitirían comprender la alternancia entre momentos de *ciencia normal* y *revolucionaria* como manifestación de la posibilidad o imposibilidad de que la investigación sea conducida por la estructura conceptual existente.

Lo anterior ocurriría porque las estructuras conceptuales funcionan de acuerdo con tres principios (íntimamente vinculados): no superposición, exhaustión e inclusión. El principio de no superposición indica que la división de un mismo nivel de una clasificación jerárquica es excluyente; no puede un objeto clasificado por un concepto (por ejemplo, *cuerpo* en la concepción aristotélico-ptolemaica) ser al mismo tiempo clasificado por dos conceptos subordinados a él (por caso, ser *sublunar* y *supralunar* al mismo tiempo). El

principio de exhaustión supone que la división de un concepto superordinado no puede dejar espacios residuales; en el ejemplo anterior, si *sublunar* y *supralunar* son los únicos dos conceptos subordinados a *cuerpo*, no puede haber ningún objeto que sea un *cuerpo* y que no sea ni *sublunar* ni *supralunar*. El principio de inclusión establece que todas las instancias de un concepto subordinado lo son también de uno superordinado o, lo que es lo mismo, que todas las propiedades que posea un concepto superordinado deben ser cumplidas por un objeto referido por un concepto subordinado; por ejemplo, si los *cuerpos* tienen determinada propiedad, no puede haber un concepto que siendo una instanciación de *supralunar* (por ejemplo, *planeta*) no cumpla con las propiedades de *cuerpo* ni un objeto (por ejemplo *Marte*) que siendo *planeta* no cumpla con las propiedades de *supralunar* o *cuerpo*³⁵. En la medida en que estos principios sean respetados, la estructura conceptual se mantiene estable; de lo contrario, ocurre un cambio que, según el caso, podría llegar a ser revolucionario. Según esta perspectiva, entonces, el cambio tendría lugar cuando un *objeto* (o alguna idea previa de él) viola alguno de estos principios en una estructura conceptual vigente (Andersen, Barker, y Chen 2006, 67-70).

6.9) Consideraciones sobre el éxito explicativo

Uno de los motivos por los que considero difícil aceptar que en la representación mediante *DF* pueda hallarse la clave explicativa del cambio, reside en la consideración hecha a propósito del éxito descriptivo. Si los valores y atributos, así como los límites del recorte implícito en cualquier *DF* parcial son escogidos *ex post* por el historiador en función de las necesidades descriptivas (aspecto que considero inevitable), entonces difícilmente pueda ser la violación de principios de esa estructura conceptual reconstruida la que explique el cambio.

³⁵ Estos tres principios son, en realidad, tres condiciones necesarias para cualquier taxonomía jerárquica. Una formulación completa de las condiciones formales de una taxonomía de este tipo se puede encontrar en Mosterín (2000), cuyo tercer capítulo lleva por nombre "Taxonomía formal".

Pero aun si esa descripción pudiera ser fiel a la forma en la que los conceptos se encuentran efectivamente organizados en la mente de los individuos históricos que protagonizaron el cambio, considero que se omite un aspecto central de cómo operan los conceptos en la observación. La representación mediante *DF* no es satisfactoria desde un punto de vista explicativo para el caso estudiado por un elemento que está íntimamente vinculado con algo enunciado en la Tesis V: el cambio en el concepto *horizonte* no procede de un cambio *en* lo observado, sino que propició un cambio en la observación; más que captar aspectos de una realidad externa, constituyó la premisa para esa captación. Esto, que se apoya en lo acreditado en los capítulos precedentes, se encuentra justificado en la existencia de dos soluciones distintas al argumento de la *bisección* proporcionadas en el marco de una misma teoría heliocéntrica sobre el movimiento de los cuerpos celestes.

Acredité, tanto en el Capítulo 2 como en el 5, que la teoría de Copérnico no requería *per se* del cambio en los conceptos estudiados, puesto que ofrecía una solución en el marco de su teoría al argumento de la bisección mediante una hipótesis *ad hoc*. De modo que no puede señalarse que sea exclusivamente el cambio teórico el motivo del cambio conceptual.

Adicionalmente, tampoco parecen haber sido las nuevas observaciones ocurridas entre 1543 y 1624 la clave para el paso hacia este cambio conceptual. Las observaciones con el telescopio, tal como señalé en el Capítulo 4, más que instigar el cambio conceptual proporcionaron evidencia que confirmaba la hipótesis *ad hoc* copernicana. Básicamente, i) permitían sustentar lo afirmado en el primer postulado del *Commentariolus* (visto en el Capítulo 2) a partir de las lunas de Júpiter, ii) volvían plausible la hipótesis *ad hoc* de Copérnico contra el embate de Tycho al mostrar que el tamaño angular de las estrellas era mucho menor del que se podía suponer a ojo desnudo (visto en el Capítulo 3) y iii) permitían pensar que el cielo no era perfecto a partir de la observación de imperfecciones en la superficie de la Luna (a lo que me referiré en el Capítulo 9); nada de esto, en sí, demandaba un cambio en la

teoría astronómica en lo relativo al movimiento de los cuerpos o al tamaño o la realidad de la esfera celeste. Por otra parte, la observación de los cometas y novas posiblemente sí contribuyó a horadar la imagen del cosmos constituida de esferas cristalinas concéntricas, tal como consideré a propósito de la disolución de los orbes celestes en el Capítulo 3. Pero, por una parte, esto no era condición suficiente para la disolución de *la* esfera celeste y, por otra parte —y mucho más importante—, la disolución de la esfera celeste no era condición necesaria para el paso dado por Galileo.

El paso dado por Galileo fue hacia la concepción de un horizonte como un círculo necesariamente máximo en una esfera, considerada como proyección. Concebir a la esfera como proyección no supone la disolución de una última esfera. Tal como quedaba perfectamente acreditado en la carta de Galileo a Ingoli que fue utilizada como fuente en el Capítulo 3, no requiere nada ni en cuanto a su forma ni en cuanto a su tamaño. Sobre tales cosas se declaraba ignorante Galileo en la misma carta, lo que no le impedía pensar que la esfera se comportara como una proyección, teniendo el universo la forma y el tamaño que tuviera.

El cambio de Galileo no podría explicarse entonces ni por un conjunto de nuevas observaciones celestes puntuales ni por el hecho de que un cambio teórico colisionara con un acervo de observaciones preexistentes. Esto constituye un fuerte golpe a la concepción de acuerdo con la cual el *cambio conceptual* sobreviene principalmente a partir de que un *objeto* pone en crisis la estructura conceptual vigente por no entrar en las clases de objetos existentes, tal como sostienen los exponentes de la *historia cognitiva*.

Y aun si se pudiera dar cuenta de la razón de la existencia de un cambio, no daría de la dirección en la que dicho cambio tuvo lugar. Así, si esta técnica pudiera dar cuenta del motivo del cambio a partir de un *problema*, no necesariamente daría cuenta de la *solución* hallada a ese problema.

En el capítulo anterior señalé que un aspecto central en la nueva solución hallada al problema del horizonte por parte de Galileo dependía de lo que

Feyerabend denomina un cambio en la *interpretación natural*. Guiado por tal consideración, en los próximos capítulos trascenderé los límites del *contexto de justificación* (Reichenbach 1938) y ponderaré elementos sociales o culturales que pueden haber influido en dicho cambio, tal como enuncié en las Tesis VII y VIII. Esto indicará los límites a la aspiración explicativa de la representación mediante *DF*, y justificará la Tesis IX.

CAPÍTULO

7

HORIZONTES EN LA EXPLORACIÓN ULTRAMARINA

En este capítulo consideraré la forma en la que la expansión ultramarina requirió, por vía de la cosmografía, del desarrollo de una astronomía con una precisión hasta ese entonces sin precedentes. Sugeriré, por tanto, que puede ser señalada como instigadora de los cambios teórico-disciplinares estudiados en el Capítulo 4. Adicionalmente, señalaré que el cuestionamiento de ciertas premisas de acuerdo con las cuales se concebía y representaba la Tierra en la cosmografía previa a la expansión ultramarina implicó una nueva concepción de la relación apariencia-realidad espacial que contribuyó a la configuración de los cambios conceptuales subyacentes al cambio en la *interpretación natural* identificada en el Capítulo 5. Concluiré, por tanto, que la expansión ultramarina fue no solo un proceso contemporáneo de los cambios señalados en los capítulos anteriores sino que influyó en la forma en la que éstos tuvieron lugar, lo que da sustento a la Tesis VII a IX.



7.1) La cosmografía y sus vínculos con la astronomía

En el siglo XVI, la corona española impulsó el desarrollo de la cosmografía con el objetivo de conocer y dominar los territorios americanos. Ese impulso devino en un crecimiento sin precedentes de la disciplina que, a la vez que aportaba elementos para la modificación de la concepción del mundo, mutaba en sus rasgos distintivos.

La cosmografía se había recuperado a lo largo del siglo XV producto del redescubrimiento y traducción de la obra cartográfica de Ptolomeo (la *Geographia*) que establecía un conjunto de elementos geométrico-matemáticos como medio para el conocimiento y la representación de los espacios geográficos, de los que luego se describían sus aspectos naturales e históricos. Así, las obras cosmográficas se componían casi en proporciones iguales de información gráfica-cuantitativa y textual-cualitativa, y sus autores eran generalmente eruditos con igual conocimiento de lenguas clásicas y de matemática (Vogel 2006).

Muchas veces se considera a la disciplina cosmográfica desde las persistencias disciplinares actuales (como la geografía o la cartografía). No obstante, si bien es cierto que pueden apreciarse ya a comienzos del siglo XVI esfuerzos en el sentido de diferenciar las disciplinas intervinientes en la labor cosmográfica³⁶, parece conveniente para el período tratarla como un todo advirtiendo que muchas veces los términos “geographia” y “cosmographia” eran utilizados sin distinción.

A lo largo del siglo XVI, y como producto del proceso expansivo iniciado el siglo anterior principalmente por España y Portugal, la cosmografía pasó a

³⁶ Es el caso, por ejemplo, del alemán Petrus Apianus (1501-1552), quien establecía una diferencia entre *Cosmographia*, la *geographia* y la *chorographia*. En su *Cosmographicus Liber* (1524), señala que la *Cosmographia* refiere al sistema de esferas celestes y a la proyección del estrellado cielo en la superficie terrestre con el propósito de delinear la Tierra con las coordenadas celestes. La *geographia*, describe al *globus terraqueus* en lo referido a sus características generales como montañas, mares y ríos. La *Chorographia* (o *topographia*) detalla los sitios individuales como ciudades, aldeas y puertos.

encontrarse en el centro de la escena intelectual, siendo su principal desafío la conjugación de los elementos especulativos con aquellos provenientes de las nuevas observaciones en el marco del *descubrimiento*. En ese contexto, devino una práctica que privilegió el estudio de las dimensiones cuantificables y entre sus autores se incorporaron cada vez más hombres con una formación, primero, práctica (en navegación o comercio) y, luego, teórica (matemática) mayormente universitaria y académica³⁷.

Toda la indagación cosmográfica había operado hasta el siglo XV bajo el supuesto de que lo descrito (el *oikouménē*, constituido por Europa, y partes de Asia y de África) se encontraba en el centro del *mundo* y quedaba configurado porque una porción de la esfera de tierra sobresalía de la esfera de agua que la contenía (Vogel 2006). La expansión transoceánica iniciada en ese siglo conmovió convicciones muy profundas vinculadas a esa concepción al punto que, hacia mediados del XVI, no había persona culta que ignorara las noticias sobre la navegabilidad y habitabilidad de las regiones remotas de la Tierra. Ideas como la ausencia de tierras en las antípodas, la no navegabilidad de los océanos occidentales más allá de cierto límite o que la Tierra poseía un tamaño que imposibilitaba un viaje por el oeste hacia oriente (manifestadas, por ejemplo, en el dictamen de la comisión encabezada por Hernando de Talavera a propósito de la propuesta de viaje de Colón), fueron categóricamente desechadas a partir de los datos procedentes de la exploración ultramarina.

En lo relativo al orden de las esferas celestes y su movimiento, la cosmografía del período no reflejó inmediatamente los cambios teóricos que

³⁷ Este proceso continuó con la sucesiva y cada vez mayor separación de la astronomía y la geografía, y una progresiva subdivisión de esta en distintas ramas, como la cartografía, la hidrografía, la navegación y la exploración. Tales distinciones culminaron hacia el siglo XVII, de decadencia relativa en comparación con el auge del siglo XVI. En cualquier caso, tanto respecto de las características de las distintas labores comprometidas en la cosmografía como respecto de las periodizaciones señaladas, conviene tener presente que existen especificidades en cada región de Europa (al respecto, véase Nunn 1932; Vogel 2006; C. R. Johnson 2006).

se estaban insinuando dentro del ámbito astronómico desde la obra copernicana; al menos no de manera directa³⁸. Posiblemente, y dados los fines de los trabajos en cosmografía, ello no era ni necesario ni ventajoso. Se puede constatar cómo en obras cosmográficas desarrolladas a principios del siglo XVII, las esferas celestes seguían siendo representadas tal como las concebía el viejo esquema ptolemaico sin que ello constituyera un obstáculo a las aseveraciones sobre la existencia de un cuarta parte del mundo y a la habitabilidad de las antípodas, perfectamente conocidas. Tal es el caso del *Regimiento de Navegación* de García de Céspedes (de 1606), en el que se puede observar cómo el esquema de las esferas concéntricas con centro en la Tierra continuaba vigente:

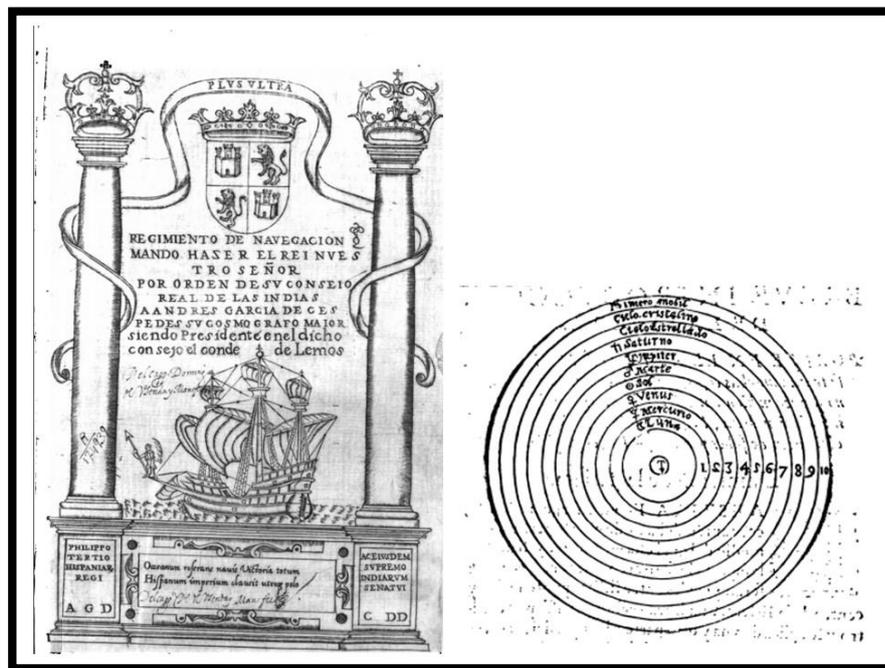


Figura 7.1: frontispicio e imagen interior del *Regimiento* de G. de Céspedes (1606).

³⁸ Existen algunos mapas del siglo XVI y principios del XVII en los que se sugiere el movimiento de rotación terrestre. Un caso notable es el del mapa de Gryneaus, *Typus Cosmographicus Universallis* (BL 985.h.17), publicado por primera vez en 1532 (esto es, once años antes de la publicación del *De Revolutionibus*) en el que se puede observar cómo dos querubines, uno en cada polo terrestre, accionan una manivela que harían rotar a la Tierra. En cualquier caso, el hecho de que algunos mapas dieran cuenta de esta posibilidad no quita que, en general, las obras cosmográficas continuaran siendo concebidas a partir de la suposición de un sistema geocéntrico y geostático.

Más elocuente aún es el caso del ya referido escrito de Galileo, *Trattato della Sfera ovvero Cosmografia* (Galilei 1891), que si bien no es un típico tratado cosmográfico de la época, daba continuidad a cierta tradición de presentar a los tratados astronómicos con utilidad para la navegación y la cartografía como *cosmográficos*³⁹. La fecha de escritura de este tratado es discutida, pero sin dudas es anterior al año 1605 dado que se conservan copias realizadas ese año. Puesto que se trata de un escrito realizado de acuerdo con preceptos ptolemaicos, Favaro (Galilei 1891) estableció como fecha del tratado el año en el que Galileo adoptó las ideas copernicanas: 1597. Otros, como Martins y Cardoso (2008), creen que eso no es necesario puesto que podría tratarse de un escrito de Galileo con fines didácticos y, por tanto, estar escrito de acuerdo con la teoría más aceptada en aquel entonces. Sea uno u otro el caso, la existencia de esta obra permite respaldar aún mejor el hecho de que las obras orientadas hacia un conocimiento cosmográfico no estaban dando cuenta de los incipientes cambios acaecidos en el ámbito astronómico.

No obstante, sí pueden detectarse claras influencias en una dirección contraria. Aquí sostendré que existen al menos dos tipos de influencia que la expansión ultramarina y el desarrollo cosmográfico ejercieron sobre la astronomía. Por una parte, señalaré que la labor cosmográfica demandó de la astronomía un desarrollo tal que permitiera su uso para las finalidades prácticas en la elaboración de mapas, instándola, entre otras cosas, a la nueva articulación con la óptica (tratada en el Capítulo 4). Por otra, indicaré que el conocimiento recabado por la cosmografía pudo favorecer el cambio conceptual necesario para la *solución galileana* sintetizado en el Capítulo 5. Para poder mostrarlo será necesario considerar con cierto detenimiento el

³⁹ Como señalan Andrade Martins y Cardoso (2008), el tratado es un comentario elaborado del *Tractatus De Sphaera* de Sacrobosco completado a partir de otras fuentes, e incluye el término Cosmografía en el mismo sentido que algunos otros lo habían hecho, por ejemplo, Oronce Finé: *De mundi sphaera, sive Cosmographia, libri V* (de 1555). De modo que el tratado no busca dar cuenta de las características de cada parte de la Tierra ni de las novedades producto de la navegación. En tal sentido, podría haber sido escrito, según estos autores, décadas o inclusive un siglo antes.

tipo de problemas que la cosmografía debió afrontar y el tipo de solución que encontró.

7.2) La cosmografía y el cálculo de la longitud

Realizar mapas y calcular las distancias de los dominios en el marco de un imperativo secreto era la tarea primordial desde un punto de vista práctico de gobernabilidad y comercio. Para poder determinar las latitudes y longitudes de los dominios y establecer el tamaño de la Tierra para así calcular las distancias absolutas, era necesario un estudio sistemático de las características del espacio, tanto celeste como terrestre.

Los medios institucionales que sirvieron para el desarrollo de las actividades cosmográficas en el marco de la expansión ultramarina española fueron básicamente dos: la Casa de Contratación de Sevilla y el Consejo de Indias. El propósito de ambas instituciones era esencialmente pragmático, estando orientada la investigación a un mejor conocimiento de los territorios dominados (o a dominar), sea por razones comerciales o por razones jurídico-políticas. La necesidad era contar con una información fehaciente de las características de los territorios y de sus accesos que permitiera un comercio y que diera una idea del orden de magnitud de las necesidades administrativas.

Las ordenanzas de 1571 constituyeron un pilar fundamental en el intento de Felipe II de ordenar el espacio americano en pos de lograr que fuera gobernado convenientemente⁴⁰. Para ello, disponían que el Consejo de Indias debía contar con un conjunto de funcionarios que debía estar conformado, entre otros, por un cosmógrafo cronista, figura que revestía una relevancia equivalente a la de otros funcionarios de jerarquía. La reglamentación general

⁴⁰ Para el seguimiento del texto de las *Ordenanzas* de 1571 se utilizará la Edición Comparada realizada por M. Moranchel Pocaterra (2001; 2002), publicada en los *Cuadernos de Historia del Derecho*. Para la referencia al texto, utilizaré el número de ordenanza (y no su paginación), común a todas las ediciones.

de sus labores se establecía en las ordenanzas 117 a 120. Más afín a la función de cronista eran las labores encomendadas en las ordenanzas 119 y 120, donde se les mandaba hacer, respectivamente, “historia general de las Indias” e “historia de las cosas naturales”. Por su parte, las ordenanzas 117, 118 y 121 establecían quehaceres más propios del cosmógrafo. Mientras la ordenanza 121 establecía la necesidad de recopilar derrotas y navegaciones a partir de informaciones de pilotos y marineros que hubieran viajado desde y hacia las Indias, las ordenanzas 117 y 118 se centraban en el reconocimiento y medición de los territorios; para ello, solicitaban al cosmógrafo que “haga y ordene las tablas de [la] cosmographia de las Indias, assentando en ellas por su longitud, y latitud, y numero de leguas”.

El establecimiento de la latitud no constituye un problema. El movimiento aparente del cielo deja solo dos de sus puntos en reposo respecto de la Tierra: el polo sur celeste y el polo norte celeste. Ambos puntos permiten, para observadores situados en los respectivos hemisferios, establecer de modo muy sencillo la latitud de un observador dado que la altura del polo equivale a la latitud del observador. La longitud, por el contrario, no puede ser despejada de un modo tan sencillo. Esto es así porque el cielo aparente que recorta el horizonte es el mismo para un lugar dado en momento determinado y otro en la misma latitud en otro momento, siempre que las diferencias horarias sean congruentes con las diferencias de longitud⁴¹.

Por ello, si no se conoce la longitud relativa de una determinada posición, no se la puede despejar con la simple observación del cielo. Para poder despejarla, es necesario constituir algún dato que permita sincronizar la información con un punto de origen respecto del cual se quiere medir la longitud, lo que debió hacerse exclusivamente por medios astronómicos hasta

⁴¹ Por ejemplo, si despreciamos la pequeña diferencia de latitud entre Santiago de Chile y Buenos Aires, el cielo que puede verse en Buenos Aires ($58^{\circ} 26' 0$) en un determinado momento es el cielo que podrá verse en Santiago (Longitud $70^{\circ}40' 0$) unos 49 minutos más tarde (equivalente a los $12^{\circ}14'$ de diferencia en su longitud).

el siglo XVIII, cuando se construyó el primer reloj que tras ser sincronizado en un punto de origen pudiera ser transportado en altamar sin perder precisión⁴². En la ordenanza 118 se preveía, entonces, la solución que debía utilizarse:

“el [dicho] cosmographo tenga cargo de calcular y aueriguar los eclyses de la Luna, y otras señales si ouiere para tomar la longitud de las tierras, y embie memoria de los tiempos y horas en que se aya de obseruar en las Indias”.

El uso de los eclipses como medio para el establecimiento de las longitudes no era en absoluto novedoso; estaba estipulado, por ejemplo, en las obras de Claudio Ptolomeo y de Pedro Apiano (1501-1552), y había sido utilizado en la modernidad en otras ocasiones; tampoco era el único método: Alonso de Santa Cruz (1505-1567), en su *Libro de las Longitudes* (de 1555), señalaba doce métodos para su cálculo (Cuesta Domingo 2004). Algunos de los métodos señalados por Alonso de Santa Cruz databan de la Antigüedad, y otros habían sido diseñados por él mismo, como el uso de la cantidad desviación de una aguja magnética respecto del polo geográfico⁴³. El problema

⁴² Hasta el desarrollo por parte de John Harrison del *cronómetro marino* a mediados del siglo XVIII, ningún instrumento para la medición del tiempo podía ser transportado por vía marina sin que perdiera fiabilidad su mecanismo de funcionamiento. Generalmente, los instrumentos de medición estaban basados en el *péndulo*, que no puede ser montado sobre una estructura en movimiento sin dañar su funcionamiento y/o estaban contruidos con materiales que frente a los cambios de temperatura y humedad típicos de los viajes ultramarinos, perdían notablemente la precisión (Barrett 2011). En tiempo de Colón, también eran utilizados relojes de arena, que si bien tenían cierta utilidad para la navegación, de ninguna manera eran fiables para el cálculo de longitudes entre lugares separados por semanas de viaje, en los que una pequeño error en un reloj de 30 minutos (que es lo que solían medir) podía significar un error desmesuradamente grande tras darlo vuelta cientos de veces (Comellas 1992). Sobel (1997) ofrece un interesante relato de las dificultades técnicas que enfrentaron quienes intentaron resolver el problema de la longitud en el período inmediatamente posterior al considerado en este trabajo.

⁴³ Las agujas magnetizadas señalan el polo magnético, que no coincide con el polo geográfico; en las distintas longitudes, por tanto, la desviación del norte señalado por la aguja y el norte señalado por las estrellas es distinto; si se conoce el grado de desviación para cada longitud, entonces con la brújula se puede establecer la longitud del observador; tales desviaciones no estaban establecidas, por lo que el método funcionaba *en principio* pero no era aplicable. Otro tema de interés (pero que no se abordará en este trabajo) en el que según algunos fue relevante la figura de Santa Cruz es el debate sobre la forma en la que debían graficarse en mapas planos las latitudes y las longitudes de modo tal que se deformaran lo menos posible.

era que para algunos de estos métodos eran necesarios o bien instrumentos con precisiones impensables para aquel entonces o bien un caudal de datos no disponible.

Sobre las razones de la preferencia por el uso de los eclipses, no deja dudas el texto que encabeza las *Instrucciones* para la observación de 1577-8 desarrollado por el Cronista-Cosmógrafo Mayor a cargo, Juan López de Velasco, con el que se instrumentaba lo dispuesto en las ordenanzas⁴⁴. Según se puede leer, si bien para el propósito de establecer la longitud “tienen en la Astrología, y Cosmographia propuestos muchos y diferentes medios Mathematicos”⁴⁵, teniendo en cuenta “la falta que en las Indias ha de auer de personas que sepan usar de otros” se opta por los métodos e instrumentos elegidos por ser los “mas fáciles y usuales” (López de Velasco, Juan 1577, 40).

Así, Velasco se mostraba consciente de que los medios adecuados eran los provistos por la *mathematica*, en detrimento de cualquier otro principio de autoridad o conocimiento. Y también se muestra consciente de las limitaciones del personal con el que contaba para realizar las observaciones. Este método

Permanecían por aquel entonces los métodos de Ptolomeo y de Marino de Tiro, de proyección cónica y de proyección cilíndrica; ambos relativamente exitosos para graficar las zonas comprendidas entre los paralelos 30° y 46° N que se graficaron hasta el siglo XV. Alonso de Santa Cruz parece haber estado interesado también en este tema en la antesala del desarrollo de Gerardus Mercator (1512-1594), que con su forma de Proyección *resolvió* el problema (Saralegui y Medina 1914). Esto se vincula con temas de proyección considerados en el Capítulo 9.

⁴⁴ Con *Instrucciones* me refiero a la “Instruccion y advertimientos para la observacion de los eclipses de la luna, y cantidades de las sombras que su Majestad manda hazer, este año, de mil y quinientos y setenta y siete y quinientos y setenta y ocho, en las ciudades y pueblos de las yndias: para verificarla longitud, y altura de ellos que aunq pare el effecto sobredicho tienen la Astrologia y Cosmographia propuestos muchos y differentes medios Mathematicos pero teniendo respecto a la falta que en las Indias ha de auer de personas que sepan usar de otros sean elegido por mas faciles y usuales: los medios que se siguen” (López de Velasco, Juan 1577).

⁴⁵ Mención aparte merecería la discusión sobre los alcances de los términos “astronomía” y “astrología” en el período (al respecto, véase Vernet 2000). Para los fines de este trabajo, alcanza con saber que los medios a los que se refiere son aquellos que hoy se suelen considerar geométrico-astronómicos.

cumplía, entonces, con dos características fundamentales: ser matemático y ser factible.

También contaba con la ventaja de que el instrumento con el que debía realizarse la observación era de muy sencilla fabricación y utilización. Consistía en un plano vertical (que debía ser alineado en el sentido este-oeste, previa utilización de otro método sencillo también explicado en las *Instrucciones*), atravesado por un gnomon perpendicular (que quedaría alineado Norte Sur), con una plomada que indicaría la vertical del lugar, que une el cenit con el nadir, tal como se puede apreciar en la Figura 7.2⁴⁶.

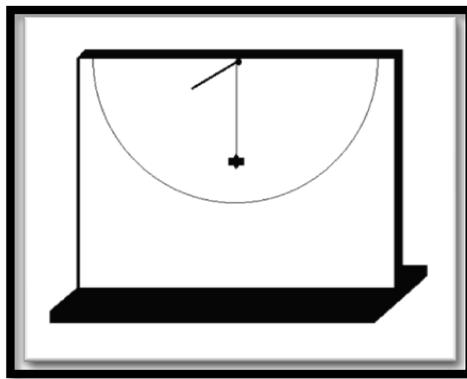


Figura 7.2: instrumento para la anotación de la altura de la luna durante su eclipse.

El instrumento debía ser utilizado por un grupo de personas que en primer lugar debía mirar si la Luna salía perfectamente redonda y, en caso contrario, dejar asentado de qué modo aparecía oscurecida. Establecida su

⁴⁶ La *Instrucción* establece: “En un tablero derecho de una tabla u dos ajuntadas, que sea de largo como una vara de medir, y de ancho como una tercia y quatro o seys de dos mas, se hara un medio circulo en esta forma: pondra se el pie del compas en el medio del largo del uno de los dos mayores lados, un dedo o dos a dentro de la orilla no mas: y con el otro pie abierto de punta a punta una tercia de justa de vara de medir harase medio circulo, o lo que en el tablero cupiere, en el punto, o centro donde se asento el pie del compas que estuvo quedo, pondrase lvantado un estylo delgado de hierra, u otra cosa de hasta una tercia de largo, de recho y anivel, de manera que a ninguna parte le cueste mas que a otra: que si fuere menester para que este derecho, y no se tuerça, aun se podra afijar con algunas risotrillas, o cuerdas que la afirmen, y en el nacimiento del estylo junto a la tabla se colgara con una tazada floxa un ilo delgado con alguna plomadilla al cabo, que salga toda fuera de la circunferencia, o raya redonda, pero que no llegue a ygualar el anchor de la tabla (...)” (López de Velasco, Juan 1577, 41).

redondez en origen, debía permanecer observando hasta ver que comenzara a oscurecerse, lo que explica la necesidad de que fuera un grupo (y no un solo observador), dada la gran incidencia de la dimensión subjetiva en tal ponderación. Y lo que debía realizarse era lo siguiente:

“se haga una señal en la circunferencia del medio círculo del instrumento en la parte y punto por donde la sombra del estylo la cortare, y atravesare en el medio del ancho de la sombra, y despues de passada la duracion de la tiniebla, y observiridad de la luna, que en el eclipse primero deste año de setenta y siete, se escurecera toda, y en el del año de setenta y ocho, la sesta parte o menos, yrase mirando quando la Luna acabare de cobrar toda la luz: y quando ya estuvviere lympia de tinieblas claramente, y buelta en su figura circular, y redonda, hazerse otra señal, o punto en la dicha linea circular, por donde la sombra cortase y si en alguna region, la sombra no llegare al cerco del círculo, hecharse el punto en la parte donde sombra llegare en el medio del fin y estremidad della” (López de Velasco, Juan 1577, 41).

En la Figura 7.3 puede apreciarse un resultado posible para un eclipse registrado con el instrumento con el frente apuntando hacia el norte (de modo que el este quede sobre la izquierda del observador); sobre él debían marcarse las sombras al inicio y la finalización del eclipse.

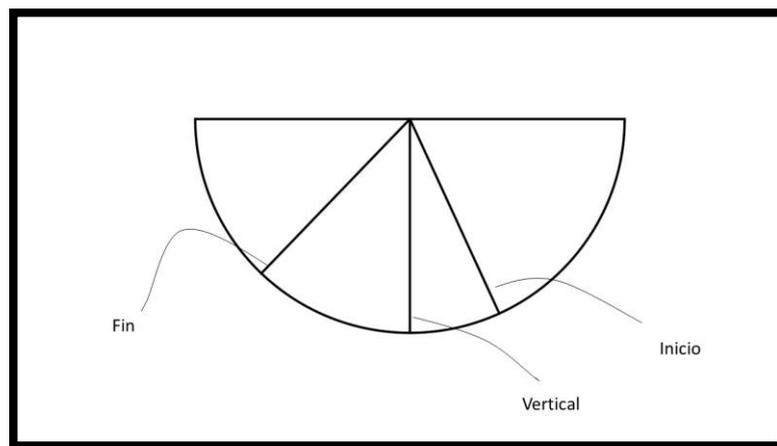


Figura 7.3: posible resultado de la anotación con el Instrumento de Velasco.

Una vez realizadas las marcas sobre el instrumento, se pedía que se duplicara sobre papel o papiro y que se lo enviara al Consejo. Esto es, se pedía

a los observadores que tomaran nota, pero no que calcularan, lo que podía estar relacionado con la desconfianza en la capacidad técnica de los observadores pero también con el hecho de la necesidad de guardar secreto (Portuondo 2009).

Entre 1577 y 1588 se realizaron catorce observaciones desde seis lugares distintos (Madrid y Sevilla en Europa, y San Juan de Ulúa, Panamá, Lima y Ciudad de México en América) con el objetivo de establecer las longitudes de cada lugar. Las seis posiciones son las indicadas con puntos negros en el siguiente planisferio actual:

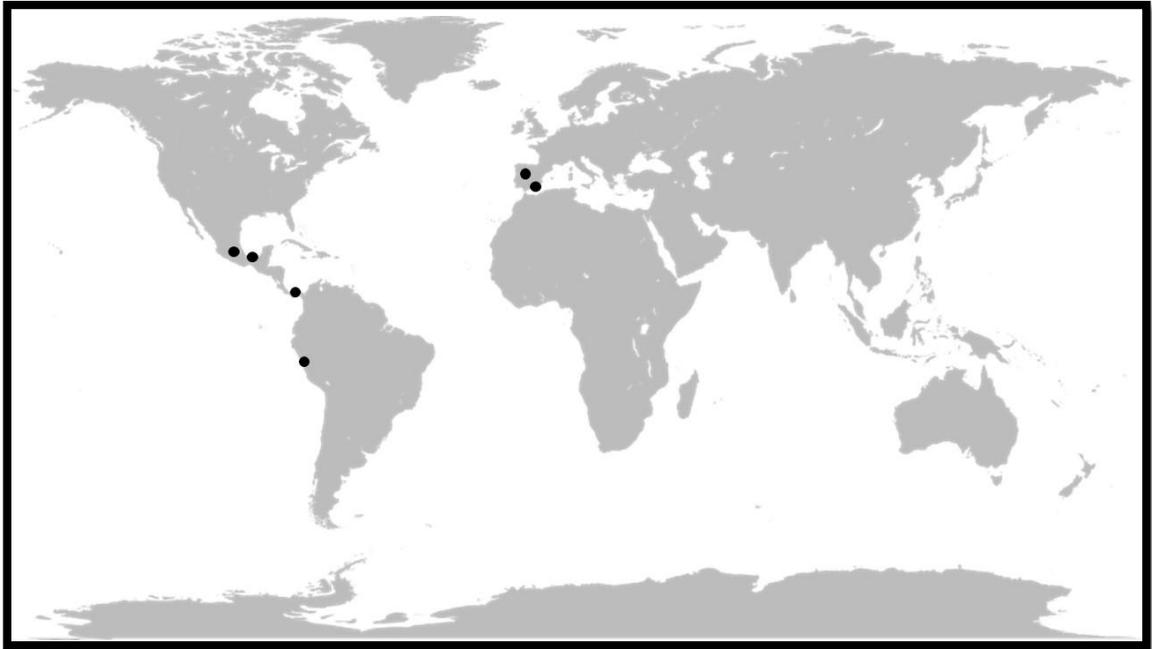


Figura 7.4: seis posiciones de observación de los eclipses de 1577-8.

Las diferencias de longitud entre esas seis posiciones se pueden expresar proyectando la esfera terrestre como un círculo y observándola desde el polo sur (PS), como se puede ver en la Figura 7.5.

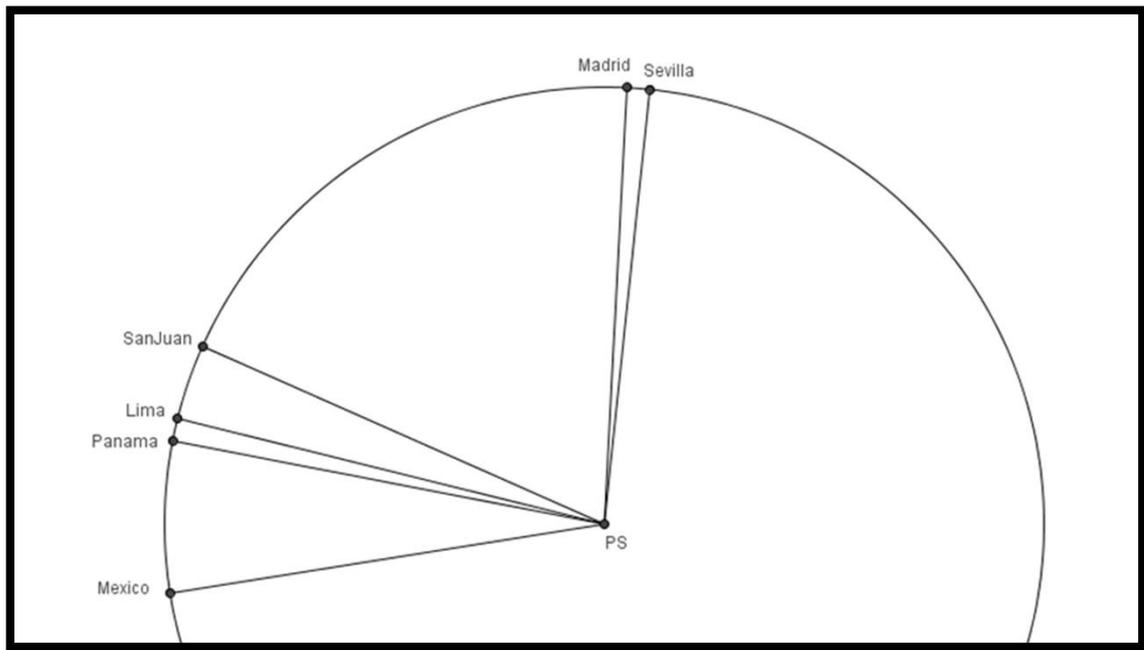


Figura 7.5: diferencias de longitud entre los puntos de observación de los eclipses.

La razón por la cual un eclipse puede ser utilizado como medio para despejar las longitudes es sencilla de comprender. Los eclipses comienzan (y finalizan) en los mismos instantes para todo observador terrestre; pero, por otra parte, la altura sobre el horizonte a la que se encuentra la Luna al momento en el que un eclipse se inicia (o finaliza) es distinta según la longitud del observador. En el ejemplo de la Figura 7.6, dos observadores (O_1 y O_2) ven la Luna (el círculo blanco) en un mismo instante (determinado, por ejemplo, por el inicio de un eclipse); mientras que para uno de ellos (O_1), la Luna se encuentra cerca del cenit, para el otro (O_2) se encuentra cerca del horizonte. Es simple apreciar, que el movimiento este-oeste de tales observadores afectaría directamente la altura que la Luna tendría sobre sus respectivos horizontes en un mismo instante.

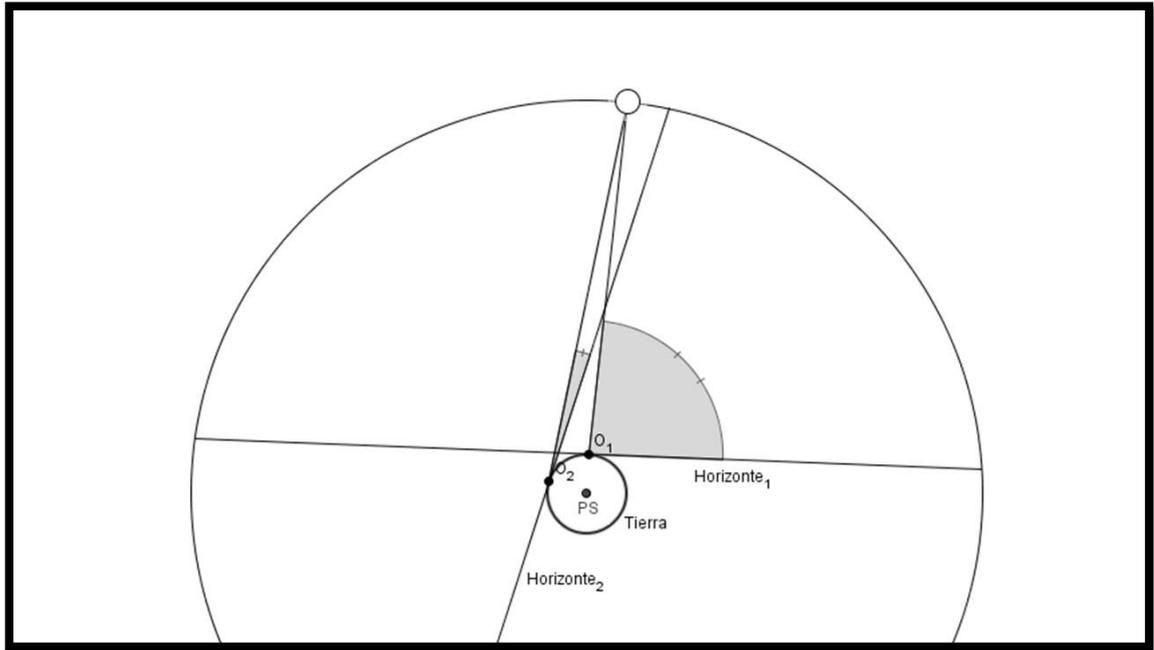


Figura 7.6: Luna a dos alturas distintas para dos observadores en distintas longitudes.

Es esa diferencia de longitud, que se manifiesta en la altura de la Luna sobre el horizonte se manifestaría también en el registro de su sombra en el instrumento. Superponiendo el registro del inicio del eclipse para ambos observadores en un mismo gráfico, se podría observar lo siguiente:

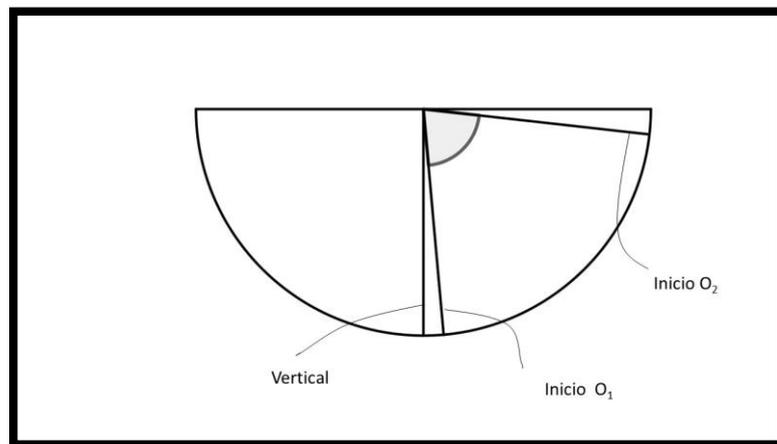


Figura 7.7: marca en el Instrumento del inicio de un eclipse en dos longitudes distintas.

Si se considera a la Tierra como un punto, la diferencia de longitud estaría expresada directamente en el cambio de altura de la Luna. En el ejemplo graficado, el ángulo subtendido entre la línea del inicio para O_1 y la línea del inicio para O_2 sería la diferencia de longitud para ambos observadores. Pero,

dada la razón entre el radio de la Tierra y la distancia Tierra-Luna, no es posible considerar a la Tierra como un punto y es necesario resolver los triángulos que se forman en el centro de la Tierra con el uso de trigonometría.

7.3) Las dificultades técnicas y la importancia de la refracción

El resultado de esta empresa científica de Velasco fue bastante irregular (Portuondo 2009). Por una parte, algunos datos recopilados fueron inconsistentes entre sí: distintos eclipses arrojaron longitudes diferentes para un mismo punto de observación; por otra parte, algunos datos que sí fueron consistentes vistos a la luz de reconstrucciones actuales mediante modelos sumamente precisos exhiben errores de cálculo nada despreciables.

El método de cálculo de longitudes mediante este instrumento/método ofrecía un conjunto de limitaciones. De algunas de ellas, los contemporáneos eran plenamente conscientes: es relativamente difícil establecer con exactitud los *momentos* de inicio y de finalización de un eclipse, tanto por falta de mecanismos precisos como por la intervención de factores subjetivos⁴⁷. Sobre otros se tenía relativo conocimiento, como el problema de la corrección de las observaciones por paralaje diurna, para lo que era necesario tener un modelo de tamaño y de forma de la Tierra. Por último, una limitación que pasaba bastante inadvertida en el marco de las observaciones astronómicas del período y que resultaba de suma importancia para un experimento como éste es la corrección a las observaciones que debiera hacerse como producto del comportamiento de la luz, tema referido en el Capítulo 4.

Si la longitud de una determinada posición terrestre se deduce por vía geométrica del ángulo que tiene la misma señal luminosa en otra posición

⁴⁷ El tema de la subjetividad en el progreso del oscurecimiento de la Luna durante un eclipse fue motivo de estudio hasta entrada del siglo XX. André-Luis Danjon (1890-1967) sugirió en 1920 una escala (conocida como *escala de Danjon*) para establecer valores subjetivos de oscurecimiento de la Luna durante un eclipse observado a ojo desnudo; la utilidad de tal escala fue luego discutida a partir de estudios fotométricos (al respecto, véase Sekiguchi 1980).

terrestre, y resulta que esa señal luminosa se observa a distintas alturas sobre el horizonte en cada una de esas posiciones, entonces, considerando que esa señal tendrá desviaciones por refracción distintas, los cálculos darán necesariamente (excepto compensación) errores. En el ejemplo graficado en la Figura 7.6, mientras que para el observador O_2 la luz de la Luna no sufre desviación por paralaje, para el observador O_1 sí. Sin corrección por paralaje, el error máximo se daría al estar la Luna en el cenit de un observador y en el horizonte de otro.

Dada la enorme relevancia práctica que comenzó a tener este problema por el hecho de que las colonias estuvieran a distancias (absolutas y relativas) solamente calculables por la vía astronómica, difícilmente pueda señalarse que el desarrollo de la óptica astronómica considerado en el Capítulo 4 en el período moderno no estuviera influenciado por ella. El conocimiento de la desviación de la luz, se traducía en ese contexto en condición de posibilidad para realizar mapas precisos que permitieran navegar y dominar las colonias. Esa necesidad está explícitamente vinculada con la astronomía en los documentos referidos y fue parte de una preocupación profunda, y en ese entonces novedosa, por parte de la realeza (Kagan y Schmidt 2007). Aquí sugiero que se encuentra además, implícitamente vinculada con el desarrollo de la óptica astronómica.

Lo anterior podría objetarse en base a la inexistencia de referencias directas de Kepler a las observaciones que se realizaban por aquel entonces en América. Aun así, y dados los circuitos de conocimiento europeo de la época, es dable pensar que Kepler estaba al tanto de las observaciones en América. Por otra parte, y atendiendo a una dimensión biográfico-institucional, conviene recordar que Kepler, desde 1601 (algunos años antes de su *Astronomiae Pars Optica*), ejercía la astronomía al servicio del Emperador Rodolfo II, de la misma casa que Felipe II y Felipe III, a instancias de quienes se realizaron las empresas con interés cosmográfico referidas. Ese mismo Emperador fue a quien Tycho Brahe convenció un mes antes de morir de que financiara el desarrollo de tablas astronómicas concebidas y ejecutadas con

una precisión sin precedentes que varios años más tarde Kepler publicaría bajo el título *Tabulae Rudolphinae* (en 1627).

Vista de este modo, no parece adecuado explicar la mutación disciplinar referida en el Capítulo 4 (que condujo a la integración de la óptica como parte relevante de la astronomía) exclusivamente por un desarrollo interno de cada disciplina. A lo largo de la Antigüedad y la Edad Media, los astrónomos pudieron no prestarle mayor atención al problema de los eclipses *imposibles* (como el referido por Plinio) o de la refracción en el horizonte. Así, la *base empírica* del argumento ptolemaico no encontraba prácticamente desafíos. Pero esto dejó de ser así cuando la precisión comenzó a tener relevancia práctica e implicancias político-económicas.

Dicho lo anterior, es posible entonces señalar que la expansión ultramarina, fue no solo un elemento contextual del cambio astronómico considerado en el Capítulo 4 sino que fue, mucho más aun, un elemento instigador de dicho cambio. El vehículo de dicha instigación fue la cosmografía.

7.4) Consecuencias conceptuales de la revolución cosmográfica

Por otra parte, es posible considerar si acaso la expansión ultramarina no pudo favorecer el cambio conceptual necesario para el desarrollo de la nueva *interpretación natural* indicada en el Capítulo 5. Algunos estudiosos de la historia de la cosmografía señalan, contra las tendencias dominantes en la historiografía de las ciencias (por ejemplo, Koyré 1979), que fue la información provista por la expansión ultramarina lo determinante en la consolidación del heliocentrismo moderno. Por ejemplo Vogel, que insiste en mostrar la asombrosa coincidencia temporal entre el descubrimiento de Vesputio, la *Cosmographiae Introductio* de Mathias Ringmann (c. 1482-1511) y Martin Waldseemüller (c. 1470-1520) y el *De Revolutionibus* (o, inclusive, el *Commentariolus*) de Copérnico. Dice al respecto:

“la evidencia de la esfera terráquea provista por los descubrimientos transoceánicos fue crucial, incluso indispensable, para la innovación cosmológica de Copérnico. Copérnico no sólo estudió los clásicos de la astronomía y observó cuidadosamente los cielos sino también respondió atentamente, competentemente y con creatividad a la revolución cosmográfica” (Vogel 2006, 479).

Con ello, Vogel jerarquiza a lo que denomina *revolución cosmográfica*: el proceso de configuración de la idea del globo terráqueo como una única unidad de tierra y agua sin puntos privilegiados. Si bien el curso del siglo XV las exploraciones marinas habrían podido modificar algunas de las concepciones propias de las cosmografías vigentes, la verdadera revolución habría tenido lugar tras la expansión transoceánica iniciada por Cristóbal Colón (c. 1446-1506). Y el paso central fue probablemente el aporte de Américo Vesputio (1451-1512), quien demostró la existencia de las antípodas como región habitable, con el desenlace ulterior de la circunnavegación de Juan Sebastián Elcano (1476-1526). Esto trajo aparejado un impacto cultural como pocos en la historia de la humanidad, y —en especial— implicaba desafíos a muchas de las ideas científicas vigentes en ese período como el de la gravedad aristotélica (Vogel 2006) ⁴⁸.

En especial, y respecto del problema del horizonte geográfico, el cambio fue dramático. La percepción del espacio con centro en el hombre y la geografía conocidos, se plasmaba previo a la *revolución cosmográfica* en un tipo de mapas a los que se los conoce como mapas “T-O” (en referencia a su forma, que es la de una “T” inscripta en una “O”), como el de la Figura 7.9.

⁴⁸ Un debate vinculado con este y que, en el que no podré detenerme aquí, es el que refiere a si preexistían condiciones mentales para la incorporación de ese conocimiento proveniente de la expansión o no. Dos trabajos ineludibles a este respecto son los de O’Gorman (1958) y Parry (1991).

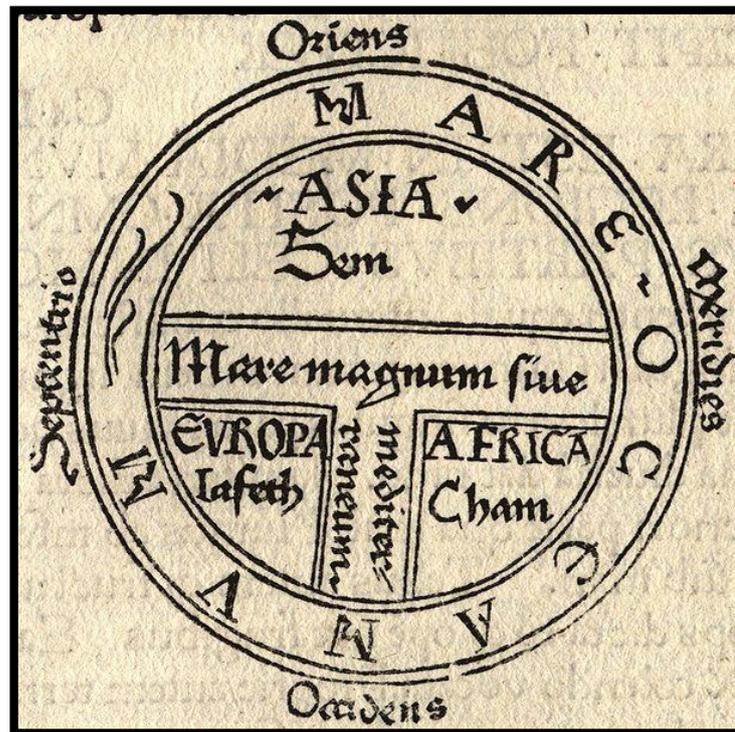


Figura 7.9: mapa “T-O” diseñado por Günther Zainer (1472).

Estos mapas, de enorme claridad conceptual (aunque, para las ideas actuales, sin rigor geométrico), expresan la forma que tomaba el mundo en la mente de las personas de la época (Mammola 2014). Al este, el oeste, el norte y el sur (arriba, abajo, a la izquierda y a la derecha respectivamente), la tierra habitada (*oikouménē*) estaba limitada por el océano y se encontraba dividida en tres partes: Asia, Europa y África (donde habitaban los descendientes de Sem, Jafet y Cam), separados por el río maremágnum (Río Nilo, Mar Negro y Río Don) y el mar mediterráneo.

Este tipo de conceptualización de la Tierra sucumbió frente al conocimiento de nuevas tierras habitadas —en especial de la *quarta pars*, América—. Tal como señalaba el geógrafo Whittlesey en viejo artículo en el que indagaba sobre los cambios del concepto de espacio geográfico en las sociedades justamente a partir de la evolución del concepto *horizonte*:

“El descubrimiento de la unicidad del océano mundial, en el cual las masas continentales están distribuidas como islas, creó un horizonte mundial para los pensadores

avanzados. La tierra plana, —en la que el horizonte geográfico era visto como limitando un plano, esto es, como una mera extensión imaginaria del horizonte visual— fue suplantada por el concepto de tierra esférica. Este vuelco llegó con una brusquedad dramática hacia finales del siglo XV, con los viajes iniciales a la India alrededor de África y en dirección oeste a América” (Whittlesey 1945, 9).

Visto de este modo, quizá no haya mejor alegoría para retratar el quiebre conceptual que la disolución de la “O” de los mapas “T-O”, que representaba el límite real de las tierras habitables. En este punto, la continuidad entre la *revolución cosmográfica* y el cambio astronómico es elocuente: en la cosmografía, la existencia de un centro y un círculo privilegiados sobre la superficie bidimensional de la esfera terrestre colapsó ante la experiencia de los viajes transatlánticos que evidenciaron la inexistencia de puntos privilegiados sobre la esfera; esto se plasmó en la disolución de la “O” de los mapas. En el ámbito astronómico, se comenzó a especular tiempo más tarde que ese mismo tipo de homogeneidad (en el sentido de la inexistencia de puntos privilegiados) existiera también en el espacio tridimensional, lo que condujo a la disolución de la esfera celeste.

Es elocuente el testimonio de Giordano Bruno que sobre esta trasposición de un ámbito a otro, al afirmar burlescamente en escrito su *De Inmenso et Innumerabilis* (de 1591):

“¿Por qué el horizonte de la Tierra,/ que se ve de modo semejante en todas su circunferencia, /nunca te ha enseñado a dudar de que,/ una vez que te hubieses trasladado a otras zonas de la región sidérea,/ podrías ver el mundo con la misma imagen/ al punto de creerte siempre en el centro de todo?” (Bruno 1980, 516)⁴⁹.

Sería forzado, en cualquier caso, pensar que la totalidad del cambio conceptual necesario para la desarticulación de la prueba ptolemaica, que

⁴⁹ Este y los otros fragmentos del *De inmenso* que se reproducen más adelante fueron citados y traducidos por Vidal y Burucúa (2004).

suponía abandonar el centro del cosmos, pueda atribuirse al cambio en la autopercepción del hombre del viejo mundo como centro de la Tierra. Sería, además, anacrónico. Como mostraré en los próximos capítulos, formulaciones como las de Bruno tenían sus raíces también en cambios que habían comenzado a tener lugar antes de la llegada de los europeos a América.

CAPÍTULO

8

HORIZONTES METAFÍSICO-TEOLÓGICOS

En este capítulo analizaré el modo en el que, con anterioridad y relativa autonomía respecto del ámbito astronómico, se desarrollaron especulaciones metafísico-teológicas que condujeron a la formulación de nociones novedosas del concepto *horizonte*. Para ello reconstruiré la vía mediante la cual Nicolás de Cusa llegó a postular un universo infinito y a dar una respuesta general al problema de cómo las observaciones celestes eran compatibles con una Tierra descentrada. Luego analizaré la forma en la que Giordano Bruno dio continuidad a esta idea. En ambos casos, revisaré tanto aspectos implícitos como menciones explícitas al concepto *horizonte* que, según postularé, fueron anticipatorias de la *solución galileana* al problema astronómico de cómo compatibilizar la descentración de la Tierra con la *experiencia de la bisección de la esfera por parte del horizonte*, lo que permite dar sustento a la Tesis VII a IX.



8.1) Percepciones historiográficas

Tanto Nicolás de Cusa (1401-1464) como Giordano Bruno (1548-1600) fueron objeto de debates historiográficos que delinearon, para cada autor, al menos dos grandes corrientes interpretativas. Respecto de Nicolás de Cusa existen, por una parte, quienes recuperan especialmente los elementos *modernos* de su obra (por ejemplo, Cassirer 1951) y, por otra, quienes señalan todos aquellos aspectos en los que el Cusano fue un pensador esencialmente medieval (por ejemplo, Yamaki 2013). Respecto de Giordano Bruno, y tal como lo señala Gatti (1985), una línea destaca el aspecto mágico de su pensamiento y lo ubica dentro de la tradición hermética, sin mayores vínculos con el desarrollo de la ciencia del período (por ejemplo, Yates 1964), y la otra ubica al Nolano dentro del campo de la historia de la ciencia, destacando la influencia determinante en el desarrollo de la *revolución científica* (por ejemplo, Koyré 1979)⁵⁰.

Un punto de contacto entre la interpretación *modernizante* de Nicolás de Cusa y la interpretación *cientifizante* de Giordano Bruno es que ambas destacan un mismo aspecto de sus obras: las consideraciones cosmológicas que uno y otro realizaron, las cuales tienen muchos puntos en común. Como se sabe, el Cusano postuló (contra la tradición antigua y medieval vigente en ese entonces) que la Tierra se encontraba necesariamente fuera del centro del universo por cuanto éste era infinito y descentrado (Cassirer 1951; Koyré 1979; Manzo 2004). Giordano Bruno insistió en la idea de un universo infinito, sintetizando esta tesis con algunas otras de Nicolás Copérnico (Singer 1941; McMullin 1987; Mendoza 1995). Ambos basaron sus consideraciones preponderantemente en especulaciones de carácter metafísico-teológico de las que se desprendían la necesidad de pensar a la creación divina como físicamente infinita (Powell 1935; Miller 2015). A continuación, repondré algunas características del pensamiento de uno y otro pensador con el objetivo

⁵⁰ Realizo una análisis pormenorizado de la primera de las tensiones en mi Tesis de Licenciatura (Szapiro 2007), y de la segunda de las tensiones en Greif y Szapiro (2012).

de considerar sus vínculos con los cambios estudiados en los primeros capítulos.

8.2) Nicolás de Cusa

La obra central de Nicolás de Cusa es *De Docta Ignorantia* (de 1440). En ella se pueden hallar elementos que permiten suponerla en la línea del pensamiento neoplatónico agustiniano, a la que el Cusano añade elementos de la tradición de Dionisio y Erígena, consideraciones de Aristóteles y de otros muchos pensadores con los que fue tomando contacto a lo largo de su formación, al punto de ser considerado por algunos, como Hopkins (1996), un pensador ecléctico⁵¹.

El tema central de la obra es *lo máximo*. Cada uno de los tres libros que la componen está destinado examinarlo desde perspectivas diferentes atendiendo a las formas que tiene: absoluto, contracto o absoluto-contracto. El Libro I se ciñe a lo máximo absoluto, entendido como lo máximo desvinculado de toda contracción (Dios), el Libro II atiende a ese máximo en su forma contracta (el Universo), y el Libro III está destinado al estudio del contacto entre el *máximo contracto* y el *máximo absoluto* que lo contiene (encarnado en la segunda persona de la trinidad, Cristo).

Nicolás define a lo *máximo* como "lo que nada mayor que ello puede ser" (de Cusa 2003, 41-2) y establece que la maximidad no puede sino coincidir con la *unidad* y la *entidad* (2003, 43). La maximidad absoluta (que es uno y que es todo) es aquella unidad (esto es, es aquel máximo) que se encuentra "desvinculada universalmente de toda referencia y de toda contracción" (2003, 43). Por otra parte, la unidad es concebida como lo mínimo, lo indivisible, pero no en términos contractos sino absolutos: la unidad absoluta es el principio de

⁵¹ Realizamos una consideración sistemática del grado de originalidad del pensamiento del Cusano en el marco de su tradición y una discusión de las posibles vías explicativas de esa originalidad en (Levinas y Szapiro 2011).

todo número y el fin de todo número, pero no es el número mismo, sino el máximo y el mínimo absolutos; en ese sentido lo máximo es unidad.

Del ser desvinculado de lo máximo, de su ser absoluto, se sigue que nada puede oponérsele: todo es en él y nada puede darse por fuera. Si nada puede darse por fuera de lo máximo, lo mínimo tampoco. De ello se sigue que lo mínimo es entonces en lo máximo y coincide con él. Aparece, entonces —en un vínculo muy estrecho con la noción de máximo absoluto— la concepción cusana de la coincidencia de los opuestos (*coincidentia oppositorum*, que luego retomará Bruno): lo máximo y lo mínimo coinciden debido a la naturaleza del máximo absoluto, de acuerdo con la cual cualquier negación, cualquier privación, deviene en determinación, lo que le es impropio (Machetta 2003).

Aquello que es lo máximo, que se encuentra desvinculado y que no encuentra nada que se le oponga, no puede ser otra cosa que "en acto todo ser posible" (2003, 43). Como es de esperar de una argumentación cristiana, aquel máximo que es toda la posibilidad en acto, que todo lo contiene de manera desvinculada y que funciona como causa u origen es Dios. Como afirma más adelante: "Dios es la complicación de todo, aun de lo contradictorio" (2003, 105). Definido lo máximo, a Nicolás no le quedan dudas de que es necesariamente infinito.

Por otra parte, Nicolás considera que "toda investigación consiste en la proporción comparativa" (2003, 39). La actividad de conocer es ir de lo conocido a lo desconocido mediante la comparación y la proporción. Por lo tanto, no se puede conocer lo máximo puesto que no se puede llegar a él mediante simple progresión desde lo finito: "las cosas que exceden y las excedidas son finitas" (2003, 45). El infinito es cualitativamente distinto: hay una suerte de barrera ontológica entre lo finito y lo infinito, que se traduce en un límite entre lo finito e infinito en el plano gnoseológico (Colomer 1970); dado que el conocimiento se da por la proporción, y que la proporción busca las semejanzas y desemejanzas y conoce a través de ellas, lo infinito no es algo que pueda ser captado por el intelecto finito. Hay una distancia que el

entendimiento debe saldarse para llegar a comprender lo infinito que es análoga a lo que se puede ver en la relación entre dos cosas que pretenden ser semejantes: la semejanza, la igualdad, siempre puede ser superada. Nicolás introduce la extraña concepción de *igualdad gradual*, una especie de igualdad caracterizada por mantener un grado de diferencia que es reducible infinitamente pero nunca saldado. De allí que nunca se pueda llegar plenamente con lo finito, por más grande que éste sea, a lo infinito.

Lo anterior tiene consecuencias sobre el Universo, considerado en su Libro II. Así como lo máximo absoluto (Dios) es absoluta unidad y complicación, lo máximo contrato (el Universo), es la explicación de lo máximo absoluto. Esto implica que, mientras en el orden de lo absoluto los opuestos coinciden, en el orden de lo contrato todo se da entre el más y el menos sin poder darse nunca los extremos, que coinciden en el máximo absoluto. A esto se refiere Nicolás con la idea de “diversidad gradual”, (de Cusa 2004, 25); en el universo todo es relacional.

El universo, así como el máximo absoluto, es infinito. Aunque, mientras que el máximo absoluto es infinito negativamente, el universo “por cuanto abraza todo lo que no es Dios, no puede ser infinito negativamente, aunque sea sin límite y de esta manera sea infinito privativamente. Y según esta consideración, ni es finito ni infinito” (2004, 27). Esta infinitud privativa se expresa en su ser ilimitado, porque es imposible algo contrato mayor que él que lo encierre. Por otra parte, es necesariamente trino: “la contracción no puede darse sin lo contraíble [la materia], lo contraente [la forma] y sin el nexa” (2004, 59). A la materia, la forma y el nexa necesariamente les acaece aquello que fue dado para todo el universo: se da gradualmente, sin darse el máximo y el mínimo.

La combinación de la coincidencia de opuestos en el plano de lo absoluto con la gradación en el plano de lo contrato, tiene serias consecuencias desde el punto de vista de esta indagación: (i) el universo no tiene centro, (ii) no existen los puntos fijos (por lo que todo cuerpo se mueve), y (iii) la medición

en astronomía es imprecisa y (iv) la observación del cielo es relativa. Consideraré brevemente cada punto.

Si el Universo es infinito y no existe nada que lo contiene, entonces no puede haber ningún punto que, de manera exclusiva, sea su centro. O bien el universo no tiene centro o bien todos los puntos lo son. Al respecto dice:

“Por lo tanto, el centro del mundo coincide con la circunferencia. En consecuencia, el mundo no tiene circunferencia. Pues si tuviera un centro, tendría también circunferencia y así tendría dentro de sí su inicio y su fin, y el mismo mundo estaría limitado respecto de alguna otra cosa y fuera del mundo no habría otra cosa y un lugar” (2004, 89).

La ausencia de un centro absoluto se desprende también de la inexistencia de puntos fijos (del cual un centro absoluto sería un caso particular). Si en el Universo solo pueden darse grados intermedios (y no los extremos), entonces no puede tener lugar el reposo absoluto (ni el movimiento absoluto). Esto necesariamente impide que haya un centro fijo del Universo (por cuanto sería un caso particular de un punto en reposo):

“es imposible que la máquina mundana tenga a esta tierra sensible o al aire o al fuego o a cualquier otra cosa como centro fijo e inmóvil de los varios movimientos circulares considerados. Pues en el movimiento no se llega a lo mínimo en cuanto tal, por ejemplo un centro fijo, porque es necesario que lo mínimo coincida con lo máximo” (2004, 89).

Pero la consecuencia cosmológica de la ausencia de extremos es más profunda aún que la inexistencia de un centro en reposo absoluto: todos los cuerpos se mueven y lo hacen de manera imperfecta. Lo primero, debido a la inexistencia del reposo absoluto y lo segundo debido a la inexistencia de la perfección absoluta en el Universo que impide, entre otras cosas, la existencia de círculos o esferas perfectas. Entonces,

“así como ciertas estrellas parecen describir el círculo máximo, así otras parecen describir el círculo mínimo [pero, dado que no hay polo fijo de la esfera, no hay] una

estrella en la octava esfera que describa por una revolución un círculo máximo, porque es necesario que ella sea equidistante de los polos, los cuales no existen. Y en consecuencia no hay estrella que describa un círculo mínimo” (2004, 91).

Por otra parte, dado que no existe la igualdad precisa (que le conviene solamente a Dios), “un movimiento no puede ser igual a otro, ni uno ser la medida del otro, por cuanto la medida difiere necesariamente de lo medido” (2004, 21), lo que transferido astronomía permite captar que

“el arte de calcular carece de precisión pues presupone que el movimiento de todos los otros planetas puede medirse por el movimiento del Sol. Asimismo, no es posible saber con precisión la disposición del cielo, en relación con cualquier lugar o al nacimiento y ocaso de los signos estelares o de la elevación del polo aquello a que esto se refiere. Y dado que dos ubicaciones no concuerdan con precisión en el tiempo y en la situación, es claro que los juicios sobre los astros están, en su particularidad, muy lejos de la precisión” (2004, 21).

Por último, y en la medida en que no hay puntos privilegiados (ni reposos absolutos ni centros), la observación depende exclusivamente del punto desde el que se observa:

“Pues si alguien estuviese sobre la Tierra y debajo del polo ártico y otra persona estuviese en el polo ártico, al que, al que está en la Tierra se le manifestaría que el polo está en el cenit, así como al que está en el polo se le manifestaría que el centro está en el cenit. Y así como quienes están en las antípodas tienen, como nosotros, el cielo arriba, de la misma manera a los que estén en ambos polos se le manifestaría que la Tierra está en el cenit. Y dondequiera que alguien estuviere, creerá que está en el centro” (2004, 93).

Esta consideración es, en cierto sentido, consustancial con la idea que Copérnico aplicó al movimiento planetario. Nos parecerá que somos el centro aun cuando no lo somos, y los movimientos se nos describirán de manera relativa a nuestro punto de observación. La Tierra nos parece el centro por cuanto estamos en ella, pero si estuviéramos en el polo celeste, ella (su

centro) estaría en nuestro cenit. Por otra parte, sigue comprometido (como lo seguirá también Copérnico) con la idea de una esfera de las estrellas materialmente existente. Sus polos son lugares que —aunque no estén fijos— tienen una ubicación tal que un observador podría situarse en ellos.

De acuerdo con Riedenauer (2005), no es casual que la inspiración para la teoría de la docta ignorancia hubiera tenido lugar (como revela el propio Cusano hacia el final de su obra) mientras navegaba en el mar. Ello permite comprender que la idea de la *coincidentia oppositorum* como centro de la docta ignorancia estuvo inspirada en el fenómeno visual que ocurre al navegar, donde solo se ve el horizonte que aparece sin límites y puede simbolizar el infinito (Riedenauer 2005, 283). Luego de analizar las características de los fenómenos visuales en el horizonte para un navegante, Riedenauer señala que “en la experiencia del Cusano en el mar se encuentra ya implicado un reconocimiento del carácter perspectivo del conocimiento humano y de la dialéctica entre una determinada perspectiva y el horizonte” (Riedenauer 2005, 284).

Más allá de estas apreciaciones indirectas sobre los posibles vínculos entre el horizonte y la metafísica, existe en el capítulo XI del Libro II una referencia explícita al horizonte y nada menos que a propósito de la experiencia de la bisección. Allí señala que el hecho de que el horizonte biseque a la esfera de las estrellas fijas, no prueba que la Tierra se encuentre en su centro:

“la Tierra no es el centro ni de la octava esfera ni de otra, ni tampoco la aparición sobre el horizonte de los seis signos prueba que la Tierra esté en el centro de la octava esfera. Pues aun si estuviera distante del cielo y cerca del eje que pasa por los polos, de modo que una parte estuviera levantada hacia un polo, y en la otra parte deprimida hacia el otro polo, entonces a los hombres, que están distantes de los polos tanto como se extiende el horizonte, les aparecería tan solo la mitad de la esfera, como es manifiesto” (2004, 89).

Esta clase de afirmaciones, desafía la máxima de acuerdo con la cual el sistema de Nicolás de Cusa está basado en fundamentos metafísicos y no en observación empírica —idea ampliamente difundida, reproducida por ejemplo por Miller (2015) y adecuadamente criticada por Ferreira Ruiz (2016)—. Posiblemente, si bien sea cierto lo primero, no parece del todo adecuado lo segundo. Se trata de un pasaje que necesita desarticular un argumento dado en el plano de la experiencia para poder dar curso a la manifestación de los fundamentos metafísicos. Pero el diálogo con la experiencia se encuentra presente. La pregunta es de qué manera. La apelación al horizonte no es en este caso utilizada como prueba, sino que se la invoca para señalar cómo una determinada concepción del universo producto de una particular concepción metafísica es compatible, bajo ciertas condiciones, con la observación.

La enunciación del argumento es algo oscura. Parece invocar el hecho de que al ser la distancia a los polos celestes equivalente a la extensión del horizonte, siempre parecerá al observador que el horizonte biseca, no siendo esto indicio de su ubicación en el centro. No queda claro si ello ocurre porque las distancias son infinitas, o si porque la Tierra está —en términos relativos— cerca del eje (lo primero implica lo segundo, pero no al revés). Si fuera esto último, pareciera simplemente una anticipación de la *solución copernicana* a un problema astronómico. Pero leído de manera contextualizada, y habiendo hecho referencia a las consideraciones metafísicas en las que se encuentra inscripto, la afirmación adquiere otro cariz.

La Tierra no está en el centro, porque no puede estar en el centro. Pero no es que no pueda estarlo, como en el caso de Copérnico, porque la Tierra se traslada alrededor del sol; no puede estar en ese lugar porque ningún cuerpo puede estarlo dado que no existe tal centro. De manera que la solución tiene un aire de semejanza con la de Copérnico pero resuelve un problema mucho más profundo. Aquí se encuentra, de manera incipiente, una forma de compatibilizar la experiencia observacional con cualquier punto en el universo que, necesariamente, se encuentra infinitamente separado de los polos. Lamentablemente, resulta imposible desambiguar en el marco de la

obra del Cusano los alcances del argumento. Distinto es el caso de Giordano Bruno.

8.3) Giordano Bruno

Giordano Bruno articuló algunos preceptos del Cusano con las consideraciones astronómicas de Copérnico, sobre cuyos aspectos matemáticos tenía —según interpretaciones como la de Koyré (1979)— un conocimiento bastante limitado. Si bien Bruno se consideraba heredero y continuador de ideas de pensadores neoplatónicos como Nicolás de Cusa, su posición frente a la tradición del neoplatonismo agustiniano fue —al menos en sus últimos años veinte años de vida— de rechazo (Granada 1984). Bruno, de acuerdo su propia concepción de la historia, se consideraba continuador directo de una tradición naturalista antigua que había sido cubierta por las *tinieblas* del cristianismo; el panteón de dicha tradición estaba conformado por Hermes Trismegisto, Pitágoras y Platón.

En las consideraciones respecto a los principios y causas en el mundo, Bruno fue cultor de una concepción animista, dando continuidad a una visión teleológica y finalista del cosmos. El alma operaba como agente motor y causal inmanente. El intelecto universal era la facultad principal y primaria del alma del mundo y producía en el mundo formas naturales, mientras que nuestros entendimientos producían ideas universales sobre aquellas formas (Cassirer 1951).

Dicha metafísica panteísta se conjugaba, además (y necesariamente) con una desjerarquización en el plano ontológico que barría con las distinciones dualistas vigentes en las tradiciones platónicas y aristotélicas (Granada 2001). Desde un punto de vista cosmológico, esto implicaba una uniformidad del universo y de todas las regiones. La consecuencia de ello era la necesaria existencia de una multiplicidad de *mundos* en un espacio ilimitado, donde nuestro Sol sería solamente una estrella más que no ocuparía ninguna posición de privilegio, como tampoco lo haría la Tierra. De tal modo, adhería a

un heliocentrismo para la Tierra, pero no a la idea de un único universo con centro en el sol, tal como lo proponía Copérnico; la multiplicidad bruniana de *mundos* puede entenderse como una multiplicidad de sistemas solares. Bruno rechazaba así de un modo singular la concepción geocéntrica y antropocéntrica del universo, considerando como centro de su sistema a la naturaleza como un todo orgánico.

Las consecuencias de esta concepción pueden apreciarse con total claridad en dos de sus obras: *La cena de le ceneri* y *De l'infinito, universo e mondi* (ambas de 1584, mientras Bruno se encontraba en Inglaterra).

En el Diálogo V de *La cena* se puede leer la siguiente afirmación del personaje Teófilo (que representa las consideraciones del propio Bruno):

“Porque las otras estrellas no están ni más fijas ni fijas de manera diferente a como lo está esta estrella nuestra (La Tierra) en el mismo firmamento que es el aire. Y no es más digno de recibir el nombre de octava esfera el lugar donde está la cola de la Osa que el lugar donde está la Tierra en que nos encontramos, puesto que estos cuerpos están distribuidos por una misma región etérea” (Granada 1984, 163).

Esto pone de manifiesto la desjerarquización del universo. Nada menos que la octava esfera es señalada como un lugar relativo al observador y no como un absoluto. Si estuviéramos en otro punto de este espacio etéreo veríamos a la Tierra como parte de la octava esfera. Esto se asemeja a la idea que Nicolás esbozaba al decir que para un observador en el ártico la Tierra estaría en el cenit, pero de manera mucho más contundente. Porque el Cusano seguía, en tal consideración, comprometido con una idea de esfera celeste y, por más que la postulara infinita, optaba por indicar que lo que estaría en el cenit era el *centro* de la Tierra, y no la Tierra en su totalidad. El de Bruno es un paso más consciente en el sentido de notar que la consecuencia de un universo infinito es que todos los cuerpos se manifestarían para un observador en cualquiera de sus puntos tal como lo hacen para nosotros.

Es que en el fondo, Bruno ya encarna la ruptura en la clasificación de los cuerpos en celestes y terrestres, de manera más cabal y quizá como producto de la maduración de las ideas copernicanas. Y es interesante notar que, según Bruno, la confusión se debía nada menos que a la forma en la que se nos presentan las apariencias estando nosotros en el centro del horizonte:

“Dicho error surge de la siguiente manera: situados nosotros en el centro del horizonte y volviendo los ojos en todas las direcciones podemos determinar la distancia mayor y menor entre, desde y en aquellas cosas que están cerca de nosotros. Pero a partir de un cierto punto nos parecerá que se encuentran todas a la misma distancia” (Granada 1984, 164).

Pero este cambio presumiblemente distinto (más radical) que el de Nicolás, obedece al igual que en él, a una necesidad metafísico-teológica. De acuerdo con Casazza (2016), la infinitud del universo es una conclusión (y no una premisa) de una profunda revolución teológica que, entre otros aspectos, posee el de ser divergente respecto de la tradición escolástica en lo relativo a su distinción entre *potentia absoluta* divina (posibilidad absoluta) y la *potentia ordinata* (posibilidad ordenada o limitada, restringida por ciertas leyes). Para Bruno no tiene sentido pensar que Dios, pudiendo crear un universo infinito hubiera decidido someter a su criatura a una condición finita (*potentia ordinata*). Se opone, por tanto —y en continuidad con las ideas cusanas— a que tal sea la relación entre el *esse* y el *posse* de Dios. Es de allí que, y nuevamente insistiendo en la insinuación falsa del horizonte, declama en *De l'infinito*:

“Así se magnifica la excelencia de Dios, se manifiesta la grandeza de su imperio; no se glorifica uno, sino en innumerables soles; no en una tierra o en un mundo, sino en un millón: quiero decir: infinitos. De forma que no es vana esta potencia del intelecto que siempre quiere y puede añadir espacio a espacio, mole a mole, unidad a unidad, número a número, por medio de esa ciencia que nos suelta de las cadenas de un imperio angostísimo y nos eleva a la libertad de un imperio augustísimo, que nos lleva de la presunta pobreza y angustia a las innumerables riquezas de un espacio tan grande, de un campo tan

dignísimo, de mundos tan habitados, y no hace que un círculo de horizonte, insinuado falsamente por el ojo en la tierra e imaginado por la fantasía en el éter espacioso, pueda encarcelar nuestro espíritu bajo la custodia de un Plutón y la misericordia de un Júpiter” (Bruno 1993, 92-3).

En esta misma línea de argumentación contra lo que el sentido de la visión podría conducirnos a pensar respecto de la finitud y la concavidad de la esfera estelar, Bruno afirma:

“Así nosotros que estamos en la Tierra decimos que la tierra está en el centro y todos los filósofos modernos y antiguos, sean de la secta que sean, dirán que está en el centro sin menoscabo de sus principios, igual que nosotros decimos a la vista del horizonte máximo de esta región etérea que está a nuestro alrededor, limitada por ese círculo equidistante con respecto al cual estamos como en el centro. De la misma manera los que están en la luna entienden tener a su alrededor esta tierra, el sol y otras muchas estrellas, que están en torno al centro y en el límite de los radios propios del propio horizonte. Así, no hay polos determinados para la tierra más de lo que la tierra misma es un polo determinado para cualquier otro punto del éter y espacio mundano” (Bruno 1993, 139).

Bruno advierte que los horizontes propios de los demás astros, generarán impresiones análogas a las del horizonte de la Tierra para sus habitantes. Pero parece ir más lejos aún; no existen ni centros ni polos absolutos, de lo que se sigue la inexistencia del ecuador y otros círculos como absolutos, todos ellos presentes en el sistema ptolemaico y claves para el éxito de su prueba de la centralidad de la Tierra (tal como lo señalé en el Capítulo 5). Desde cualquier punto del universo se podrán establecer observaciones análogas respecto de sus propios polos y horizontes, lo que solo es posible a condición de la inexistencia de puntos con propiedades singulares. Lo que queda bellamente expresado en la epístola proemial de la misma obra:

“Por eso las alas al aire seguro abro / y no temo chocar con cristal o vidrio, / mas surco los cielos y al infinito me alzo.

/ Y mientras de mi globo a otros surjo / y por el etéreo campo penetro, /los que otros ven lejano, yo, a mis espaldas dejo” (Bruno 1993, 98).

Bruno constituye una primera expresión completa de un cambio conceptual profundo respecto del *horizonte* antiguo y medieval. Cuánto es propio y cuánto le debe a Nicolás de Cusa, es algo difícil de establecer. Pero sea mayor o menor el aporte personal de Bruno, esta es una formulación que expresa casi cuarenta años antes que la de Galileo, la misma idea central y devela una plena consciencia de algunas consecuencias de la concepción del cosmos físicamente infinito⁵².

8.4) La astronomía como limitación

Es interesante notar que la solución de Bruno no había sido concebida en el ámbito astronómico ni tendría predicamento en él hasta que Galileo la asumió⁵³. Desde una perspectiva epistemológica, no puede sino llamarnos la atención el hecho de que los primeros que pudieron escapar del *yugo conceptual* ptolemaico, que implicaba no poder abandonar el sistema geocéntrico y geoestático, fueron pensadores cuya formación en astronomía de posición no era la que ordenaba el cosmos. Quizá ello les permitió tener un

⁵² El aire de semejanza con el planteo de Galileo no debe hacernos olvidar las fuertes diferencias. Una de las más destacables es, quizá, el papel otorgado a la geometría. como le hace decir al personaje Smith para que luego apruebe Teófilo: “De la ignorancia de tal distinción proceden los errores similares de que están llenos muchos escritos que nos enseñan tantas extrañas filosofías donde los signos, circunstancias y accidentes reciben el nombre de causas [...] Una cosa es jugar con la geometría y otra verificar con la naturaleza” (Granada 1984, 168).

⁵³ Es elocuente la comparación, por ejemplo, con pensadores más estrechamente vinculados con la astronomía, como Thomas Digges. En su obra *A perfit description* (Digges 1983) apuntaló un cambio en el sentido de la infinitización del universo desde una perspectiva bastante ingenua. Tal como dejó asentado en el grabado que acompañaba su obra, el orbe de estrellas se *elevaba* infinitamente en altitud esférica. Si bien existen debates en torno a la naturaleza de la afirmación de Digges, Johnson y Larkey (1934) creen que tal extensión era física mientras que Koyré (1979) considera que no-, parece claro que sigue comprometido con una idea de un sistema solar en un centro desde el que se eleva hacia arriba (y nada menos que en forma de orbe!) esa infinitud. De modo que, si hay infinitización en la propuesta, no está clara la consecuente relativización de los puntos del espacio.

grado mayor de libertad para captar en sus conceptos transformaciones que estaban teniendo lugar en otros ámbitos del conocimiento, como los que considero en los Capítulos 7 y 9. Quizá no, y simplemente pudieron compatibilizar la observación con los principios que emanaban de sus elaboraciones metafísicas. Lo cierto es que pudieron dar un paso en el sentido del cambio conceptual. Y esto permite sustentar algo que será central en mis conclusiones: que el flujo entre conceptos científicos y no científicos, así como el flujo entre conceptos de distintas áreas del conocimiento científico, son elementos clave para la explicación del cambio conceptual, aun cuando lo que se busque sea la comprensión del desenvolvimiento de un concepto en una única disciplina científica.

Por otra parte, además de no ser astrónomos de formación o profesión como, en sentido estricto, tampoco lo era Galileo (Drake 1993), compartían con él otra cualidad: la de haber tenido un fluido contacto con los desarrollos técnicos que tuvieron lugar en el ámbito artístico del Renacimiento. Distintos autores señalan la relevancia del arte y de la perspectiva en el pensamiento de Nicolás de Cusa (por ejemplo, C. H. Carman 2014; Riedenauer 2005; Hopkins 1996) y en el de Giordano Bruno (por ejemplo, Vidal y Burucúa 2004; Ordine 2008). En el próximo capítulo, entonces, consideraré de qué modo pudo haber sido el arte del período un elemento dinamizador del cambio conceptual en astronomía.

CAPÍTULO

9

HORIZONTES ARTÍSTICOS

En este Capítulo sostendré que las innovaciones técnicas vinculadas con la representación pictórica en el contexto del Renacimiento tuvieron un papel sustancial en el proceso de los cambios conceptuales sugeridos como necesarios al final del Capítulo 5. Defenderé que el desarrollo de la perspectiva —en especial, la reconstrucción geométrica del espacio desarrollada por ella—, posibilitó una interpretación novedosa de los fenómenos celestes, resultando ineludible su consideración al momento de establecer una explicación sobre el cambio del concepto *horizonte*. Para mostrarlo, realizaré una caracterización del cambio artístico que permitirá explicitar los puntos de contacto con la *solución galileana* al problema de la compatibilización de la bisección con la descentración de la Tierra y, a partir de elementos histórico-biográficos, señalaré que tales puntos de contacto no parecen casuales y sugieren una influencia del arte sobre el cambio conceptual astronómico. Con tal consideración, cierro los elementos que permiten dar cuenta de la Tesis VII a IX.



9.1) Ciencia y arte en el Renacimiento

Uno de los temas centrales del arte renacentista italiano fue el establecimiento de un nuevo diálogo entre apariencias perceptivas y realidades espaciales. Esto se manifestó de manera elocuente en la pintura, ámbito en el que un objetivo primordial fue el desarrollo de nuevas técnicas y métodos para el estudio y la representación en dos dimensiones del espacio tridimensional. El *desiderátum* de la transformación era alcanzar una representación *lo más perfecta posible* de la realidad, perfección que o bien no era buscada o bien era concebida de manera distinta en el arte medieval y en otras partes de Europa en ese mismo período.

La interpretación del sentido dado a la perfección en arte es demasiado complejo para ser abordado aquí. La historiografía de las técnicas tiende a pendular entre dos posiciones, antes antagónicas que complementarias. Aquella que entiende que las técnicas aparecen para satisfacer de la mejor manera posible –dado un determinado estado de conocimientos– las necesidades sociales emergentes, y aquella que, por el contrario, supone que la invención de una técnica (más obra de la casualidad o del genio individual que de la necesidad) ofrece caminos que –dada su superioridad intrínseca y absoluta respecto de lo preexistente– son escogidos por los habitantes de la época que la vio nacer. De acuerdo con la primera de las posiciones, se podría sugerir que la invención de nuevas técnicas durante el Renacimiento obedeció a la necesidad de atender (y representar) la profundidad, necesidad presumiblemente inexistente en el arte bizantino. De acuerdo con la segunda, las nuevas técnicas habrían señalado un camino antes inconcebido que, de manera clara e inequívoca, habría supuesto una mejora absoluta de las condiciones técnicas para la representación que, por lo tanto, se ofreció como vía superadora de la representación pictórica. Más allá de esta disquisición, la proclama de la perfección es indicativa de las fronteras del sentido de realidad de esa época. Y esas fronteras del sentido de realidad muestran que ciertos sectores de las sociedades urbanas europeas de ese entonces, estaban en condiciones de reemplazar un sistema de representación por otro.

En la pintura, una de las manifestaciones más claras del cambio en la relación apariencia-realidad fue el desplazamiento de las jerarquías intrínsecas de lo pintado; la lógica de acuerdo con la cual la relevancia del objeto era la ordenadora del espacio en la representación medieval fue reemplazada por jerarquías cuantificadas en función de la distancia respecto del observador (proceso que no fue ajeno al cambio que en la cosmografía que supuso de los mapas “T-O”, referido en el Capítulo 7). Por ello, el lugar del sujeto que observaría la representación artística pasó a ser determinante en la constitución de la obra, resignificando los papeles del sujeto y el objeto artísticos. En dicho contexto, uno de los elementos que los artistas debieron comenzar a considerar fue la forma en la que el espacio tridimensional debía proyectarse sobre las dos dimensiones de la representación de manera tal que el espacio representado adquiriera coherencia para el observador. Por tal motivo, una de las investigaciones que debieron afrontar los artistas fue la del comportamiento del horizonte visual.

Por ello, y al igual que ocurrió en el ámbito astronómico, en la pintura tuvieron lugar en un breve período de tiempo procesos mentales que condujeron a elaborar condiciones para abstraer y representar lo real de manera novedosa. Al igual que en tantas otras disciplinas del período, un paso fundamental en ese cambio fue la introducción sistemática del uso de la geometría; ella se volvió una condición de posibilidad para la representación de lo observado, lo que era consistente con la creciente convicción de que la naturaleza poseía tales cualidades geométricas.

En general, hay acuerdo en que la introducción de la geometría en las artes mecánicas tuvo un impacto mayúsculo en su contenido, su práctica y su caracterización. Esto se manifestó, por ejemplo, en la eliminación de la barrera que las separaba tajantemente de las artes liberales (hoy referidas como *ciencias*, reunidas en el *trivium* y el *quadrivium*) y que les permitió *elevarse*; proceso que se dio especialmente con la pintura y la arquitectura.

Sobre lo que no hay total acuerdo es sobre el papel que pudo haber tenido el desarrollo artístico del período sobre el cambio científico. Si bien nadie niega que la necesidad de la ciencia de trabajar la naturaleza mediante el uso de la experiencia terminó por barrer con la vieja distinción entre artes liberales y mecánicas, no hay acuerdo en torno a cuál fue el papel que tuvieron las artes mecánicas en ese cambio. Pueden hallarse, de un lado, concepciones de acuerdo con las cuales la ciencia no fue condicionada por las artes (por ejemplo, Toulmin 1961), y del otro, expresiones que afirman que constituyeron uno de los pilares del cambio científico (por ejemplo, Burucúa 1984). El estudio de caso del cambio conceptual acaecido al concepto astronómico *horizonte* parece ir en apoyo de esta segunda línea interpretativa. Para mostrarlo, será necesario considerar algunos aspectos del cambio artístico.

9.2) La perspectiva *artificialis*

Uno de los resultados de las investigaciones llevadas a cabo por los artistas de la época es lo que hoy se conoce con el nombre de *perspectiva*, conocimiento diferente de aquél conocido con el mismo nombre en el período medieval, referido en el Capítulo 4. Mientras que este último se orientaba al estudio de la naturaleza de la luz —o bien desde una perspectiva metafísica o bien como una ciencia empírica—, la perspectiva desarrollada en el ámbito artístico moderno fue una técnica pictórica diseñada y aplicada sistemáticamente desde el *Quattrocento* de manera consciente y novedosa que, a partir de un conjunto de reglas geométricas. Esta técnica buscaba, tal como lo señaló Panofsky en su célebre ensayo de 1927, que el cuadro se transforme:

“en una <ventana>, a través de la cual nos parezca estar viendo el espacio, esto es donde la superficie material pictórica o en relieve, sobre la que aparecen las formas de las diversas figuras o cosas dibujadas o plásticamente fijadas, es negada como tal y transformada en un mero <plano figurativo> sobre el cual y a través del cual se proyecta un espacio unitario que comprende todas las diversas cosas” (Panofsky 2003, 11).

Panofsky denominó a esta técnica *perspectiva artificialis* para dar cuenta de lo artificial de la racionalización del espacio supuesta en su construcción y para diferenciarla de la perspectiva *naturalis* o *communis*, cuyo origen puede remontarse a la Antigüedad y en la que primaba la percepción psicofisiológica del espacio (Panofsky 2003, 13). Seguiré tal distinción y en todo momento en que no aclare lo contrario, con *perspectiva* referiré a la *artificialis*.

Posiblemente, la primera ejecución práctica del conjunto de técnicas que luego catalizarían en la perspectiva fue la construcción por parte de Filippo Brunelleschi (1377-1446) de una pintura del *Battistero di San Giovanni* (Baptisterio de San Juan, en Florencia) que, observada bajo determinadas condiciones, generaba al observador la ilusión de estar viendo el propio edificio⁵⁴. La construcción de este instrumento, según consta en la obra de Antonio di Tuccio Manetti (1423-1497), *Vita di Filippo di Ser Brunellesco*, era la siguiente:

“En esta pintura (...) abrió un agujero en la parte donde estaba representado el templo de San Giovanni, en el lugar en el que percutía el ojo, directamente enfrente de quien mirara desde ese sitio del interior de la puerta central de Santa María del Fiore, donde se hubiera situado para representarlo a su entender. El cual agujero era, por el lado pintado, pequeño como una lenteja, y se iba ensanchando, al atravesar la tabla, en forma de pirámide, como un sombrero de paja de mujer, hasta alcanzar el tamaño de un ducado o poco más. Y quería que el ojo se pusiera en el reverso, donde el agujero era grande, y que el posible espectador, se lo aproximara con una mano al ojo y con la otra sostuviera, frente a la pintura, un espejo plano, de modo que aquélla se reflejara en éste; y el alejamiento del espejo correspondiera, más o menos, en brazas reducidas, a la distancia en brazas reales que iba desde el

⁵⁴ Existe un debate de hasta qué punto la perspectiva es un invento netamente renacentista-moderno, puesto que se ha sostenido que existieron con anterioridad al período moderno técnicas de representación que buscaban la misma ilusión de fondo. Conesa Tejada (2011) realiza una discusión completa y actualizada en torno a lo novedoso de la propuesta de Brunelleschi. Si bien realiza un esfuerzo por señalar los antecedentes medievales del intento de generar una ilusión de fondo mediante reglas geométricas, avala que posiblemente fue Brunelleschi el primero en alcanzar una formulación “correcta” de la *perspectiva artificialis*.

lugar en el que indicaba que se había puesto para pintarlo hasta el templo de San Giovanni, de tal manera que, al mirarlo, con todas las circunstancias mencionadas, de la plata pulida y del lugar, etc. y del punto parecía que lo que se veía fuera lo verdadero; y yo lo he tenido en las manos y lo he visto varias veces, y de ello puedo dar fe” (citado por Damisch 1997, 107).

Lo que demostraba de manera práctica el experimento de Brunelleschi era la posibilidad de generar una impresión de un espacio tridimensional sobre una superficie bidimensional. Las claves para que ello funcionara eran que se respetaran la posición de la pintura con relación al observador y la distancia entre el espejo y el cuadro, que el observador permaneciera quieto observando con un solo ojo a través del orificio diseñado para tal fin (para evitar que la visión estereoscópica arruinara el efecto) y, desde luego, que la pintura estuviera compuesta de una determinada forma.

No quedan restos del propio instrumento de Brunelleschi ni escritos desarrollados por él o por testigos directos sobre cómo era la geometría de la pintura para lograr tal objetivo. Pero es de suponer que no eran muy distintas de las que tiempo más tarde sistematizaría y pondría por escrito León Battista Alberti (1404-1472), en su tratado *Della Pittura* (o *De Pictura*, en su versión latina), de 1453. Alberti dice que la técnica de representación geométrica con proyección central se construye sobre la base de concebir el acto de la observación como una pirámide, entendida como un:

“cuerpo oblongo de cuyas bases surgen líneas rectas que prolongadas hacia arriba terminan en un punto común. La base de la pirámide es la superficie observada y los lados son los rayos visuales que denominamos extrínsecos. La cúspide [vértice] de la pirámide se encuentra dentro del ojo donde los ángulos de las cantidades en los distintos triángulos se unen [...]; de todo ello resulta evidente que la distancia entre la superficie y el ojo posee una importancia considerable” (Alberti 1996, 72-3).

La idea es que la forma que asume lo representado depende del sujeto de la observación y de la ubicación del plano sobre el que se proyecta la imagen observada. Para tal fin, la sugerencia albertiana era utilizar un velo que,

interpuesto entre la imagen a pintar y el observador, permitiera a este último encontrar la cúspide de la pirámide visual y establecer los límites.

Panofsky consideraba que la construcción en perspectiva buscada mediante el velo conllevaba implícita una noción de espacio homogéneo, infinito y constante (a lo que a veces refiere como "isótropo"). Vidal y Burucúa (2004) analizan detalladamente los alcances de esta aseveración a propósito de las formulaciones de Alberti, Piero della Francesca, Pomponio Gaurico, Egnazio Danti y Guidobaldo Burbon del Monte, y advierten que si bien efectivamente la homogeneidad e isotropía pueden señalarse como constantes en sus formulaciones, la idea de infinitud aparece efectivamente con Alberti, para luego perder fuerza y aparecer, en el mejor de los casos de modo implícito, en la obra de Guidobaldo. Con ello, relativizan la idea del historiador de la perspectiva Vagnetti, quien afirmó que Guidobaldo había demostrado científicamente por primera vez los puntos de fuga, definidos como el lugar de la convergencia de las imágenes perspectivas de haces de rectas paralelas e imagen de su punto común en el infinito.

Los puntos de fuga, su construcción y conceptualización son la clave para el funcionamiento de la representación en perspectiva. Conviene recordar, de manera muy general, cuáles son las reglas básicas para reconstrucción geométrica del espacio de acuerdo con la pirámide visual (Kubovy 1988)

- a) las líneas rectas son, en la representación, siempre líneas rectas (excepto la que pasa por el centro de la proyección, que asume la forma de punto);
- b) las líneas paralelas al plano de la pintura son, en la representación, paralelas entre sí;
- c) las líneas que no son paralelas al plano de representación convergen entre sí en el punto (o los puntos) de fuga;

Los requisitos señalados son todos igualmente relevantes al momento de lograr el efecto de la profundidad de la pintura de acuerdo con esta forma de perspectiva. Y es especialmente importante que los puntos de fuga se establezcan considerando la proyección de la visual del observador, por lo que deben considerar la ubicación que adoptará el observador respecto de la pintura. Si, por ejemplo, se cumpliera con los puntos *a)* a *c)*, pero luego se establecieran puntos de fuga inconsistentes con la posición de observador, entonces la representación no alcanzaría su objetivo. En este sentido, es de destacar que el mayor objeto de investigación dados esos requisitos, era cómo establecer con precisión el punto (o los puntos) de fuga con relación a la posición que debería tomar el observador para poder vivenciar la ilusión de fondo (al mirar, cabe reiterar, con un solo ojo inmóvil).

De manera general, se puede decir que los puntos de fuga se definen tanto vertical como horizontalmente en función de la posición de la pintura en un determinado espacio físico y, consecuentemente, la posición que el observador tendrá respecto de ella. Verticalmente, a partir del ángulo de la visual y de la pretensión de orientación de la pintura; no es lo mismo el cuadro preparado para ser visto frontalmente, que uno para ser visto con cierta inclinación lateral. Horizontalmente, configurado a partir de una línea a la altura de los ojos del observador, que constituye la línea del horizonte.

Aquí no revisaré las discusiones técnicas que tuvieron lugar en el período renacentista en torno a las formas más convenientes de concebir y representar el horizonte en una pintura. Bástenos con señalar que ese fue un tema central en los escritos sobre pintura del período. Así, por ejemplo, en el propio tratado de Alberti se puede leer:

“Las propiedades permanentes de las superficies son de dos tipos. Las relacionadas con uno de ellos se conocen a partir del límite externo que encierra a la superficie. *Algunos llaman a esto el horizonte: nosotros usaremos un término metafórico que viene del latín y lo llamaremos borde, orla o contorno*” (Alberti 1996, 64).

“No es inusual observar ese vapor blancuzco que flota en el aire, hacia el horizonte, y que se desvanece conforme uno levanta la vista hacia el cenit” (Alberti 1996, 76)

Este es solo un ejemplo de cómo el estudio de la relación entre el horizonte y el observador (que es una de las formas de la indagación en torno a la interacción entre el observador y lo observado y la representación y lo representado) fue revisitado a partir del cambio artístico renacentista. Y, como también se puede notar en el pasaje citado, esta indagación no se encontraba desvinculada de las concepciones sobre la Tierra y del cielo⁵⁵.

La discusión en torno al horizonte y la forma en la que el espacio se proyecta sobre un plano de representación favoreció el desarrollo de una idea proyectiva⁵⁶. Cualquier individuo familiarizado hoy con estas técnicas puede descomponer inmediatamente la realidad de lo proyectado de la realidad de la proyección y comprender las distintas formas en las que una y otra se encuentran vinculadas. Parece, por tanto, difícil entender que esto requiera de un aprendizaje; pero es posible acreditar su necesidad tanto histórica como individualmente⁵⁷.

⁵⁵ Consideraciones análogas pueden ser encontradas en otros tratados artísticos del período. La octava parte del *Trattato della pittura* de Leonardo da Vinci (1452-1519) está íntegramente destinada a su estudio. Allí refiere: “si el cielo y la tierra fuesen de superficie plana, con interposición de espacio equidistante, sin duda el horizonte de las perspectivas estaría a la altura del ojo que lo mira (...); pero como tal cielo y tierra no están separados por espacio paralelo, o sea por equidistante planicie, sino por espacio convexo en la parte del cielo y cóncavo en la parte que viste la tierra, ocurre que cada parte de la superficie de la tierra puede ser horizonte, lo que no puede ocurrir siendo planos el cielo y la tierra (Da Vinci 1944, 341)..

⁵⁶ Se puede señalar incluso que esta modificación introducida en este período por la *perspectiva artificialis* en el marco de la geometría experimental luego se desprendió de ella, abriendo paso al desarrollo de la geometría descriptiva y proyectiva en los siglos subsiguientes. En lo inmediato, supuso la superación del octavo postulado de la óptica de Euclides (2000b, 142) , cuya vigencia en la antigüedad se había constituido en límite a la creación de una perspectiva, dado que es imposible proyectar una superficie esférica en un plano (al respecto, véase Panofsky 2003; Burucúa 1991; Rodrigues Neto 2013).

⁵⁷ Sobre los aspectos psicológicos involucrados en la visión en perspectiva, véase Kubovy (1988) y Arnheim (2002). Sobre el debate en torno a la convencionalidad de la perspectiva lineal, véase Burucúa (Burucúa 1991, 40-1)

9.3) La idea proyectiva y el horizonte

Ahora bien, ¿cuál es la relación entre el desarrollo de una idea proyectiva en el arte (con su respectiva conceptualización del *horizonte* de observación y de representación) y el cambio en el concepto astronómico horizonte?

En el Capítulo 5 sugerí que, en cierto sentido, Galileo observó la misma esfera que observaron Ptolomeo o Copérnico; pero en otro sentido, no; que los conceptos utilizados por unos y otro para conceptualizarla eran tan distintos que, posiblemente, la propia observación fuera distinta. Galileo dio un paso que consistió en descomponer la única esfera de las estrellas fijas en dos esferas (o, para ser precisos, en algo de lo que no podía saberse su forma y en una esfera). Con ello, la esfera celeste fue descompuesta en dos: algo real (el universo, cuya forma ignoramos) y una esfera celeste aparente o, para ser más elocuentes *proyectada*.

Esa fue la condición para desarticular el argumento ptolemaico. Y la posibilidad de descomponer entre lo real y lo proyectado se encuentra en total sintonía con la capacidad de repensar lo observado bajo las premisas de una idea proyectiva. La esfera aparente es la mera proyección del universo observado. Somos el centro de aquélla, no podemos saber si lo somos de éste. Estamos en el centro de la eclíptica, del ecuador y en una posición equidistante de los polos, pero solo si advertimos que ellos no son más que la proyección de puntos y líneas sobre esa esfera aparente.

Entender que una proyección puede parecerle real al ojo del observador, siempre que en el plano proyectado adquiriera una imagen consistente, es la clave en la *perspectiva artificialis*. Lo es también en la reinterpretación de la *solución galileana*. Si bien es cierto que uno de los elementos propios de la perspectiva es la proyección plana que, como adelanté, no es la que se da en la percepción psicofisiológica que tiene lugar cuando el horizonte delimita esa

ventana al cielo⁵⁸, hay un elemento que permite establecer un puente entre la reconstrucción de la espacialidad de fondo en una y otra. El hecho de que mientras que en la observación del cuadro en perspectiva es necesario que el observador permanezca quieto mirando con un solo ojo (para evitar que la visión estereoscópica deleve el engaño), el observador celeste está condenado a mirar de ese modo. Sea que mire con un ojo (por ejemplo, mediante el telescopio) o con los dos, sea que no se mueva o que lo haga en una órbita en torno al Sol, lo cierto es que se trata de distancias despreciables. A los fines prácticos, es como si el observador celeste hubiera estado mirando siempre con un solo ojo y desde el mismo lugar una ventana; hasta el momento la había considerado como una superficie; en la modernidad comenzaba a pensar que podía tener profundidad. Nadie podía *salir* para ver cómo se vería desde otro lado. Pero desde este momento, estaban dadas las condiciones técnicas y mentales para establecer que, si acaso no estábamos en el centro de una esfera y, por el contrario, estábamos en un punto cualquiera de un universo infinito, eso era perfectamente compatible con nuestra observación.

La familiaridad entre la *solución galileana* y el desarrollo pictórico podría, en cualquier caso, resultar insuficiente a aquellos que no están dispuestos a darle al conocimiento artístico un papel importante en el cambio científico. Sin embargo, elementos históricos y consideraciones realizadas por estudiosos del tema permitirán robustecer la tesis de la influencia del arte sobre la solución del problema de la compatibilización de la experiencia de la bisección de la esfera celeste por el horizonte con la descentración de la Tierra.

⁵⁸ A este respecto, hay una consideración interesante de Panofsky en torno a Kepler, en continuidad con lo considerado en el Capítulo 5. Dice: “El propio Kepler (...) reconocía la posibilidad de que la cola objetivamente rectilínea de un cometa, o la trayectoria objetivamente rectilínea de un meteoro, podía subjetivamente, ser tomada por una verdadera curva; y lo interesante de ello es que Kepler se daba cuenta claramente de que, debido a su educación en la perspectiva plana, en un principio había pasado por alto, e incluso negado, estas aparentes curvaturas” (Panofsky 2003, 17).

9.4) Galileo y la idea proyectiva

Burucúa (1984), establece de manera extensamente documentada la existencia de una *idea proyectiva* en Galileo Galilei. Señala que si bien la biblioteca de Galileo reconstruida por Favaro no contaba con volúmenes sobre perspectiva, pueden señalarse sobrados elementos que permiten establecer su dominio del tema:

- a) Contacto con artistas. Galileo fue discípulo de matemáticas de Ostilio Ricci (1540-1603) junto al Cigoli, Ludovico Cardi (1559-1613), que escribió un *Tratado de Perspectiva práctica* (inédito). Es sumamente probable que Galileo reflexionara sobre temas de perspectiva durante las lecciones, lo que puede apreciarse en tramos de algunos escritos tempranos como *Breve instrucción sobre la arquitectura militar* o *Las matemáticas en el arte militar*.
- b) Referencias a artistas. Galileo hace mención en múltiples ocasiones a artistas y sus obras. Por ejemplo, en su *Breve instrucción sobre la arquitectura militar* cita la *Instrucción sobre las medidas* de Alberto Durero (1471-1528). Más tarde en su obra refiere, entre otros, a Rafael Sanzio (1483-1520), a Miguel Ángel Buonarroti (1475-1564) y a Leonardo da Vinci.
- c) Reflexiones sobre arte. Existen distintas referencias a las disciplinas artísticas en los escritos de Galileo. Una de relevancia es la suscitada por un intercambio con Giulio Cesare Lagalla (1576-1624), en la que se encuentra en discusión si los sentidos pueden o no engañarnos, y en la que se toma como ejemplo el engaño propiciado por la perspectiva.
- d) Lenguaje. Galileo utiliza el término “perspectiva”, y de un estudio de los sentidos que asume tal término en su obra puede considerarse que *perspectiva artificialis* estaba dentro de los significados que podía asumir para él.

- e) Instrumentos. Existen referencias a una suerte de micrómetro utilizado por Galileo, que no sería otra cosa que la aplicación del velo albertiano al telescopio, como medio para la observación y anotación del cielo.
- f) Dibujos. Los dibujos desarrollados por Galileo a partir de sus observaciones mediante el telescopio y, lógicamente, las reflexiones que los acompañan permiten vislumbrar la capacidad de pensar el espacio proyectivamente, aun cuando esos dibujos no estuvieran contruidos *en perspectiva*.

A propósito de este último punto, diversos estudios analizan la particular forma en la que Galileo se relacionaba con la imagen y señalan la relevancia del vínculo de Galileo con el desarrollo artístico que estaba teniendo lugar en su misma ciudad (Winkler y Van Helden 1992)⁵⁹. Edgerton (1991; 1984) en esta misma línea sugiere que Galileo fue capaz de comprender las irregularidades de la Luna como manifestación de distintas profundidades en su superficie de manera distinta a la que lo hizo Thomas Harriot (1560-1621):

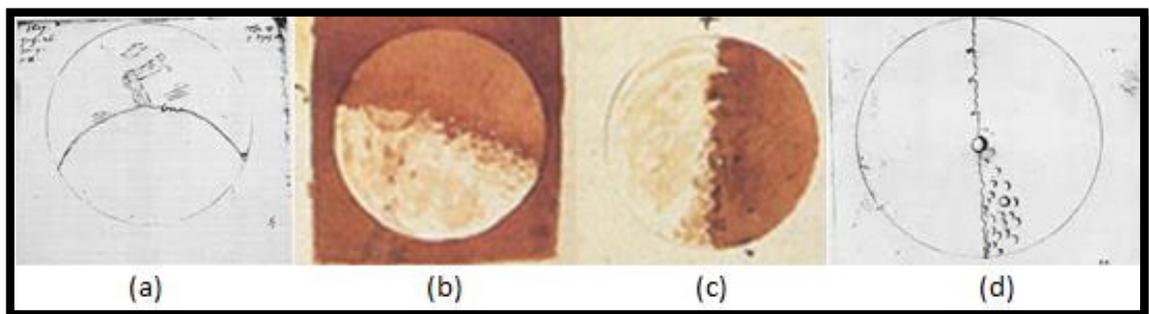


Figura 9.1: dibujos de Harriot y Galileo comparados.

⁵⁹ Mención aparte merece un libro en dos volúmenes (Bredekamp et al. 2011) publicado a instancias de una prueba de imprenta original de *El mensajero de los astros* descubierta recientemente en 2005. La misma contenía originales pintados por Galilei y fue objeto de numerosas consideraciones de parte de expertos en Galileo y en arte. Finalmente, y sin haber sido previsto, la publicación debió ser completada con un tercer volumen tras descubrirse que se trataba de una copia falsificada, posiblemente pintada por un artista callejero de Buenos Aires (Schmidle 2013).

Los dibujos (a) y (d) son de Harriot, mientras que los (b) y (c) son de Galileo. Mientras que el dibujo (a) de Harriot es anterior al de Galileo, el dibujo (d) es posterior. Respecto de lo dibujado en (a), no pueden aducirse exclusivamente dificultades técnicas (ni de dibujo ni de observación), puesto que el mismo Harriot, ya influenciado por Galileo, fue capaz de dibujar algo bastante más próximo a una idea de profundidad, en la imagen (d). Con lo que, evidentemente, la sensibilidad original para captar el espacio de uno y otro observador era distinta, aunque esto no impidió a Harriot aprender a visualizar lo que veía Galileo una vez que fue *orientado* hacia tal sensibilidad⁶⁰.

9.5) Interacciones disciplinares

Suponiendo entonces que hay elementos suficientes para establecer que la reconceptualización del cielo en Galileo fue posible debido a que tenía una experiencia visual y una idea proyectiva que, por ejemplo, Copérnico no había tenido, la pregunta que surge es: ¿cómo pudieron Nicolás de Cusa o Giordano Bruno llegar a formular anticipaciones de la *solución galileana*? Lo interesante es que ambos pensadores también estuvieron, como lo adelanté en el Capítulo 8, en contacto con los cambios que estaban teniendo lugar en el arte italiano y, en particular, tuvieron un vínculo estrecho con el desarrollo de la perspectiva.

Cabe recordar que Nicolás de Cusa pasó varios años de su vida en Italia, con cuyo clima cultural tomó contacto. Parte de su formación la recibió en Padua (entre 1417 y 1423), universidad de la República de Venecia. Allí, Nicolás estudió derecho y matemáticas, a la vez que recibió formación en física y astronomía de parte de eminentes figuras de la época, entre quienes se destacaba Pablo Toscanelli (1397-1482). Años más tarde, continuó su contacto

⁶⁰ Pumfrey (2009) buscó establecer que los dibujos de Harriot tenían tales características porque su objetivo era calcular la libración lunar y que por ello es incorrecto compararlos con los de Galileo, que perseguían otros fines. Si bien me parece pertinente su reclamo de no señalarlos como “inferiores” a los de Galileo, a los fines de este trabajo, su señalamiento no cambia el hecho de que los dibujos muestran una sensibilidad distinta al espacio; aun buscando establecer la libración, no había motivos para que dejara de representar las profundidades como tales, si acaso era capaz de percibirlas.

con los desarrollos intelectuales que tenían lugar allí, al punto que Hopkins se atreve a señalar que: “Dentro del sincretismo de la teoría de Nicolás de Cusa, debe dársele mayor prominencia a una figura histórica: León Battista Alberti, por cuyas obras *De Pictura*, *Elementa Picturae* y *De Ludi Mamematici* Nicolás fue aparentemente influenciado” (Hopkins 1996, 51-2).

Si bien se refiere sobre todo a la influencia que puede ser detectada en obras posteriores a *De Docta Ignorantia* como *De Visione Dei* y *De Staticis Experimentis* (a las que no fue necesario referir en el Capítulo 8), cronológicamente es perfectamente posible que esta influencia hubiera tenido lugar ya en aquélla. Riedenauer parece ir en esa línea al señalar que se puede establecer un parangón entre la epistemología del Cusano y la perspectiva linear, y que hacia la época de *De Docta Ignorantia* ya había comenzado la transferencia del “fenómeno de la vista natural a la vista de la mente” (Riedenauer 2005, 284). Señala que, más tarde, la obra del Cusano presentaría todavía un mayor grado de síntesis con la de Alberti, en el mismo sentido que lo había anticipado Santinello (1958) y que más recientemente continuó estudiando Carman (2007; 2014).

El caso de Giordano Bruno es quizá todavía más claro. Ya Panofsky señaló el fuerte paralelismo entre los cambios que estaban teniendo lugar en el ámbito artístico y en el pensamiento abstracto⁶¹, y mucho más cerca en el tiempo, Ordine (2008) realizó un completo estudio sobre los vínculos del Nolano con las artes figurativas y la literatura de la época, enfatizando el valor de la pintura como metáfora en la obra bruniana. Pero quizá el más pertinente

⁶¹ Dice al respecto: “En los mismos años en que la espacialidad del Giotto y del Duccio, análoga a la concepción en transición de la alta escolástica, estaba siendo superada mediante la gradual elaboración de la verdadera perspectiva central con su espacio ilimitadamente extenso y organizado en torno a un punto de vista elegido a voluntad, el pensamiento abstracto llevaba a cabo de un modo abierto la ruptura, anteriormente velada, con la visión aristotélica del mundo, renunciando a la concepción de un cosmos construido en torno a centro de la tierra, es decir, en torno a un centro absoluto y rigurosamente circunscrito por la última esfera celeste, desarrollando así el concepto de una infinitud, no solo prefigurada en Dios, sino realizada de hecho en la realidad empírica [...] no es de sorprender que un hombre como Giordano Bruno dotara de una sublimidad casi religiosa este mundo de la espacialidad infinita” (Panofsky 2003, 47).

estudio a este respecto es el realizado por Vidal y Burucúa, en el que se concluye que hacia la composición del *De Inmenso et Innumerabilis* (de 1591), Bruno había abandonado la convicción de “la insuficiencia demostrativa de la visión matemática, certeza que le ocluyó en principio la posibilidad de pensar el *punctum concursus* [punto de fuga] como ‘representación’ visual del infinito” y había “integrado los datos de la visibilidad y la representación perspectiva entre los elementos probatorios más poderosos de la infinitud del universo” (Vidal y Burucúa 2004, 146).

A la par de suscribir esta tesis, parece necesario complementarla con lo siguiente. Si bien pudo haber obstaculizado la comprensión del punto de fuga como representación del infinito, la insuficiencia demostrativa no lo había llevado a descuidar el valor que tenía que sus hipótesis fueran consistentes con la observación, señalado en el Capítulo 8. En todo caso, la diferencia parece ser que mientras previamente debía aducir que la visión engañaba, hacia el *De Inmenso* encontraba el fundamento empírico de tal engaño que le permitía invertir la carga de la prueba. De modo que, respecto del horizonte, la mutación epistemológica hacia una consideración del valor de la visión estaba posiblemente en germen ya en los diálogos del ‘80, aunque con otro carácter.

Lo que es claro es que, en todo caso, esa reivindicación del valor cognoscitivo de la visión le permitió profundizar, sistematizar y robustecer los argumentos que se seguían de sus consideraciones metafísicas. Así:

“En cualquier región de la Tierra donde yo esté, me parecerá / que el Oriente y el Occidente se encuentran a la misma distancia. / Pues la misma imagen me aparece aquí y allá, / capto con mayor cautela la condición de la vista, / que irradia sus rayos con la misma fuerza por todo su alrededor / y con igual potencia se difunde por igual en todas partes / y así configura la imagen, o sea que define el espacio por sí mismo, / el cual, dondequiera que vaya sin límite contiene todas las cosas. / No por eso la vista miente, por cuanto indica / todo aquello que puede mostrar mediante sus rayos iguales/ y dondequiera que vayas conserva la misma medida” (Bruno 1980, 449).

Que este tipo de consideraciones vinieran de la mano de elucubraciones sobre la forma en la cual debe ser interpretado el horizonte visual a partir de las investigaciones realizadas en el ámbito de la perspectiva⁶², permite entonces respaldar la idea de acuerdo con la cual, detrás de estas anticipaciones a la *solución galileana* también puede detectarse al cambio artístico.

Con ello, se puede sumar al arte al conjunto de cambios que señalé como anteriores y exteriores al cambio astronómico. Aquí no parece pertinente hablar de instigación o fomento del cambio astronómico por parte del artístico; el arte parece haber sido, más bien, un facilitador dados los elementos que proveía para racionalizar la impresión visual subjetiva, la que pudo servir de fundamento para una concepción de un mundo infinito empírica (y sólidamente) fundada.

⁶² Se puede leer, por ejemplo: “Entre quienes definen la extensión del horizonte artificial, algunos estiman que la vista perfecta se extiende aproximadamente unos sesenta pasos, otros setenta, otros aun más de mil o menos de ello; pero, según veremos, las diferencias del horizonte [artificial] respecto del mayor natural y mundano, dependen de la estatura de las observadores y de las diferentes ubicaciones” (Bruno 1980, 527).

CONCLUSIONES

La Tesis I de este trabajo establecía que el término “horizonte” expresó a lo largo de su historia un concepto astronómico indispensable para el ordenamiento de la experiencia observacional que, si bien siempre refirió al límite entre lo observado (u observable) y lo no observado (o no observable), padeció cambios en su sentido; dichos cambios sintetizan los cambios fundamentales de las teorías o sistemas en las que se encontró inscripto.

Justifiqué tal consideración de manera sucinta en la Introducción y, con detalle, en la primera parte del trabajo. Allí señalé que el concepto *horizonte* estaba presente ya en las primeras formulaciones de la tradición griega, primero mediante circunlocuciones (Autólico, Arato), luego mediante formulaciones técnicas (Euclides, Gemino, Manilio). También indiqué su relevancia en la obra de Ptolomeo, en la tradición medieval que la recuperó (Grosseteste, Sacrobosco), y en las formulaciones modernas que la discutió (Copérnico, Brahe, Galilei).

En el recorrido histórico, mostré cómo el concepto *horizonte* se encontraba íntimamente vinculado con otros conceptos que los astrónomos utilizaban para describir y explicar los movimientos celestes, en especial aquellos que hoy se consideran propios de la *astronomía de posición*: *esfera, ecuador, eclíptica, coluros, polos, equinoccio, cenit, nadir, meridiano*, por solo mencionar los más utilizados.

Lo analizado en la primera parte me permitió sustentar también la Tesis II, según la cual es posible detectar que entre 1543 y 1624 tuvieron lugar cambios en el sentido del concepto *horizonte* que fueron necesarios para neutralizar el argumento ptolemaico que apelaba a la *experiencia de la bisección de la esfera celeste por el horizonte*. Este argumento señalaba que los fenómenos celestes solo eran compatibles con una Tierra ubicada en el centro de la esfera de las estrellas fijas, dado que el horizonte la dividía al medio (al

igual que a todos sus círculos máximos). La postulación por parte de Copérnico y Galileo de un sistema en el que la Tierra necesariamente se encontraba desplazada del centro del universo demandó que hallaran una respuesta a este argumento. Argumenté que, históricamente, las estrategias desarrolladas por Copérnico y por Galileo para compatibilizar la teoría con la observación fueron diferentes.

La respuesta copernicana al argumento de la bisección apelaba a una hipótesis *ad hoc*. Salvaba las apariencias mediante la postulación de una esfera de las estrellas fijas más grande de lo que se aceptaba hasta aquel entonces; ello le permitía señalar que el hecho de que el horizonte bisecara a la esfera de las estrellas fijas (y a todos sus círculos máximos) era consistente con una Tierra que distara del centro tanto como distaba del Sol. En tal contexto, el argumento de Ptolomeo seguía vigente: el observador se encontraba relativamente en el centro de la esfera dado que su desplazamiento del centro debía ser, para salvar los fenómenos, necesariamente despreciable comparado con el tamaño de la esfera de las estrellas fijas.

La respuesta galileana, en cambio, consistía en concebir que la esfera celeste bisecada por el horizonte no era sino la forma en la que el universo se proyectaba sobre el observador. Ello la convertía, (junto con todos los círculos máximos que la componen) en una mera disposición angular sobre el ojo de quien observa. Por tal motivo, el hecho de que el horizonte la dividiera al medio dejando 180° a cada lado no constituía prueba de nada relativo a la posición del observador, pudiendo encontrarse en cualquier punto del universo.

Este desarrollo histórico considerado a propósito de la Tesis II permitió, dado lo enunciado en la Tesis I, sostener la Tesis III según la cual en los siglos XVI y XVII coexistieron tres diferentes *sentidos* del concepto *horizonte*: *ptolemaico*, *copernicano* y *galileano*. La segunda parte del trabajo permitió esclarecer la naturaleza de las diferencias entre tales sentidos del concepto; en especial, el trabajo realizado mediante los *dynamic frames*. Con ellos, pude

describir con claridad el grado de continuidad y ruptura entre los conceptos de Ptolomeo, Copérnico y Galileo (de acuerdo con lo señalado en la Tesis VI).

Las continuidades entre Ptolomeo y Copérnico quedaron manifiestas. Para ambos, existía una única esfera celeste que se encontraba a una determinada distancia y cuya bisección por parte del horizonte era indicativa de la posición relativa del observador en el universo. La diferencia era que la distancia a la que se encontraba dicha esfera era mayor para Copérnico y que para él su movimiento era aparente mientras que para Ptolomeo era real. Para Galileo, en cambio, existían tantas esferas como observadores posibles, su distancia al ojo del observador era indeterminada y el hecho de que el horizonte la bisecara no era prueba de nada relativo a su posición en el universo. Galileo volvía necesariamente verdadero al enunciado “el horizonte biseca a la esfera de las estrellas” y disolvía con ello la aspiración de quienes lo usaban como evidencia para probar la centralidad de la Tierra.

Mostré que la clave para entender las distintas interpretaciones de la experiencia de la bisección estriba en el hecho de que cada una depende de los conceptos de astronomía de posición utilizados para describirla: *horizonte*, *esfera*, *ecuador*, *eclíptica*, *polos* entre otros. Los cambios en tales conceptos, que reflejaban la relativización de las posiciones en el espacio por parte de la concepción galileana, convertían al enunciado “el horizonte biseca a la esfera de las estrellas” en un juicio necesariamente verdadero. El horizonte, dados los significados de los conceptos *horizonte* y *esfera*, no podía sino bisecar a la esfera dado que ambos tenían centro necesario en el ojo del observador; esto era muy distinto de lo que ocurría con Ptolomeo y Copérnico.

Las consideraciones epistemológicas de la segunda parte permitieron también juzgar el papel que tuvieron la teoría y la observación en el desarrollo histórico del argumento y en el cambio conceptual estudiado, lo que permitió sostener las Tesis IV y V.

En primer lugar, y conforme a la Tesis IV, mostré que la *bisección de la esfera celeste por el horizonte* constituye un fenómeno que, estrictamente, no

pudo ser observado; por una parte, porque la observación en el horizonte acarrea serias dificultades debido a cuestiones climáticas y geográficas (de las que dejan constancia las propias fuentes de los astrónomos antiguos y medievales) y, por otra, porque la refracción atmosférica hace que un observador no vea exactamente la mitad del cielo. El hecho de que durante unos mil quinientos años ello no conmoviera el argumento que apelaba a que se veía exactamente la mitad del cielo muestra que la *base empírica* del argumento no era independiente de la teoría que la utilizaba.

En segundo lugar, y conforme a la Tesis V, mostré que tampoco fueron nuevas observaciones las que condujeron a la eliminación del carácter crucial de la experiencia de la bisección. La *descrucialización* fue, ante todo, el resultado de un cambio en los conceptos utilizados para describir la experiencia. Y, dado que Copérnico y Galileo ofrecieron dos soluciones distintas al mismo problema en el marco de una misma teoría astronómica sobre el movimiento de los cuerpos celestes, difícilmente el cambio teórico pueda ser invocado como la única causa del cambio conceptual.

El análisis epistemológico llevado adelante en la segunda parte del trabajo sirvió entonces como fundamento para delimitar el tipo de explicación necesaria para dar cuenta del cambio conceptual. De modo que pareció pertinente ponderar aspectos que estuvieran más allá de la teoría de las teorías planetarias en disputa en ese momento, lo que condujo evaluar primero y luego sostener las Tesis VII y VIII.

Para tal indagación, en la tercera parte recorrí tres ámbitos disciplinares distintos: la cosmografía, la metafísica y la pintura. En un primer momento, el criterio de selección estuvo asociado a que en todos estos ámbitos disciplinares podía advertirse el uso del término “horizonte”. Una aproximación más detallada, permitió establecer que, de manera más o menos directa, todas esas disciplinas se encontraban problematizando aspectos vinculados al concepto *horizonte* en este período. Tal selección, no obstante, no presupone que estos hayan sido los únicos tres ámbitos de interacción con

el ámbito astronómico. Sin ir más lejos, el parangón con el *experimento de la torre* trazado en el Capítulo 5 es sugestivo respecto del vínculo entre el cambio astronómico y el físico (que no fue profundizado en este trabajo). De manera que estos tres espacios fueron considerados no con la aspiración de hallar una explicación última, sino con el objetivo de responder a la pregunta sobre si la comprensión y la explicación del cambio conceptual en astronomía pueden ser favorecidas por el estudio de factores externos que pudieron haberlo condicionado.

Señalé que la expansión ultramarina requirió, por vía de la cosmografía, del desarrollo de una astronomía con una precisión hasta ese entonces sin precedentes, por lo que instigó cambios que condujeron a una jerarquización de la observación en contraste con que ocurría, al menos con respecto a este argumento, en la astronomía de los períodos antiguo y medieval. Fue también la expansión la que desafió las premisas de acuerdo con las cuales se concebía y representaba la Tierra dado que fue elocuente respecto de la inexistencia de lugares privilegiados al destruir la idea de *oikouménē* vigente desde los griegos. El paralelismo entre dicho proceso y la sospecha de inexistencia de posiciones privilegiadas en el universo que tuvieran propiedades singulares es no solo producto de una conjetura actual. Señalé cómo algunos pensadores del período indicaban a tal consideración terrestre como inspiración y argumento respecto de lo celeste.

Por otra parte, mostré que en el ámbito metafísico-teológico se había arribado con anterioridad al ámbito astronómico a respuestas al argumento ptolemaico. Tanto Nicolás de Cusa como Giordano Bruno postularon universos infinitos como producto de sus concepciones metafísicas y teológicas, y habían logrado (posiblemente con mayor éxito el Nolano), señalar que el fenómeno de la bisección no constituía prueba de la centralidad de la Tierra en el universo, sino solamente de la centralidad del observador respecto de las apariencias que lo circundan. En este sentido, especulaciones ajenas al ámbito astronómico propiamente dicho fueron escenario de propuestas que eran

anticipatorias de la solución galileana al problema de cómo compatibilizar la bisección con el descentramiento.

Por último, señalé que las innovaciones técnicas vinculadas con la representación pictórica en el contexto del Renacimiento contribuyeron al desarrollo de un nuevo sentido de la relación entre apariencias perceptivas y realidades espaciales. La *perspectiva artificialis* favoreció el desarrollo de una idea proyectiva y fomentó las investigaciones en torno al comportamiento de lo observado conforme varía la posición del observador. Es esta misma idea proyectiva la que subyace a la solución ofrecida por Galileo al problema de cómo compatibilizar las observaciones con una Tierra descentrada en el universo, a partir de la comprensión de cómo se encuentran centradas respecto del observador terrestre.

Estos cambios, con fuertes vínculos entre sí, se dieron todos en un mismo intervalo de tiempo. La disposición diacrónica, por otra parte, permite establecer que los cambios astronómicos fueron en estos casos posteriores a los cambios en otras disciplinas. Un análisis que profundice más en las transformaciones en estos otros ámbitos, posiblemente permita dilucidar si las influencias fueron de alguna disciplina sobre otras, o si todas ellas fueron determinadas por algún cambio más general. Esto, desde luego, excede los objetivos de trabajo y posiblemente requiera una elaboración colectiva a largo plazo mucho más profunda y extensa que la esbozada en esta tercera parte del trabajo.

Pero lo señalado hasta aquí permite responder afirmativamente a la pregunta sobre si la comprensión y la explicación del cambio conceptual en astronomía pueden ser favorecidas por el estudio de factores externos al ámbito astronómico. Esto me condujo a sostener la Tesis IX: desconocer las relaciones entre conceptos científicos de distintas disciplinas y entre conceptos científicos y no científicos inhibe la comprensión de las dinámicas asumidas por los conceptos en los procesos de cambio conceptual. Desde luego, dado su carácter universal, tal tesis no puede seguirse necesariamente

de un estudio particular. Pero considero que el caso aquí estudiado le ofrece un fuerte apoyo.

En el futuro, esta investigación puede proyectarse buscando comprender mejor los vínculos entre los cambios conceptuales que tuvieron lugar en la astronomía y los que tuvieron lugar en otras disciplinas, científicas o no científicas. Esto puede hacerse para el mismo período estudiado aquí, considerando en profundidad posibles interacciones con disciplinas que en este trabajo fueron consideradas solo superficialmente o intentando completar el estudio mediante el estudio pormenorizado de otros conceptos astronómicos. O también puede hacerse buscando avanzar en el tiempo sobre los cambios del concepto *horizonte* que tuvieron lugar a partir de los *Principia* de Newton señalados en la Introducción.

El estudio del cambio conceptual se mostró como un camino fértil para tales propósitos. Su análisis se ofrece como un interesante instrumento para la comprensión y explicación filosófica del cambio científico, y su abordaje desde una perspectiva histórica lo potencia. El trabajo realizado aquí constituye un esfuerzo por mostrar este camino es no solo posible, sino también deseable.

APÉNDICE

En este apéndice, expondré (en Ap.1) los conocimientos comunes de astronomía de posición a los que apela el argumento ptolemaico, tanto aquellos presentes en *Almagesto I.1* a *I.4* como otros que Ptolomeo no consideró necesario anteponer pero que es preciso conocer para entenderlo. Realizaré (en Ap.2) una reposición y explicación paso a paso del argumento de Ptolomeo en *Almagesto I.5*. Señalaré (en Ap.3) cuáles son los supuestos presentes en el argumento de Ptolomeo y en qué medida fueron detectados por los especialistas contemporáneos. Dispondré (Ap.4) el fragmento completo del argumento ptolemaico en la versión inglesa de G. J. Toomer y reproduciré (en Ap.5), en orden creciente de complejidad y en su lengua original, los comentarios de los especialistas contemporáneos usualmente más referidos en las producciones académicas que tratan la obra de Ptolomeo. Siempre que refiera, en los apartados Ap.1 a Ap.3, a los textos dispuestos en Ap.4 y Ap.5, indicaré entre paréntesis el número de línea dentro de cada texto, tal como fue dispuesto al ser reproducido en este apéndice.



Ap.1) Nociones preliminares

El argumento de Ptolomeo comienza diciendo “una vez que uno ha comprendido esto (...)” (L. 3). Lo que da por comprendido es lo desarrollado en los capítulos anteriores, a saber: que los cielos se mueven esféricamente (*Almagesto I.3*) y que la Tierra, considerada como un todo, también tiene forma esférica (*Almagesto I.4*); adicionalmente, da por entendidos algunos conceptos generales de astronomía de posición y del movimiento de los cielos. Por cuanto estos aspectos son relevantes para la comprensión del argumento, conviene considerarlos brevemente.

Que *los cielos se mueven esféricamente* da cuenta, fundamentalmente, del fenómeno del movimiento diario de las estrellas. Para un observador terrestre, las estrellas se mueven con el correr de las horas manteniendo las distancias angulares entre ellas (por lo que se las denominó “estrellas fijas”) y formando círculos paralelos entre sí; cada día sidéreo (algo menos de 24 horas), las estrellas vuelven a pasar por un mismo punto en el cielo del observador terrestre. Es como si estuvieran todas ellas dispuestas sobre una esfera que rota sobre su eje; tal rotación define dos polos y un ecuador. Los polos son los únicos dos puntos que no se mueven (dado que son los extremos del eje) y reciben, cada uno un nombre: polo sur y polo norte (celestes). De todos los círculos perpendiculares al eje, aquel que tiene mayor radio (que es el mismo que el de la esfera, por lo que se lo denomina *círculo máximo* y divide a la esfera en dos hemisferios) es el ecuador.

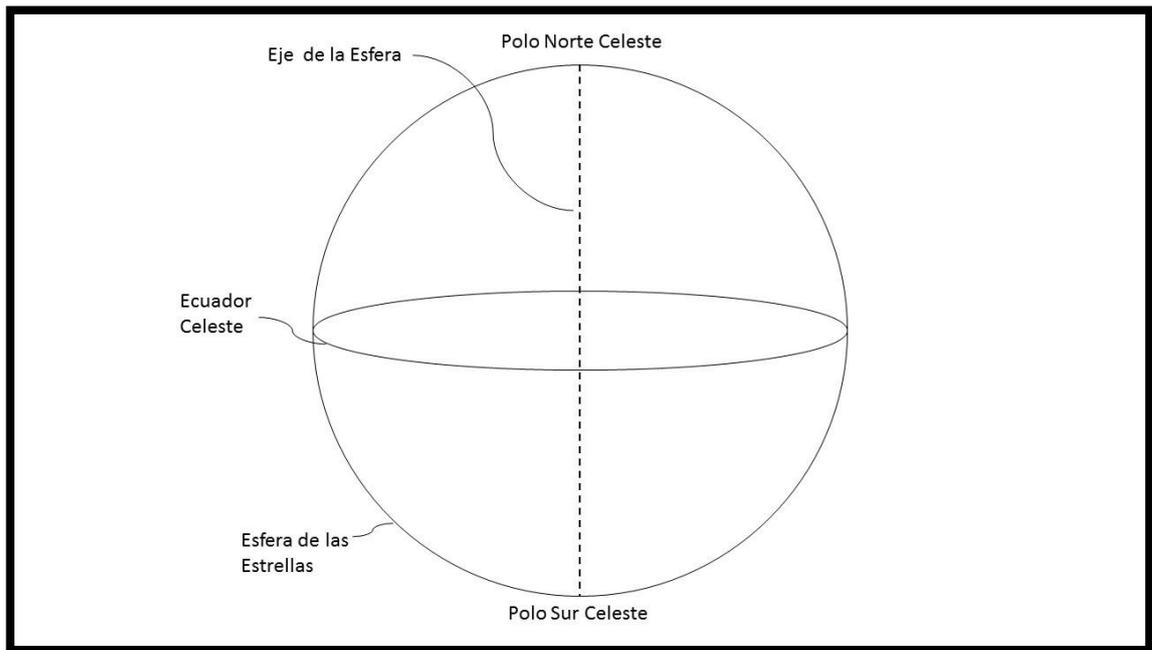


Figura A.1: eje y ecuador de la esfera celeste.

Los observadores terrestres, que se encuentran dentro de la esfera, son capaces de divisar esos dos puntos puesto que las estrellas fijas describen círculos en torno a ellos en su movimiento diario; por su parte, el ecuador es identificable puesto que está a 90° de los polos. Respecto del ecuador (o, complementariamente, desde los polos) se puede medir la *declinación* de un astro que es la distancia angular que lo separa del ecuador medida desde el centro de la esfera (que, por convención, en la actualidad asume el signo “+” para el norte y “-” para el sur).

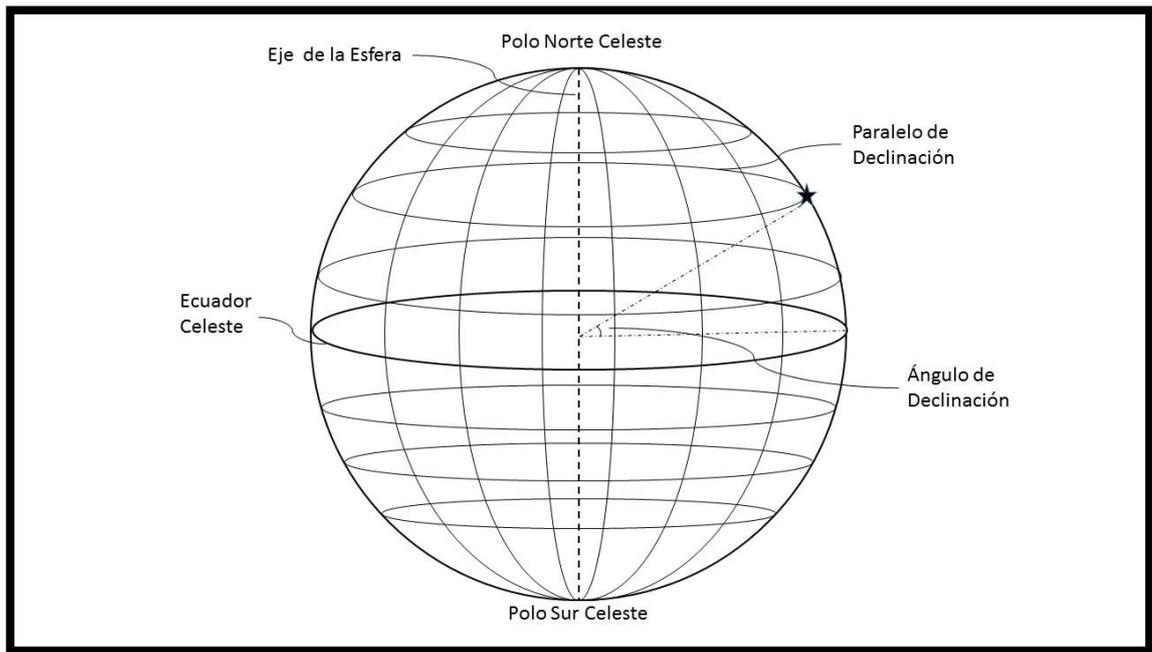


Figura A.2: esfera con paralelos y meridianos.

Adicionalmente, hay otro movimiento que da cuenta de la esfericidad del cielo y que es necesario considerar: el movimiento del sol, al que por motivos propedéuticos se lo suele distinguir en dos. Uno de esos dos movimientos consiste en que el Sol cada día salga por el oriente, se eleve en el cielo, y luego se ponga por el occidente⁶³; la declinación con la que el Sol sale un determinado día en el oriente es casi la misma que con la que se pone en occidente, siendo este movimiento *diurno* un movimiento aproximadamente paralelo al ecuador celeste (y, por tanto, aproximadamente paralelo al movimiento de las estrellas), como si fuera arrastrado por esa misma esfera. Pero ese movimiento del Sol no es exactamente paralelo al de las estrellas puesto que el Sol tiene, adicionalmente, un movimiento anual. Este movimiento consiste en un retraso del Sol respecto del fondo de estrellas que

⁶³ Quedan exceptuados de este fenómeno los observadores en los círculos polares para quienes, en algunos momentos del año esto no sucede cada día, porque hay períodos de tiempo mayores a veinticuatro horas en los que el Sol permanece sobre el horizonte, y períodos de tiempo mayores a veinticuatro horas en los que el Sol permanece debajo del horizonte.

completa en un año una vuelta sobre la eclíptica, que es un círculo máximo que corta al ecuador con una inclinación aproximada de 23.5° .

El cambio en la declinación del Sol se manifiesta en todo su recorrido diario, pero es especialmente simple apreciarlo en los momentos de salida y puesta a lo largo del año. De diciembre a junio el Sol va saliendo cada vez más al norte en el horizonte (hasta alcanzar su declinación de $+23.5^\circ$) y de junio a diciembre cada vez más al sur (hasta alcanzar su declinación de -23.5°); luego, se eleva en el cielo siguiendo un recorrido prácticamente paralelo al ecuador. Esto se puede establecer o bien observando las estrellas de fondo en la zona por la que sale el Sol (justo antes de que su luz impida observarlas), o, de manera más sencilla, tomando puntos de referencia terrestres. El instrumento más usado para tal fin es el gnomon, una vara dispuesta de manera perpendicular al horizonte (alineada generalmente mediante una línea de plomada, que garantiza que esté en dirección hacia el centro de la Tierra) que permite medir las sombras del sol; cuanto más al norte sale el sol, más hacia el sur será su sombra y viceversa. Luego, la forma en la que tales sombras se comporten dependerá estrictamente de la latitud del observador.

Al momento en que el Sol alcanza la mayor declinación hacia el norte ($+23.5^\circ$), se lo denomina *solsticio de verano del hemisferio norte* (y de invierno en el sur), y al momento en el que alcanza su declinación más hacia el sur (-23.5°), se lo denomina *solsticio de invierno del hemisferio norte* (y de verano en el sur). Ambos momentos tienen asociados un punto en la esfera, a los que se denomina *puntos solsticiales* (o, simplemente, *solsticios*), que tienen una declinación de $+23.5^\circ$ y -23.5° , y que están uno a 180° del otro. A los paralelos que pasan por cada uno de los puntos solsticiales (que es el paralelo por el que aproximadamente se desplazaría el Sol en su movimiento diario el día del solsticio) se los denomina trópicos, siendo el del solsticio de verano del hemisferio norte, el Trópico de Cáncer, y el del solsticio de verano del hemisferio sur el Trópico de Capricornio. Al círculo máximo que une estos dos puntos con el polo norte y el polo sur, se lo denomina *coluro solsticial*.

El día en el que el Sol pasa de sur a norte o de norte al sur del ecuador (esto es, cuando tiene declinación 0), sale casi exactamente en el este y se pone casi exactamente en el oeste trazando un recorrido muy aproximado al del ecuador; esto ocurre dos veces al año (en marzo y septiembre respectivamente) y, en esas fechas tienen lugar distintos fenómenos que el resto del año no: i) el día y la noche duran aproximadamente lo mismo (doce horas) para cualquier observador, ii) la noche de un observador en una latitud y la de uno en otra latitud duran lo mismo (lo que sucede también con la duración del día), y iii) la sombra del gnomon hacia el oeste (que es la que se forma a la salida) y la sombra hacia el este (que es la que se forma al ponerse) están prácticamente alineadas. A esos dos instantes del año se los denomina *equinoccios*, y se corresponden con dos puntos en el cielo, a los que se los denomina *puntos equinociales* o, simplemente, *equinoccios*. La declinación de estos puntos es 0° y se encuentran uno a 180° del otro y a 90° de los solsticios. Al círculo máximo que une estos dos puntos con el polo norte y el polo sur, también se lo denomina *coluro*, en este caso *equinoccial*.

De modo que la esfera queda compuesta del siguiente modo:

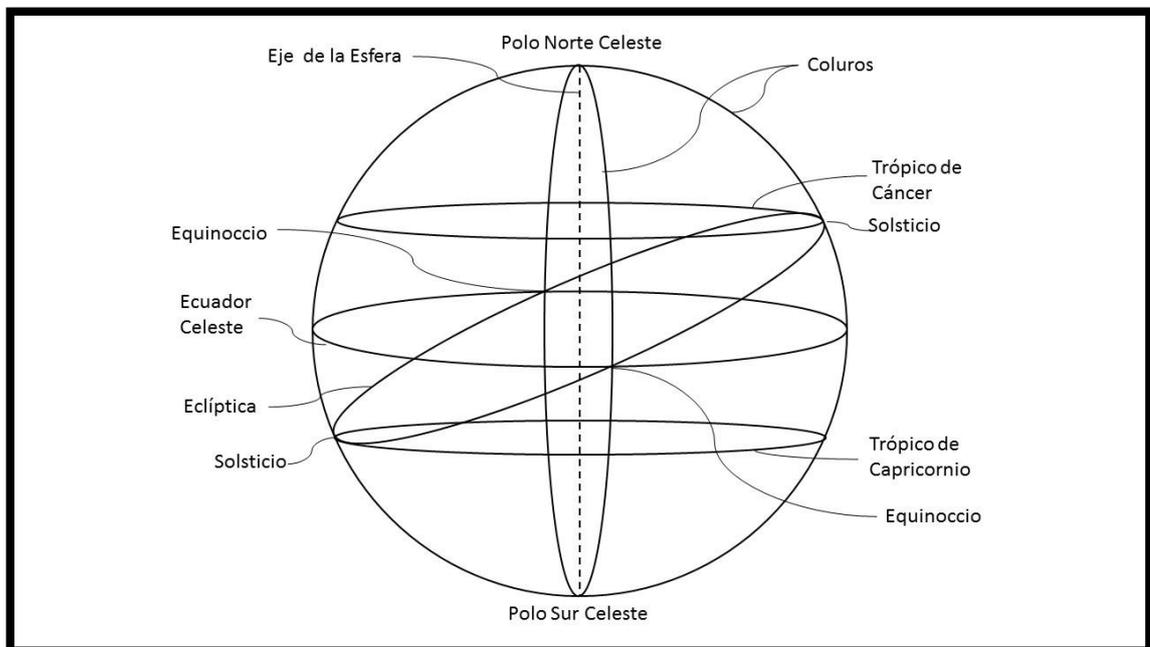


Figura A.3: círculos y puntos principales de la esfera.

Si bien es menos importante desde el punto de vista estrictamente astronómico, en la medida en que aparece en el argumento ptolemaico, conviene señalar que a la franja que rodea a la eclíptica se la denomina zodíaco, y en la tradición griega se la dividió en doce partes de 30°, cada una asociada a una determinada constelación o *signo del zodíaco*. A lo largo del año, el Sol va atravesando los distintos signos: Aries, Tauro, Géminis, Cáncer, Leo, Virgo, Libra, Escorpio, Sagitario, Capricornio, Acuario y Piscis. Y, como se sigue de lo anterior, los signos se encuentran enfrentados en el cielo de seis en seis: Aries con Libra, Tauro con Escorpio, Géminis con Sagitario, Cáncer con Capricornio, Acuario con Leo y Virgo con Piscis.

Es importante tener presente que en el movimiento diario de la esfera (de este a oeste), todos estos círculos se mueven con ella. De modo que, si bien siempre conservan sus distancias relativas y las estrellas que cada punto de la esfera tienen asociadas a cada punto son las mismas, al moverse respecto del observador, todos esos puntos se mueven. En lo sucesivo, los gráficos de la esfera serán menos cargados para poder establecer con claridad las situaciones.

El segundo aspecto que da por comprendido Ptolomeo es que *la Tierra, tomada como un todo, es esférica*. Esto es importante, porque a medida que el observador se desplaza sobre la Tierra, tiene distintas partes de la esfera celeste sobre su cabeza (punto que se denomina cenit, y que está a 90° del horizonte). Podría tener en su cenit o bien alguno de los polos, o bien algún punto del ecuador, o bien algún punto que no sea ni los polos ni el ecuador. Teniendo en cuenta que las estrellas trazan *círculos paralelos* al ecuador; en cada una de estas situaciones el movimiento estelar se manifiesta de diferente modo. En el primero de los casos, ninguna de las estrellas cruza el horizonte dado que el horizonte mismo también es paralelo al ecuador; a esta situación se la denomina *esfera paralela*, por cuanto las estrellas trazan círculos paralelos al horizonte. Se puede graficar del siguiente modo, donde el pequeño círculo negro es el observador parado sobre la superficie de la Tierra (indicada con la letra T), y el círculo gris es su horizonte:

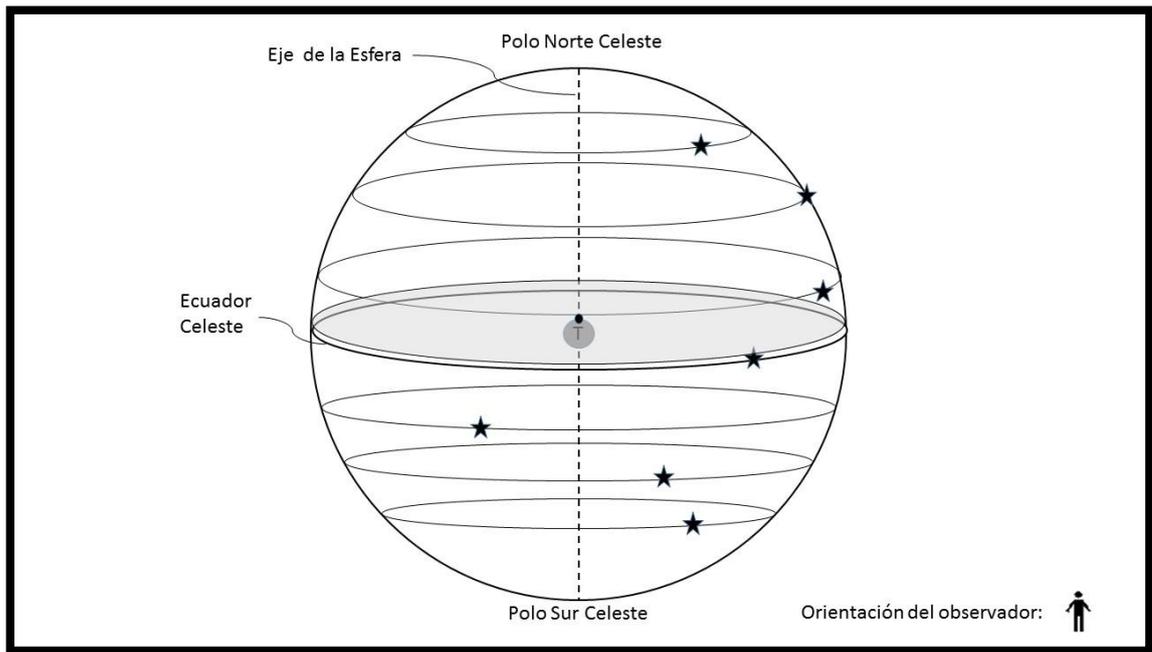


Figura A.4: esfera paralela.

En el segundo de los casos, todas las estrellas cruzan el horizonte formando los círculos que describen ángulos rectos con él (por lo que se denomina *esfera recta*). Esto se puede graficar del siguiente modo:

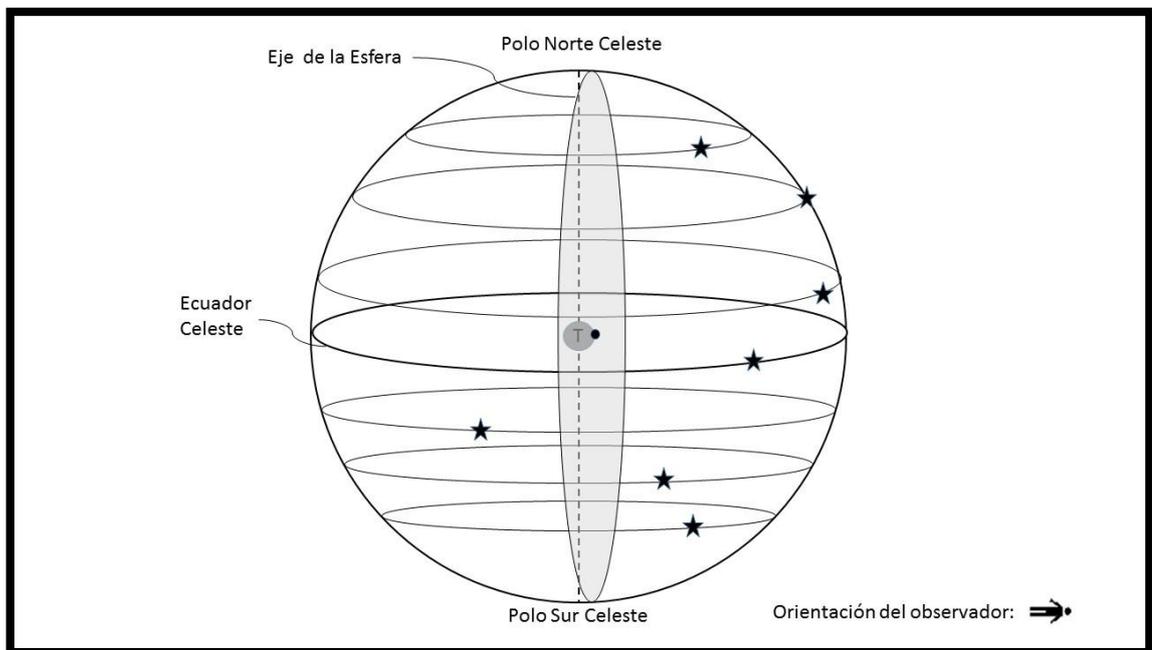


Figura A.5: esfera recta.

En el tercer caso algunas estrellas no cruzan el horizonte permaneciendo siempre visibles (a las que se denomina estrellas *circumpolares*), otras no lo cruzan permaneciendo siempre invisibles y un tercer grupo de estrellas lo cruzan formando los círculos que describen ángulos oblicuos respecto del horizonte (por lo que se la denomina *esfera oblicua*). Se puede graficar del siguiente modo, donde una vez más el pequeño punto negro es el observador parado sobre la superficie de la Tierra y el círculo gris es su horizonte:

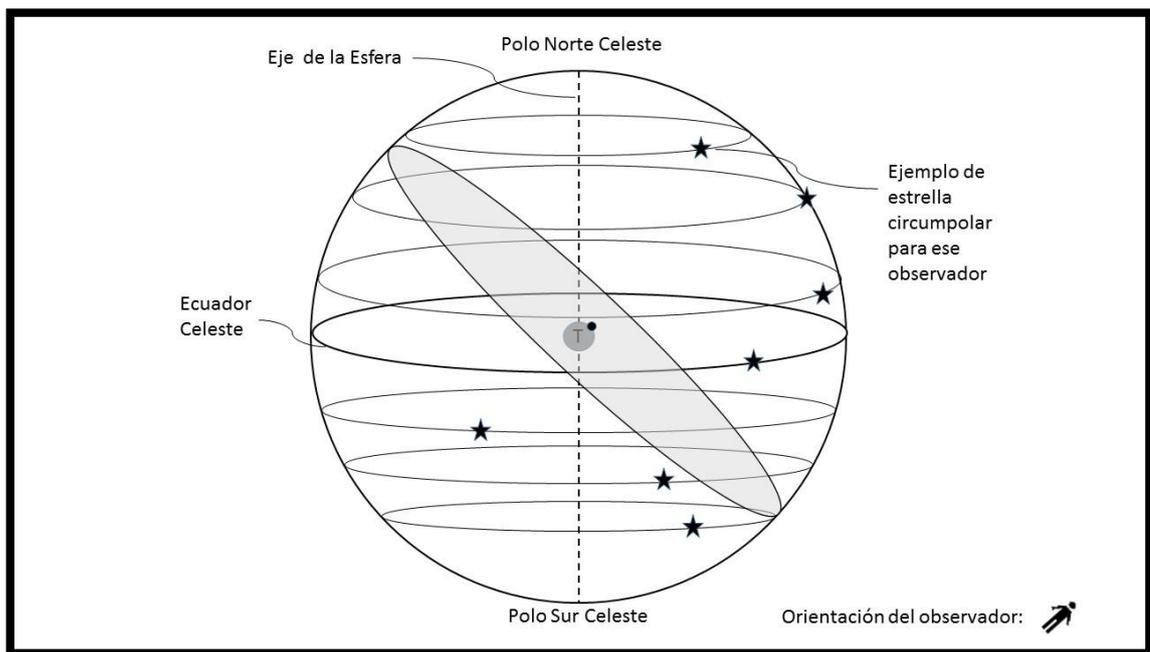


Figura A.6: esfera oblicua.

Si un observador pudiera viajar desde el polo sur terrestre hacia el polo norte terrestre por un meridiano, comenzaría estando en una esfera paralela, pasaría a una esfera oblicua, luego pasaría a una recta, luego nuevamente una oblicua, y finalmente terminaría en una paralela. Ese mismo observador, que comenzaría con el polo sur celeste en su cenit, a medida que avanzara lo vería descender detrás suyo hasta alcanzar el horizonte; en ese momento (que se daría al llegar ecuador terrestre), aparecería el polo norte delante suyo también sobre el horizonte, que comenzaría a subir sobre su cabeza hasta alcanzar el cenit cuando él llegue a las antípodas de donde comenzó su recorrido.

Excepto en la esfera paralela, las estrellas cambian su altura respecto del horizonte con el correr de las horas. Al momento en que alcanzan su mayor altura se lo denomina *culminación*, y esto ocurre cuando el astro pasa por el *meridiano* del lugar, entendido como el círculo que pasa por los puntos cardinales norte y sur del horizonte del observador y por sus puntos verticales (cenit y nadir).

Ap.2) El argumento

El argumento de Ptolomeo continúa del siguiente modo (L. 3-13):

“(…) si uno considera la posición de la Tierra, encontrará que los fenómenos asociados a ella pueden suceder sólo si asumimos que está en la mitad de los cielos, como el centro de una esfera. Porque si este no fuera el caso, la Tierra tendría que estar

[A] fuera del eje [del universo] pero equidistante a ambos polos, o

[B] en el eje pero apartada hacia uno de los polos, o

[C] ni en el eje ni equidistante de los dos polos.”

Dado lo expuesto antes, es claro entonces que no todos los puntos de la esfera son equivalentes en cuanto a su movimiento: unos no se mueven, otros sí; algunos se mueven con mayor velocidad tangencial que otros, etc. Es por ello que se pueden establecer esas cuatro situaciones alternativas. La primera es que se encuentre en el centro de la esfera (por lo que estaría en el eje y equidistante de ambos polos, justo en el plano del ecuador); la segunda (posición alternativa [A]) es que se encuentre fuera del eje, y equidistante de ambos polos, por lo que estaría en el plano del ecuador; la tercera (posición alternativa [B]), es que se encuentre en el eje y más cerca de alguno de los polos, por lo que no estaría en el plano del ecuador; y la cuarta (posición alternativa [C]) es que se encuentre en algún punto que no esté ni en el eje ni equidistante de los polos, por lo que estaría más cerca de alguno de los dos

polos y no estaría en el plano del ecuador. Tales situaciones pueden graficarse del siguiente modo:

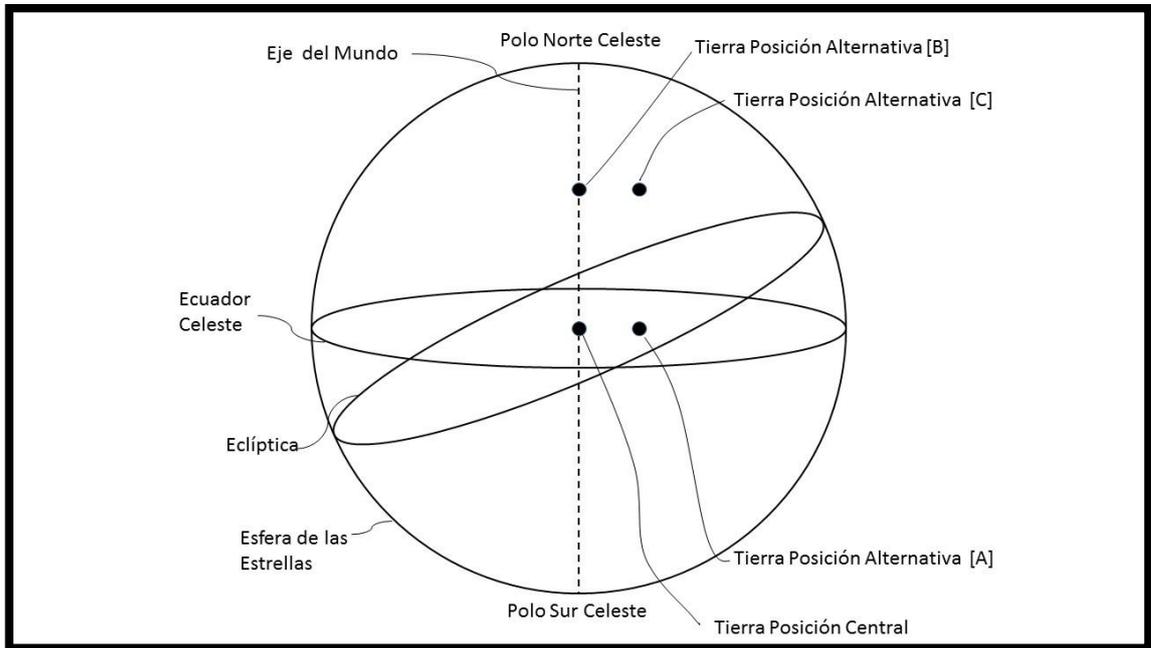


Figura A.7: cuatro posiciones alternativas de la Tierra para Ptolomeo.

En este dibujo, los desplazamientos fueron trazados sobre un mismo plano, el del dibujo, pero ello no es necesario; podrían estar más hacia el frente o hacia el fondo en el dibujo, siempre que respeten las condiciones estipuladas para cada caso

Considerado lo anterior, es posible analizar el argumento contra la primera de las posiciones alternativas según la cual la Tierra se encuentra fuera del eje y equidistante de ambos polos. Al respecto, dice Ptolomeo (L. 15-35; los ítems señalados entre corchetes en negrita son míos):

“En contra de la primera de estas tres posiciones **[A]** actúan los siguientes argumentos. Si imaginamos [la Tierra] **[A.i]** apartada hacia el cenit o hacia el nadir de algún observador, entonces, si él estuviera en una *esfera recta*, él nunca experimentaría el equinoccio, porque el horizonte siempre dividiría los cielos en dos partes desiguales, una arriba y otra debajo de la Tierra; si él estuviera en una *esfera oblicua*, o bien, otra vez, el equinoccio jamás ocurriría, o bien, [si ocurriera,] no

estaría en una posición a mitad de camino entre los solsticios de verano y de invierno, dado que estos intervalos serían necesariamente desiguales, porque el ecuador —que es el más grande de todos los círculos paralelos dibujado con respecto a los polos del movimiento [diario]— ya no sería bisecado por el horizonte; en su lugar [el horizonte bisecaría] uno de los círculos paralelos al ecuador, o bien al norte o bien al sur de él. Pero absolutamente todos están de acuerdo en que estos intervalos son iguales en cualquier lugar de la Tierra, dado que [en todos lados] el incremento del día más largo del solsticio de verano desde el día equinoccial es igual al decrecimiento del día más corto del solsticio de invierno desde el día equinoccial. Pero si, por el otro lado, imaginamos el desplazamiento **[A.ii]** es hacia el este o el oeste de algún observador, él encontraría **[A.ii.a]** que los tamaños y distancias de las estrellas no permanecerían constantes y sin cambios en los horizontes orientales y occidentales, y **[A.ii.b]** el intervalo de tiempo desde el amanecer hasta la culminación no sería igual al intervalo desde la culminación hasta la puesta. Esto está obviamente en desacuerdo con los fenómenos.”

Esta posición alternativa [A] puede darse estando la Tierra en cualquiera de los puntos del plano del ecuador. Por ello Ptolomeo propone desagregar a esta opción A en dos variantes; la primera de ellas es la que identifiqué con [i], que es el caso en que la Tierra se desplace hacia el cenit o hacia el nadir de un observador. Esa opción, luego, es analizada bajo las variantes de *esfera recta* y de *esfera oblicua*.

El primero de los casos de A.i (con *esfera recta*) sería el siguiente:

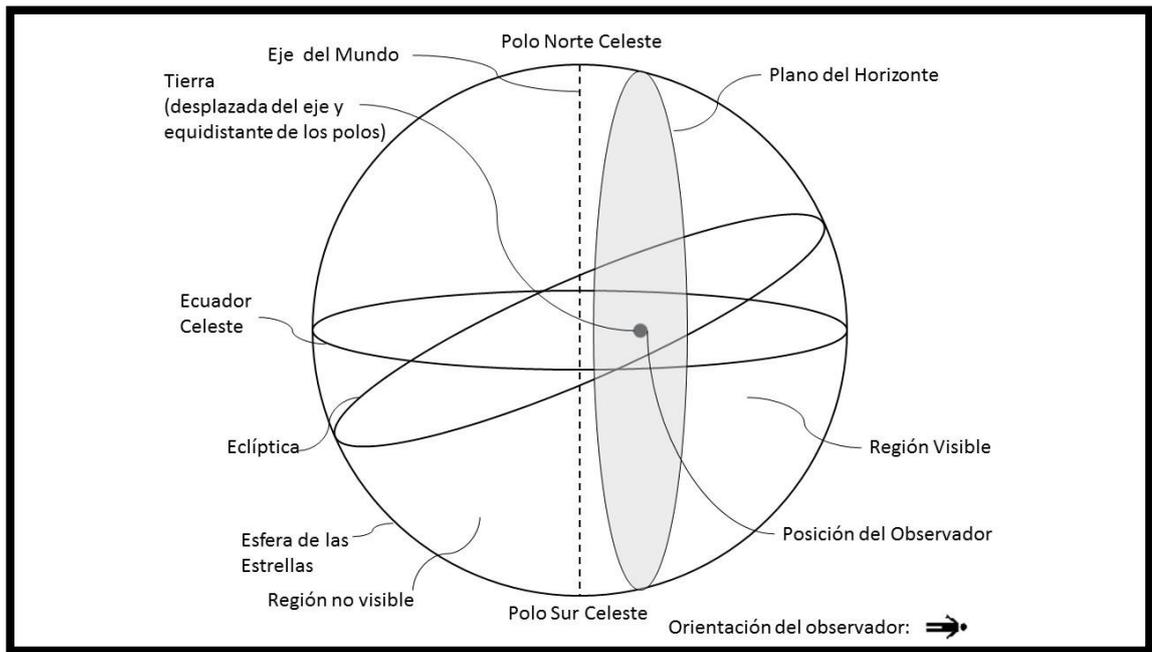


Figura A.8: posición alternativa A, con esfera recta.

En este caso es simple ver cómo, al hacer girar a la esfera sobre su eje, cualquiera sea el punto en el que el Sol se encuentre sobre la eclíptica (esto es, cualquiera sea su declinación) sería arrastrado de tal modo que quedaría o bien más tiempo arriba del horizonte o bien más tiempo debajo del horizonte. En el caso graficado, dado que la Tierra fue desplazada hacia el cenit, todo el año los días serían más cortos que las noches.

Es interesante notar que de los dos fenómenos asociados al equinoccio relativos a la duración del día y la noche señalados en Ap.1, Ptolomeo privilegia uno. Al decir que para ese observador hipotético no habría equinoccio, lo que está diciendo es que para ese observador la noche y el día no durarían lo mismo. Porque, por otra parte, las noches de ese observador hipotético y de otro en su misma longitud y diferente latitud, durarían lo mismo (al igual que sucedería con sus respectivos días).

El segundo de los casos de A.i. (con *esfera oblicua*) es en realidad un contrasentido. El caso de que se tratara de la opción "A", implicaba que la Tierra estaba en el plano del ecuador. El caso de que se tratara de "i" era que se desplazara hacia su cenit o nadir. El hecho de que A.i. tenga una variante

según la cual la esfera es oblicua, haría que o no se cumpla la condición “A” o no se cumpla la condición “i”, puesto que sería imposible que la Tierra se desplace hacia el cenit o nadir de un observador que no se encuentra sobre el ecuador y que la Tierra se mantenga sobre el ecuador. La única forma en la que cobra sentido es aquella en la que la Tierra se desplaza como con la *esfera recta* y luego el observador se desplaza hacia un punto en que la esfera sea oblicua. De modo que quede la siguiente opción:

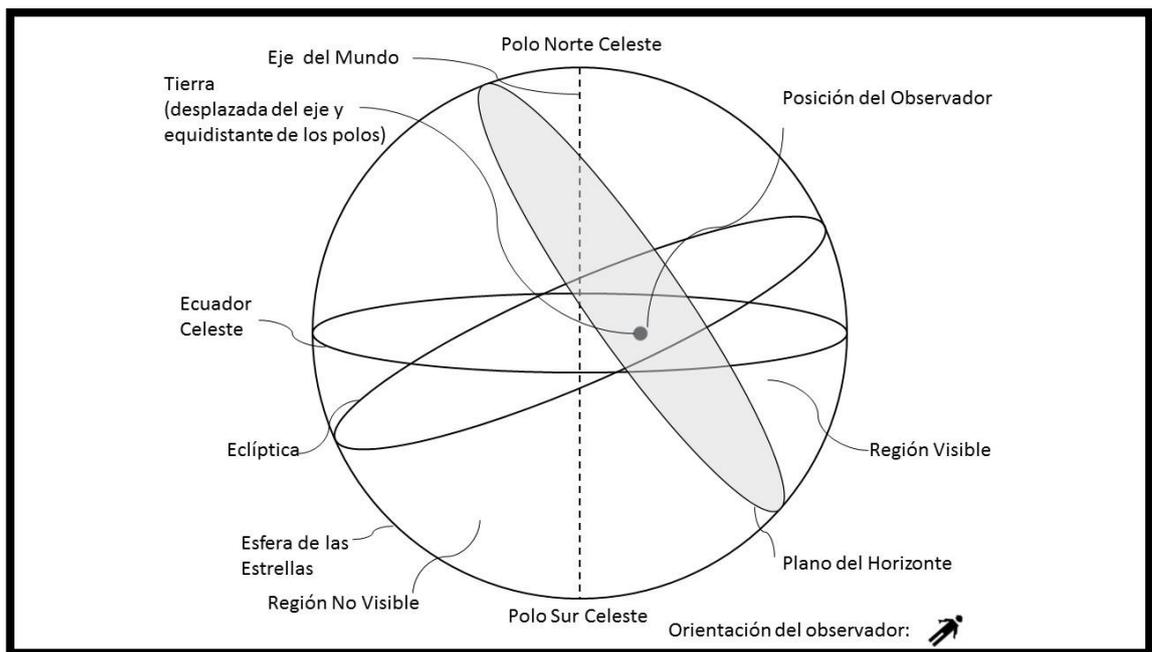


Figura A.9: posición alternativa A con esfera oblicua.

Para entender por qué el observador podría tener o no equinoccio es necesario tener presente lo siguiente. Si el plano del horizonte divide al medio a algún paralelo por el que el Sol realiza su movimiento diario (esto es, algún paralelo cuya declinación esté entre -23.5 y $+23.5$) el día en que el Sol pase por ese paralelo, se encontrará tanto tiempo por encima del horizonte como por debajo. Pero podría ocurrir que el horizonte no divida al medio a ningún paralelo con tales declinaciones, sino a alguno que esté más hacia el norte o más hacia el sur. En esos casos, nuevamente, el observador no tendría equinoccio al igual que sucede en el caso de la esfera recta. Cuanto más alejada esté la Tierra del centro, más alejado tiene que estar el observador del ecuador para poder tener equinoccio. Un observador que esté muy próximo al

ecuador, dejará de tener equinoccio por muy poco que se aparte la Tierra; uno que esté cerca del polo, tendrá equinoccio por más que la Tierra esté muy apartada.

Representaciones bidimensionales permiten verlo con claridad. En las siguientes figuras (que grafican las situaciones para un observador en el hemisferio norte), la cantidad del desplazamiento de la Tierra (T) del centro de la esfera (C) está medida desde el polo norte celeste (PNC) en distancia angular α , de 0 a 45°, siendo 0° que esté en el eje y 45° que esté en borde de la esfera; normalizado a 1 (donde 1 es el radio de la esfera celeste), la distancia C-T es equivalente a $\text{Tan } \alpha$. El ángulo φ , por su parte, establece la latitud terrestre del observador; esto es, el ángulo que existe entre el ecuador y su cenit (Z). La línea con la leyenda “Paralelo Bisecado” es el paralelo que resultaría dividiría al medio por el horizonte del observador en esa latitud; queda definido por la intersección del horizonte con el eje de rotación.

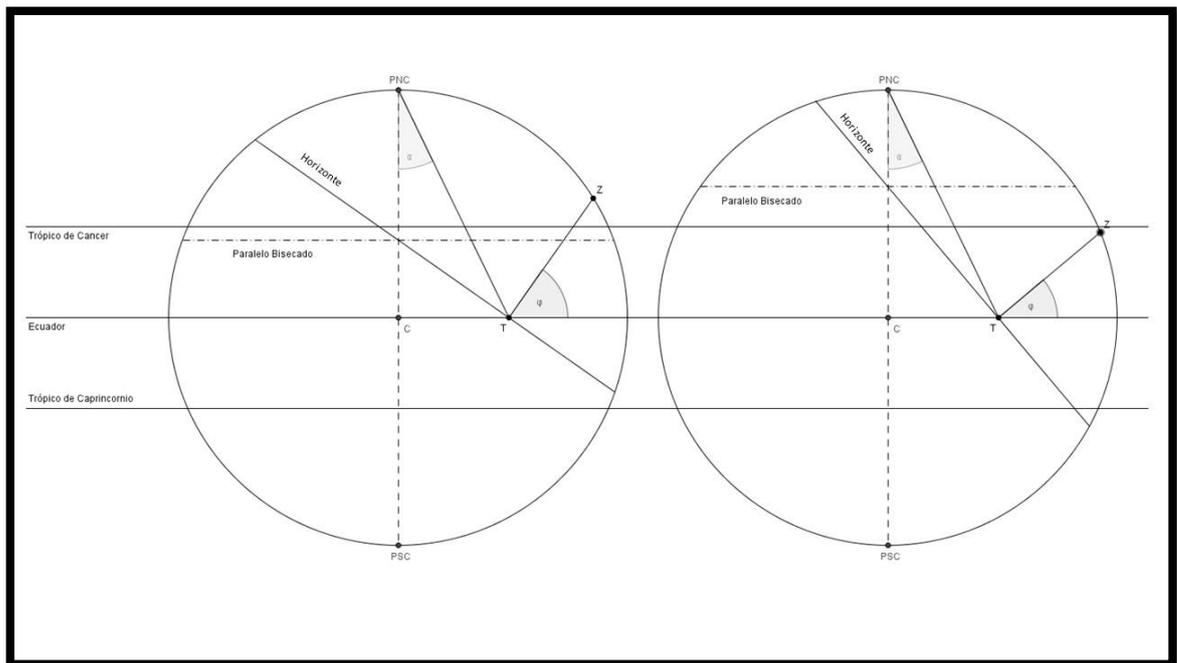


Figura A.10: paralelo bisecado según la latitud del observador.

En la Figura A.10 se comparan dos situaciones de dos observadores en diferentes latitudes en una Tierra igualmente desplazada; en la esfera izquierda el observador está algo más al norte que en la de la derecha

(expresado en que φ es algo mayor). Es posible apreciar, cómo uno de ellos (el de la izquierda) tendrá equinoccio mientras que el otro (el de la derecha) no, puesto que la declinación del paralelo bisecado en el de la izquierda se encuentra entre -23.5 y $+23.5$, el de la derecha no.

De igual modo, a dos observadores en la misma latitud, pero con Tierras desplazadas en mayor o menor proporción puede sucederles lo mismo. En la Figura A.11 dos esferas grafican la situación de dos observadores con idéntica latitud (45°N), y mientras que el de la izquierda (cuya Tierra está más aplazada) no tendría equinoccio, el de la derecha sí.

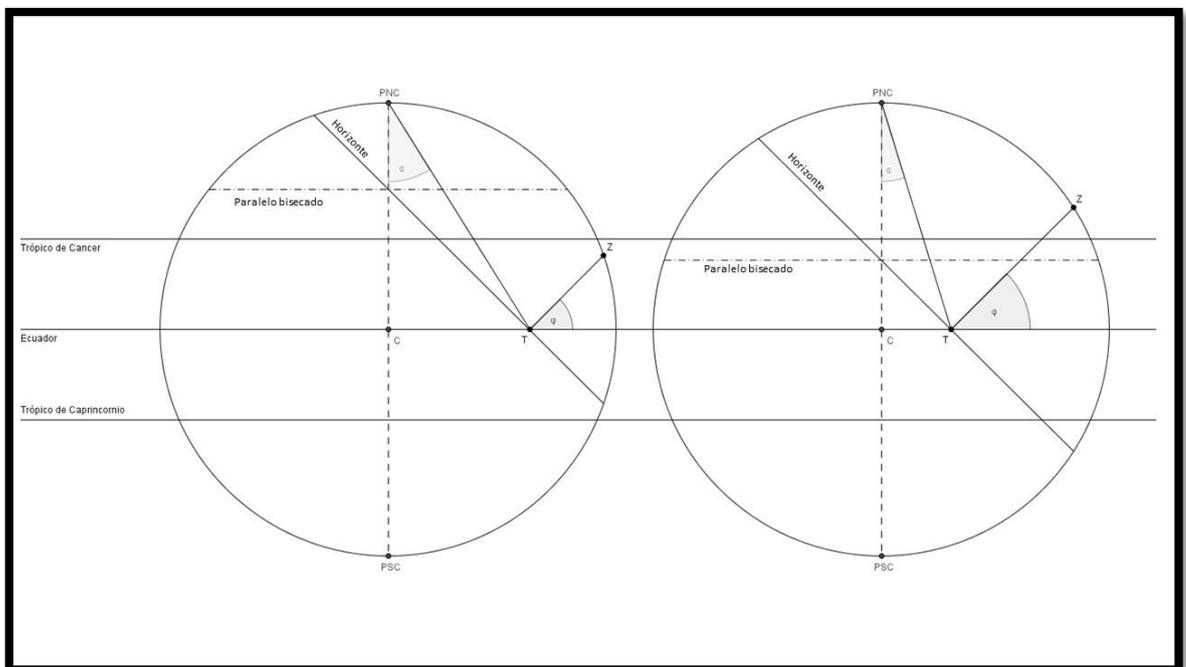


Figura A.11: paralelo bisecado según el distanciamiento relativo de la Tierra.

Se puede establecer una relación entre el desplazamiento de la Tierra y la latitud mínima que debe tener un observador para que en algún momento del año el horizonte biseque el menos un día el recorrido del Sol. Para un observador en el hemisferio norte, eso ocurriría el día en el que el movimiento diario del Sol se dé sobre el Trópico de Cáncer, que es el la mayor declinación que el Sol puede tener hacia el norte (equivalente a 23.5°). Usando trigonometría, se puede establecer que la relación que existe entre α y φ es la

siguiente (siempre que se considere que la Tierra es como un punto con relación a la esfera, tal como lo hace Ptolomeo en *Almagesto I.6*):

$$\varphi = \arctan (\tan \alpha / \sen 23.5^\circ)$$

Por lo anterior, si la Tierra estuviera, por ejemplo, a mitad de camino entre el centro de la esfera y el borde (esto es, $\alpha=22.5^\circ$), un observador en una latitud mayor o igual a 46.08° N, tendría equinoccio. Esto se puede ver en la siguiente Figura A.12:

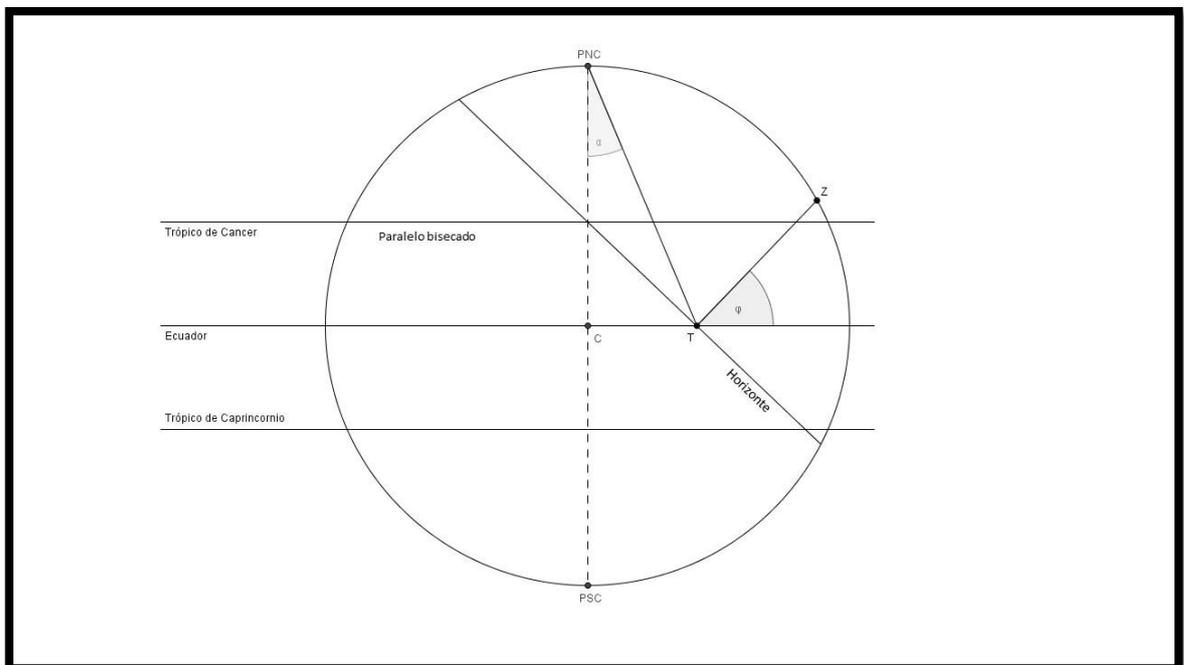


Figura A.12: latitud mínima en una Tierra igualmente distante del borde y del centro.

Un observador con una latitud mayor o igual a 68.26° tendrá equinoccio, sin importar cuán desplazada esté la Tierra del centro, dado que el valor máximo para α es 45° .

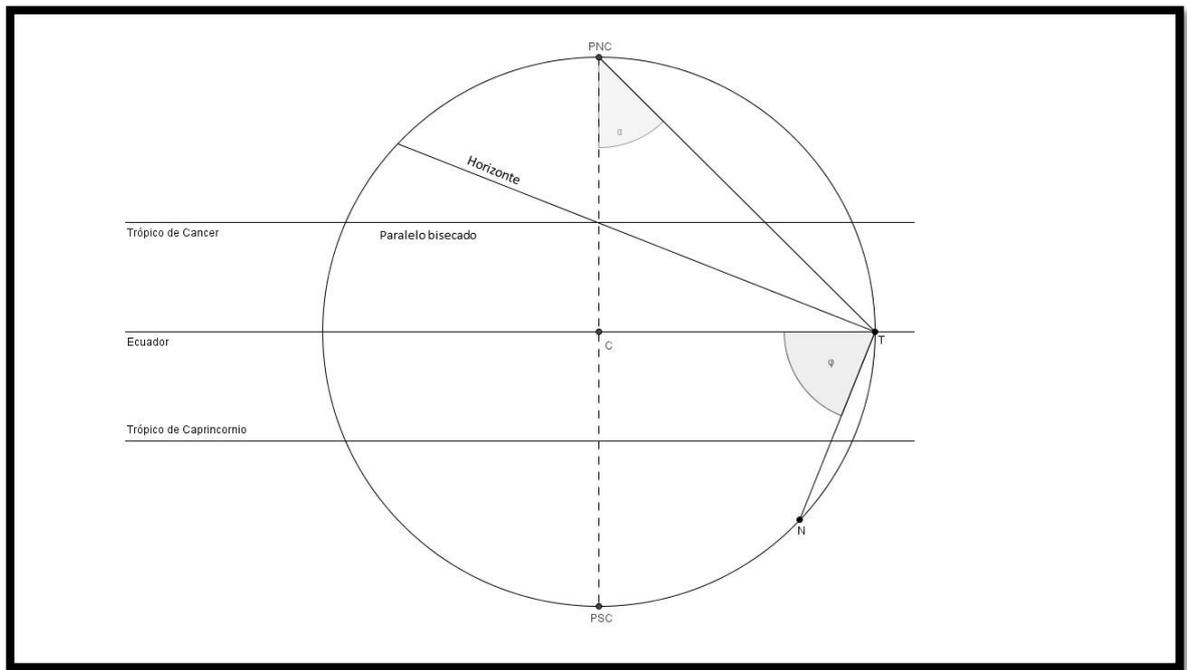


Figura A.13: latitud mínima en la que un observador siempre tendrá equinoccio.

En la Figura A.13 —en la que la latitud fue medida entre el ecuador y el nadir (N) para mayor claridad visual— se puede advertir cómo, si el observador estuviera más al norte, su horizonte cortarían a una declinación del sol cada vez más al sur

Ptolomeo no hace las cuentas. Pero no porque no dispusiera de trigonometría, dado que a estos fines era igualmente útil el cálculo con cuerdas (Neugebauer 1975). No las hace porque no es necesario: en caso de que ocurriera que el observador sí tuviera equinoccio, tal equinoccio no tendría lugar a mitad de camino entre los solsticios. El caso límite sería el estipulado recién mediante la ecuación, en el que el horizonte dividiría al medio a alguno de los trópicos; en dicho caso, el equinoccio tendría lugar el mismo día de uno de los solsticios y a seis meses del otro. Pero, más allá del caso límite, si el observador se encontrara, por ejemplo, en alguna latitud norte que dividiera al medio a algún paralelo intermedio entre el ecuador y el Trópico de Cáncer, la cantidad de días entre el equinoccio y el solsticio de verano del hemisferio norte sería notablemente menor que la cantidad de días

que habría entre el equinoccio y el solsticio de invierno de ese hemisferio. Es por ello que Ptolomeo dice (cabe reiterar):

“absolutamente todos están de acuerdo en que estos intervalos son iguales en cualquier lugar de la Tierra, dado que [en todos lados] el incremento del día más largo del solsticio de verano desde el día equinoccial es igual al decrecimiento del día más corto del solsticio de invierno desde el día equinoccial”.

Es decisivo el hecho de que los intervalos sean “iguales en cualquier lugar de la Tierra”. Porque, en efecto, si el observador estuviera ubicado perpendicular al plano del dibujo (esto es, como si lo estuviéramos observando desde su cenit), es claro que para tal observador, aun estando la Tierra desplazada en la dirección señalada, su horizonte (que coincide con el coluro que une los solsticios) sí dividiría al medio al ecuador, de modo que el Sol estaría por encima del horizonte tantas horas como por debajo, justo a mitad de camino entre los solsticios (esto es, cuando su declinación sea 0).

Es por ello que Ptolomeo requiere considerar la situación que identifiqué con [A.ii]. Para tal observador, el desplazamiento de la Tierra no hubiera sido hacia su cenit o nadir, sino hacia el este o el oeste. En el caso graficado (y suponiendo que estamos mirando desde el cenit del observador), el desplazamiento sería hacia el este.

Contra esto, Ptolomeo señala dos cosas: [A.ii.a] que los tamaños angulares de las estrellas no se mantendrían iguales con el correr de las horas y [A.ii.b] que el tiempo entre la salida y la culminación y el tiempo entre la culminación y la puesta no serían iguales. Lo primero [A.ii.a] apela a lo siguiente: si, por ejemplo —y como en el caso graficado—, la Tierra estuviera desplazada hacia el este del observador, al salir una estrella estaría más cerca que al ponerse, por lo que debería verse más grande en el este y más chica en el oeste; esto no sucede: el tamaño angular de las estrellas es constante. Lo segundo [A.ii.b] es que si el observador está más cerca o bien de la salida del astro o bien de la puesta, esto debiera poder apreciarse en el tiempo desde que el astro está en el horizonte hasta que esté en el meridiano del lugar. En el caso graficado, que

se desplazó hacia el este, el observador estaría más cerca de la salida del astro y más lejos de su puesta, por lo que el tiempo entre la salida y la culminación debería ser menor que entre la culminación y la puesta; esto también es contrario a la observación, que muestra que los tiempos entre la salida y la culminación de los astros es en todas partes igual al tiempo entre la culminación y la puesta.

Consideremos lo que dice contra la segunda posición (L.37-59):

“Contra la segunda posición **[B]**, en la cual la Tierra es imaginada como dispuesta en el eje apartada hacia uno de los polos, uno puede hacer las siguientes objeciones. Si esto fuera así, el plano del horizonte dividiría los cielos en una parte por sobre la Tierra y una parte por debajo de la Tierra que son desiguales y siempre diferentes para distintas latitudes, considere uno la relación entre la misma parte en dos latitudes distintas o las dos partes en la misma latitud. Sólo en una *esfera recta* podría el horizonte bisecar la esfera; en una *esfera oblicua* en una situación tal que el polo más cercano fuera el siempre-visible, el horizonte siempre haría la parte por sobre la Tierra más chica y la parte por debajo de la Tierra más grande; por lo tanto otro fenómeno sería que el gran círculo de la eclíptica estaría dividido en partes desiguales por el plano del horizonte. Sin embargo, es evidente que esto no es posible de ninguna manera. En su lugar, seis de los signos del zodíaco son visibles por sobre la Tierra en todos los momentos y lugares, mientras los seis restantes son invisibles; entonces de nuevo [en un momento posterior] los últimos son visibles enteramente por sobre la Tierra, mientras que en el mismo momento los primeros seis no son visibles. Por lo tanto, es obvio que el horizonte biseca el zodíaco, porque los mismos semicírculos son cortados por él, para aparecer en un momento completamente por sobre la Tierra, y en otro [completamente] por debajo de ella.”

El caso B es más sencillo que el A. Si el observador se desplazara en el sentido Norte-Sur, la cantidad de cielo que tendría por encima y por debajo de su cabeza serían a cada paso distintas. Esto, en rigor, también hubiera ocurrido en la situación A con un desplazamiento este-oeste, pero Ptolomeo prefirió no exponerlo de ese modo. El caso específico del desplazamiento

Norte-Sur es que es simple determinar que la esfera sería bisecada exclusivamente en el momento en el que el observador tuviera la misma orientación que el ecuador, como sucede en la Figura A.14.

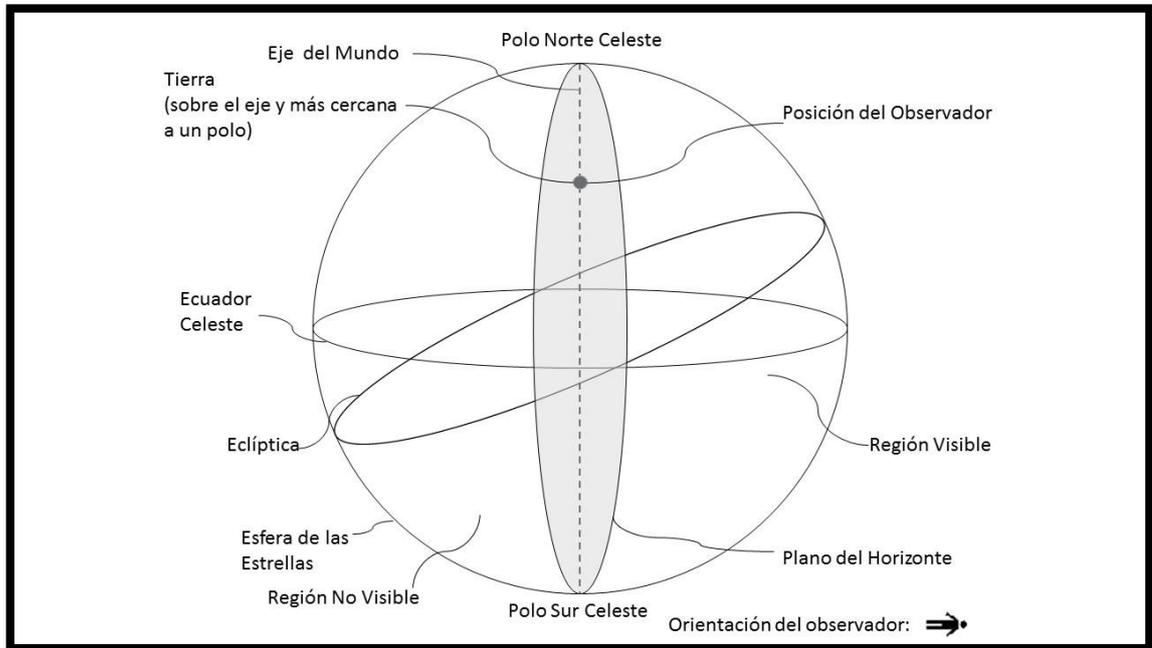


Figura A.14: posición alternativa B con esfera recta.

En los demás casos, la relación entre las dos partes en una determinada latitud terrestre o una misma parte desde dos latitudes terrestres distintas, exhibirían diferencias. Pone como ejemplo el caso en el que el observador tuviera el polo cercano visible, en la que la porción sobre el horizonte sería menor que la que se encuentra por debajo, como en la siguiente figura::

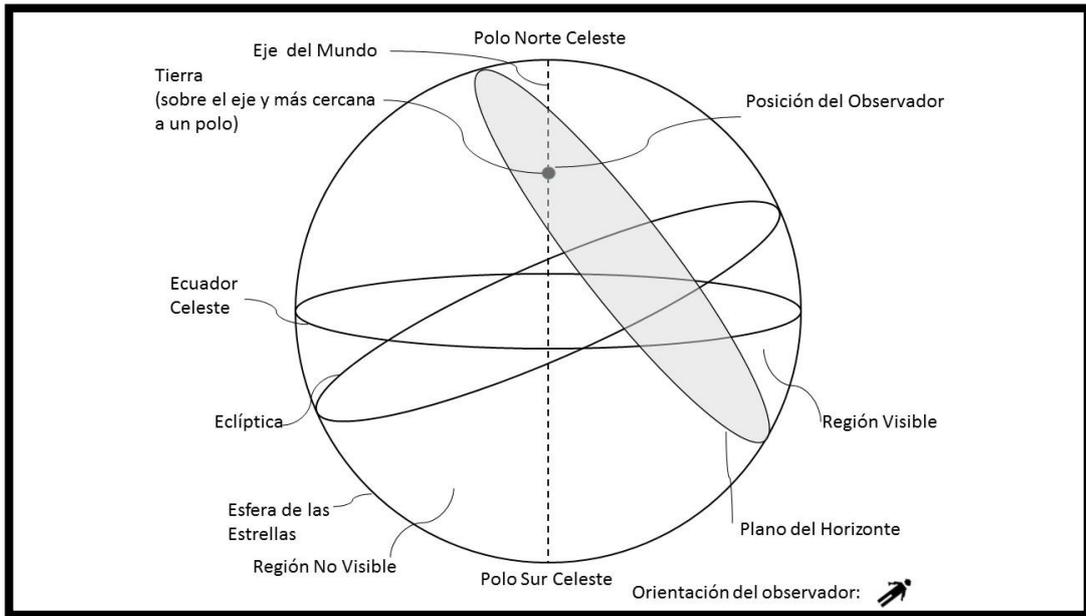


Figura A.15: posición alternativa B con esfera oblicua (1).

Y si el observador se desplazara más hacia el norte, ocurriría lo siguiente:

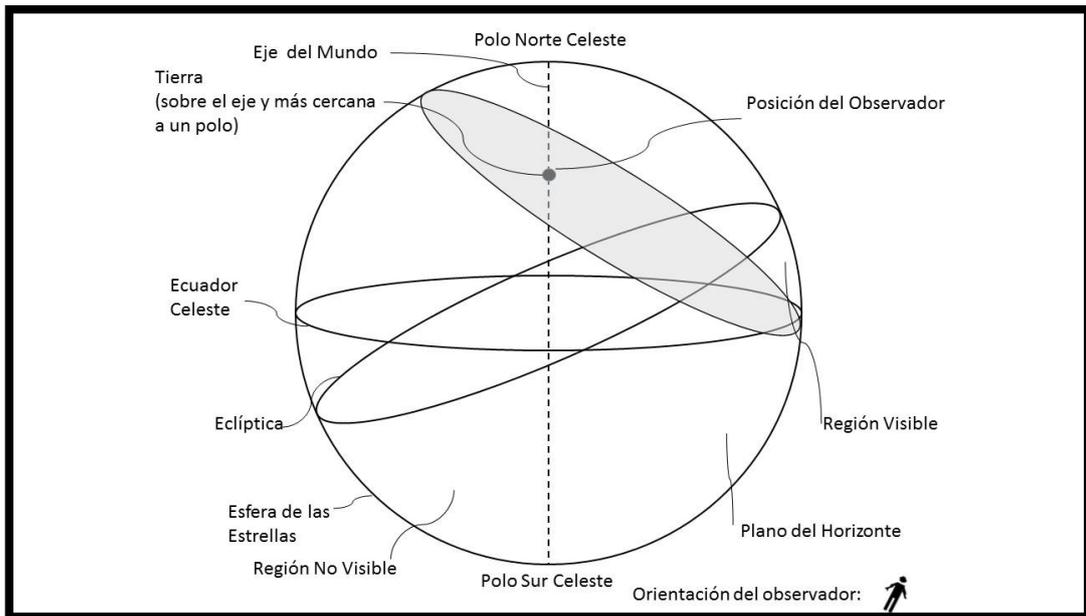


Figura A.16: posición alternativa B con esfera oblicua (2).

Ptolomeo descarta que esto sea posible por el hecho de que siempre se ven seis de los doce signos del zodiaco. Si la Tierra estuviera desplazada como los está en la Figura A.16, a medida que el observador aumenta su latitud norte debería ver cada vez menos; e incluso uno muy al norte de una Tierra lo

suficientemente desplazada no debería ver ningún punto de la eclíptica. Como podría ser la Figura A.17, en la que el horizonte deja para ese observador una región del cielo por la que la eclíptica no pasa (por lo que sería siempre de noche para tal observador):

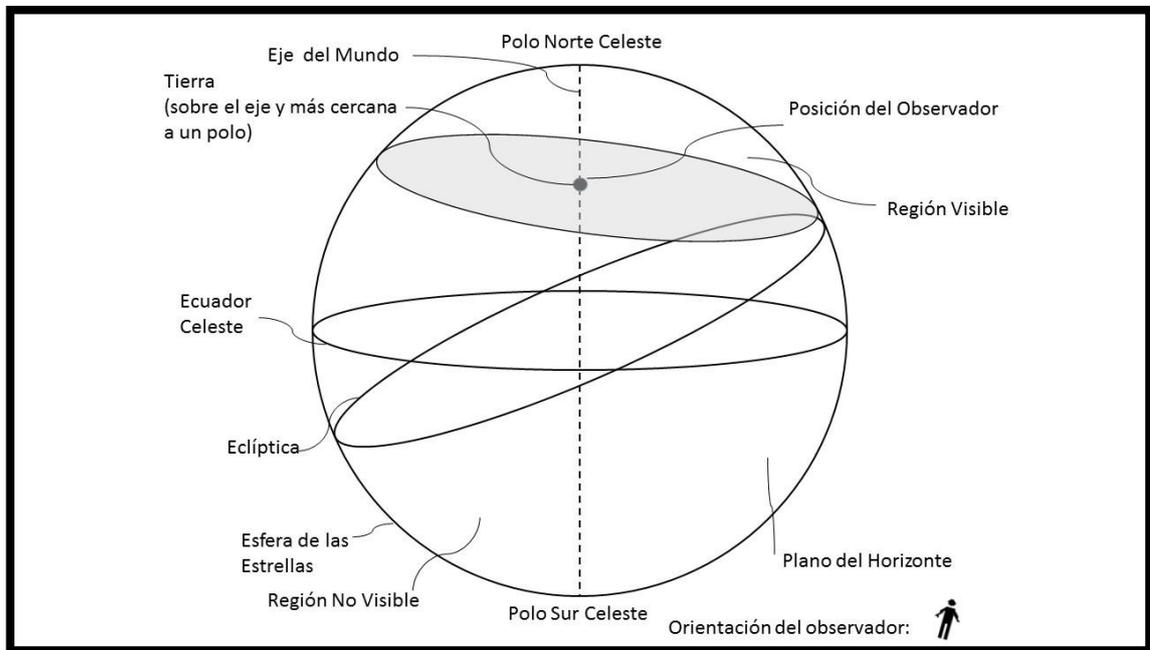


Figura A.17: posición alternativa B con esfera oblicua (3).

Nada de esto ocurre. Para todo observador en cualquier punto de la Tierra y en cualquier momento son visibles seis de los doce signos. Esto es indicativo de que el horizonte biseca a la eclíptica.

También respecto de este caso B, dice (L. 61-68):

“Y en general, si la Tierra no estuviera situada exactamente debajo del ecuador [celeste], sino apartada hacia el norte o el sur en la dirección de uno de los polos, el resultado sería que en los equinoccios la sombra del gnomon sobre un plano paralelo al horizonte al amanecer no formaría una línea recta con la formada en el ocaso, ni siquiera sensiblemente Sin embargo, este es un fenómeno que es claramente observado en todos lados.”

Como el día del equinoccio el Sol sale casi exactamente en dirección este y se pone en dirección oeste, ese día la sombra del gnomon hacia el oeste (que es la que se forma a la salida) y la sombra hacia el este (que es la que se forma al ponerse) están alineadas. Esto, dice Ptolomeo, no podría ocurrir si la Tierra no estuviera justo debajo del paralelo en que el Sol se mueve el día del equinoccio, que es aproximadamente el paralelo con declinación 0° , el ecuador.

Por todo lo anterior, Ptolomeo procede a descartar la tercera opción alternativa [C] del siguiente modo (L. 70-77):

“Es inmediatamente claro que la tercera posición enumerada es de la misma manera imposible, porque la clase de objeciones que hicimos a las primeras [dos] surgirían en ese caso.

Para resumir, si la Tierra no se extendiera en la mitad [del universo], el orden entero de las cosas que observamos en el incremento y decrecimiento en la duración de la luz del día estaría fundamentalmente subvertido”

Y finalmente agrega otro argumento de distinta naturaleza (L. 77-82):

“Además, los eclipses lunares no estarían restringidos a situaciones en las cuales la Luna está diametralmente opuesta al Sol [en cualquier parte del cielo en que estén las luminarias], porque la Tierra a menudo se interpondría entre ellos cuando no fueran diametralmente opuestos, sino en intervalos menores a un semicírculo.”

Este último aspecto, generalmente no tuvo la misma recepción que los otros, y no es de especial interés para esta Tesis. Lo que señala es el hecho conocido de que los eclipses de Luna tienen lugar cuando ella se encuentra opuesta al Sol (lo que se manifiesta en que esa noche, excepto durante el eclipse, está completamente iluminada). Puesto que los eclipses lunares tienen lugar cuando la Tierra queda interpuesta entre el Sol y la luna, si fuera el caso de que la Tierra no estuviera en el centro del universo, esto ocurriría no solo cuando el Sol y la Luna se encuentran opuestos. Esto se puede apreciar en la Figura A.18, que representa dos situaciones de eclipses lunares en los que

Luna (L) y Sol (S) no están opuestos respecto del centro del centro (C) y no obstante ello, la Tierra (T) se interpone entre ellos.

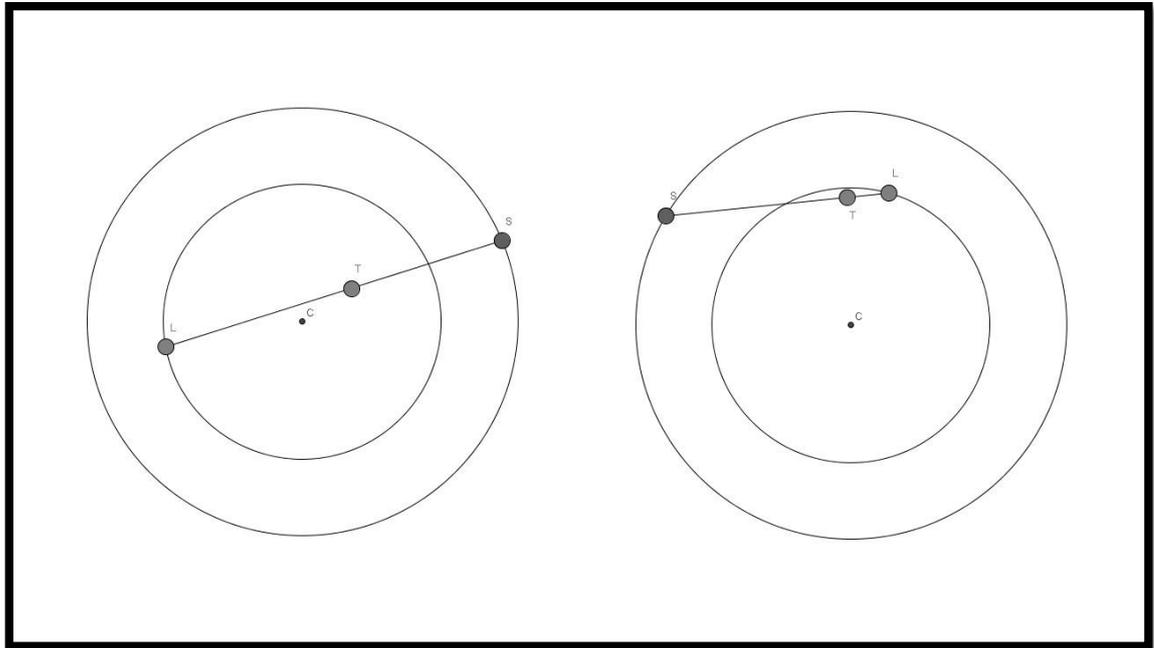


Figura A.18: dos eclipses con Tierra descentrada sin que la Luna esté opuesta al Sol.

Como no ocurre que tengan lugar eclipses de Luna sin que la Luna y el Sol se encuentren uno opuesto respecto del otro, se puede establecer que la Tierra se encuentra en el centro.

Ap.3) Los supuestos

El éxito del argumento ptolemaico depende de la aceptación de un conjunto de supuestos de distinta índole. Esta cantidad y variedad de supuestos no se encuentran adecuadamente señalados en los comentarios de los especialistas cuyos fragmentos reproduzco en Ap.5. Comenzaré señalando las características generales de tales comentarios, para luego realizar una exposición sistemática de los que creo que constituyen los supuestos del argumento ptolemaico.

El análisis de Evans (en Ap.5.i) es correcto, aunque simplificado. Respecto del caso A, solo señala el caso en una esfera recta en la que la Tierra fue

desplazada hacia el cenit (el primero de los casos del que, en nuestra numeración, fue denominado A.i). Por tanto, omite señalar que si el observador estuviera a 90° de longitud del lugar en el que se encuentra en su figura 2.3, sí tendría equinoccio. Por la misma razón, no le resulta necesario referir al argumento sobre el tamaño angular de las estrellas ni sobre los tiempos entre salidas, puestas y culminaciones. Y, en general, al no considerar el caso de una esfera oblicua, tampoco explica por qué habría una relación entre el grado de desplazamiento de la Tierra y la latitud del observador, ni el problema de las distancias temporales entre solsticios y equinoccios. El análisis del caso B también es simplificado, pero como es más simple también en el texto ptolemaico, es menos lo que sacrifica respecto de la versión original. Solamente señala que se vería menos porción del cielo sin indicar cuál sería la evidencia empírica de tal consideración: la no bisección del zodíaco o las sombras del gnomon. Simplemente considera que no se vería la mitad del cielo, sin problematizar este aspecto. Y tampoco hace ninguna clase de referencia al argumento de los eclipses.

La de Evans es una reconstrucción efectiva de la idea ptolemaica, dado que toma los aspectos mínimos y suficientes para probar que la Tierra no podría estar fuera del centro de acuerdo con los preceptos vigentes. Pero lo cierto es que el argumento de Ptolomeo buscó dar cuenta de muchos otros aspectos, y es en tales consideraciones que se pueden hallar los supuestos del argumento. Al respecto, Evans se conforma con decir que hay algunos aspectos convencionales y otros empíricos. Señala lo siguiente:

“Ciertamente, el eje de la rotación diaria debe pasar por la Tierra. Pero, garantizado esto, no puede hacer mayor diferencia el hecho de que la Tierra esté exactamente en el centro de las cosas o no. Todo observador, sea en la Tierra, en la Luna o en Júpiter, puede tratar a su morada como el centro del universo” (L. 37-42).

Con esto, Evans parece suscribir la idea de que la convencionalidad está dada por el hecho de que, por esta vía, no se puede demostrar la centralidad de la Tierra sino simplemente su centralidad relativa. Luego señala que la

esfericidad del cielo es totalmente convencional pero que, puesto que la distancia a las estrellas es tan grande, suponer esto no hace diferencia (L.46-7). No comparto esta consideración, por motivos que señalaré más adelante.

La reconstrucción de Taub (en Ap.5.ii) es algo más completa, aunque contiene imprecisiones que la de Evans no. Respecto del caso A, señala que

“si la Tierra estuviera o bien arriba o bien debajo del eje del universo, los equinoccios o bien no ocurrirían o bien no ocurrirían cuando lo hacen puesto que el horizonte no bisecaría al ecuador celeste sino uno de los círculos paralelos a él” (L. 12-7).

En primer lugar, la referencia “o bien arriba o bien debajo del eje” carece de sentido. Si la Tierra está fuera del eje, el arriba o el abajo es solamente relativo a un determinado observador. Es a tal observador al que, según cuál sea su posición sobre la Tierra, le ocurriría el hecho de tener o no equinoccio. Taub, al hablar de la Tierra y no de los observadores, omite un aspecto sumamente importante del argumento. Luego, que la Tierra se encuentre fuera del eje no es suficiente para que su horizonte no biseque al ecuador, dado que el horizonte es relativo a un observador y siempre habrá algún punto sobre la Tierra en lo que eso ocurriría (dado que por cualquier punto interior a la esfera pasa al menos un círculo máximo). Por último, que el horizonte no biseque al ecuador no es suficiente para que no haya equinoccios, porque podrían tener lugar en algún otro momento del año en el que el horizonte biseque algún paralelo entre -23.5° y $+23.5^\circ$. Por lo anterior, la afirmación de Taub es algo general e imprecisa: el “no ocurrirían” y el “no ocurrirían cuando lo hacen” no se siguen de idénticas situaciones ni, mucho menos, del hecho exclusivo de que el horizonte no divida al medio al ecuador.

Taub, a diferencia de Evans, sí refiere al problema de los tamaños de las estrellas (L. 22-31). Nuevamente refiere a un movimiento hacia el este o el oeste del eje, lo que no tiene absolutamente ningún sentido puesto que en el eje no existen el este y el oeste, con lo que jamás podrían darse desplazamientos en tales direcciones. Luego, las consecuencias de tal

situación son casi exclusivamente una paráfrasis de las palabras de Ptolomeo, lo que también hace respecto del caso de los eclipses (L.47-53).

El único supuesto señalado por Taub es que el desplazamiento hipotético de la Tierra con relación al cielo debe ser significativo porque, si no, podría ocurrir que tales consecuencias no se dieran. Por otra parte, Taub insiste en que la justificación del argumento ptolemaico es enteramente matemática: argumentos y consideraciones físicas no tienen lugar en ella (L.1-4). Comparto que pretende ser una justificación matemática, pero considero desmedida la afirmación según la cual no tienen lugar consideraciones físicas. Esto puede ser cierto por el hecho de que no se refiere a la caída de los graves u otros problemas, pero aun así es posible advertir consideraciones físicas y metafísicas sin las cuales el argumento no podría tener lugar.

El argumento de Pedersen (en Ap.5.iii) es más preciso a este respecto, porque señala que lo que Ptolomeo deja de lado son argumentos físicos vinculados con la teoría de la gravitación (L. 5-7), lo que sí es cierto. Por lo demás, el de Pedersen es el más competente y preciso de los comentarios. Pero, quizá, más que un comentario al argumento de Ptolomeo es una reconstrucción ordenada del núcleo argumental de Ptolomeo, pero con casos y formas expresivas que a Pedersen le resultaron más adecuadas que las utilizadas por el propio Ptolomeo. Por ejemplo, en lugar de establecer en el caso A un desplazamiento hacia el cenit o nadir distinto de uno hacia el este y el oeste, prefirió hacer mención a un viajero que se desplaza hacia el este (L. 23-7), aspecto inexistente en el argumento ptolemaico. En el mismo sentido, en lugar de hacer referencia a la sombra del gnomon en el caso de la Tierra desplazada tal como lo hace Ptolomeo, señala un caso análogo pero diferente sobre el que aclara que no es explícito en el argumento de Ptolomeo (L. 40-1). Al no ser un comentario pegado al texto, omite ciertos aspectos problemáticos de la formulación ptolemaica, como el referido a propósito del contrasentido que indiqué en el caso A.i (con esfera oblicua).

Distinto es el caso del comentario sobre los tamaños de las estrellas y los tiempos entre salida, culminación y puesta. En ellos, al igual que Taub, apela a una mera paráfrasis de las palabras de Ptolomeo, sin señalar ningún aspecto problemático ni ningún supuesto. Esto contrasta fuertemente con su referencia al argumento de los eclipses, sobre el que señala que “reposa sobre la presunción de que la Tierra está fuera del universo, pero que el Sol y la Luna continúan moviéndose en torno al centro” (L. 66-8).

A continuación sistematizaré los que considero que son los supuestos del argumento ptolemaico. Muchos de ellos son detectables a condición de: i) reproducir el argumento tal como lo desarrolló Ptolomeo (y no mediante reconstrucciones selectivas de aspectos del argumento) y ii) analizar su desarrollo histórico, tal como hago en el cuerpo de la Tesis.

α) No despreciabilidad de los desplazamientos hipotéticos

El argumento de Ptolomeo funciona, en el mejor de los casos, de manera restringida. Al ser una prueba *indirecta* (tal como lo dice Pedersen, L.134-6), la forma en la que se interpreta la negación de la hipótesis que se quiere probar, es clave. Que la Tierra “no esté en el centro”, debe ser entendido como “que la Tierra esté considerablemente desplazada del centro”; esto es, los desplazamientos hipotéticos deben ser significativos en términos relativos. Si la Tierra fuera desplazada del centro en cualquiera de las direcciones y para cualquier observador en una cantidad tal que, comparada con la distancia al Sol y a la esfera de las estrellas, fuera despreciable, entonces tampoco se observarían las consecuencias que Ptolomeo prevé. De modo que el argumento no prueba que la Tierra está en el centro sino, en el mejor de los casos, que está aproximadamente en el centro. Este aspecto es adecuadamente señalado por Taub y por Evans.

β) Que efectivamente se observa la mitad del cielo

El argumento de Ptolomeo reposa básicamente en que el horizonte divide al medio a la esfera de las estrellas fijas (y sus principales círculos máximos:

ecuador y eclíptica). Es esta observación la que desestima que la Tierra pueda estar desplazada. Ahora bien, que se observa la mitad del cielo (o la mitad del ecuador, de la eclíptica, etc.) opera, en cierto sentido, como supuesto.

Por una parte, no es sencillo encontrar un sitio sobre la Tierra en el que tal observación pueda tener lugar. O bien por obstáculos a la visual (accidentes geográficos, vegetación, etc.) o bien por condiciones climáticas, el horizonte no suele ser un espacio *limpio* para la observación. En las condiciones en las que suele estarlo (que es en el medio del mar cuando se navega), es sumamente difícil establecer mediciones precisas (por ejemplo, mediante una dioptra) dado el movimiento del barco.

Pero más importante es que, aun en condiciones óptimas para la observación, nunca se observa la mitad del cielo. Por motivos que no precisaré aquí (desarrollados en el Capítulo 4), la refracción atmosférica hace que siempre se vea algo más de la mitad del cielo. Si bien esta diferencia es bastante menor, se podía ver y medir en la época de Ptolomeo, y él tenía suficiente consciencia de ello. Lo que se observa, en todo caso, es *aproximadamente* la mitad del cielo, con lo que, en el mejor de los casos, se podría probar que la Tierra está *aproximadamente* en el centro de la esfera. De manera que, en principio, aquí hay una idealización de lo que constituye la base empírica del argumento. Este aspecto no es señalado en ninguno de los comentarios contemporáneos referidos, como tampoco lo son los siguientes.

y) Rigidez de la Esfera

Otro supuesto es la rigidez de la esfera. Para poder dar cuenta acabada de esto, el más elocuente de los pasajes es uno que no recibió atención por parte de los comentaristas referidos. Es aquel en el que Ptolomeo señala la consecuencia que tendría un desplazamiento hacia el este o el oeste sobre los tiempos entre la salida y la culminación o entre la culminación y la puesta (A.ii.b). Para que el argumento de Ptolomeo funcione debe subsumirse la velocidad angular a la velocidad tangencial.

Lo que considera Ptolomeo es que, para el caso de un observador cuya Tierra fue desplazada en su dirección este, el tiempo entre la salida y la culminación debiera ser menor que el tiempo entre la culminación y la puesta, puesto que el recorrido (tangencial) de las estrellas es mayor entre culminación y puesta que entre salida y culminación. Pero esto no necesariamente es así; las estrellas bien podrían tener velocidad angular constante (y recorrer los 90° desde el horizonte hasta la culminación en el mismo tiempo que recorren los 90° desde la culminación hasta el horizonte) aun no estando el observador en el centro; el requisito es que puedan tener una velocidad tangencial que no sea constante.

Esto no es ni siquiera considerado como posibilidad por Ptolomeo, lo que es indicativo de que el movimiento esférico del cielo establecido en *Almagesto* 1.3 tiene un trasfondo físico: la materialidad de tal esfera. Es porque las estrellas están sobre una esfera material que no pueden tener velocidades tangenciales distintas. En este sentido, adelanté que la caracterización de Taub del argumento como un argumento matemático sin consideraciones físicas era demasiado general. En el mismo sentido, tomé distancia de la consideración de Evans de que considerar a las estrellas en una esfera, dada su distancia, no hacía diferencia (L. 45-7). Aquí el argumento depende exclusivamente de que la esfera exista, y si no existiera, no sería un problema que las estrellas tuvieran velocidades tangenciales distintas.

δ) Centralidad del movimiento solar

Este es quizá el supuesto más arbitrario del argumento. La gran mayoría de las observaciones que señala Ptolomeo están vinculadas con el movimiento del sol: la existencia de equinoccios, la duración de las estaciones, la sombra del gnomon, etc. Pero todas estas observaciones no probarían la centralidad de la Tierra si antes no se hubiera probado que el Sol gira en torno al centro de la esfera. Esto no solo no está probado sino que, además, difícilmente podía hacerse sin antes establecer la centralidad de la Tierra. La duración de las estaciones, la equidistancia entre solsticios y equinoccios, las sombras del

gnomon y las otras observaciones prueban solamente que el Sol permanece aproximadamente la mitad del tiempo sobre el ecuador terrestre y aproximadamente la otra mitad debajo, lo que bien podría ocurrir estando el Sol dando vueltas en torno a la Tierra en otro punto que no sea el centro de la esfera.

Pedersen muestra adecuadamente que esto opera como supuesto para el argumento de los eclipses, pero omite que también es fundamental para todo lo referido a los argumentos de los solsticios y equinoccios y de la sombra del gnomon. Sobre el argumento de los eclipses, cabe añadir, Ptolomeo introduce otro supuesto, que Pedersen no señala. Ptolomeo dice que tendrían lugar eclipses cuando la Luna y el Sol no estuvieran en oposición. Es claro que por tal oposición no puede referirse a una oposición respecto de la Tierra, la que se sigue necesariamente de la noción de eclipse que manejaba. Por tanto, solo puede estar hablando de oposición en la eclíptica. Pero suponer que desde una Tierra descentrada podríamos establecer con claridad si tales cuerpos están o no opuestos en la eclíptica, es necesario suponer lo siguiente:

ε) Realidad de la eclíptica y del zodíaco

Así como supone la materialidad de la esfera y que el Sol gira en torno a su centro, Ptolomeo considera a la eclíptica como un círculo máximo efectivamente existente en la esfera y al zodíaco como la franja que la rodea. Los argumentos que señalan a la observación de seis de los doce signos dependen, al igual que los del gnomon, las estaciones o la oposición del Sol y la Luna en los eclipses, de suponer que tal disposición de las estrellas es real *en* la esfera. Si el Sol girara en torno a la Tierra en algún otro lugar del universo, la eclíptica también sería dividida al medio por el horizonte si se considerara a la eclíptica como mera proyección sobre el fondo estelar del movimiento del Sol. Pero Ptolomeo no la piensa así; presupone que la eclíptica es un círculo máximo *de* la esfera, lo que opera como presupuesto.

ζ) Que la Tierra está en reposo

El hecho de que Ptolomeo plantee como posiciones alternativas a la posición central de la Tierra, que se encuentre “fuera del eje”, “en el eje”, “equidistante de los polos”, “más cerca de un polo” solo es posible a condición de haber establecido que la Tierra no tiene eje y no tiene polos; esto es, que no tiene movimiento. Señala en *Almagesto I. 3* las razones para pensar que el cielo se mueve esféricamente. Esto lo conduce a pensar que la Tierra no rota. Luego, puede plantear que la Tierra esté en distintos lugares respecto del eje o del ecuador, pero eso tiene sentido solo a condición de haber aceptado el presupuesto de la Tierra *puede* estar fuera del eje, como si nada tuviera que ver con él. Puede ser que Ptolomeo tuviera sus razones, pero a los fines de probar la centralidad de la Tierra, esto opera como un supuesto. Las tres opciones alternativas son exhaustivas y permiten una prueba por inducción por enumeración completa, solo a condición de que se acepte que tales son las únicas cuatro posibilidades. Y ello depende estrictamente de que se adopte un presupuesto sobre el movimiento del cielo y el reposo de la Tierra. Tal presuposición obedece a consideraciones de tipo físico, lo que se manifiesta claro en *Almagesto I. 7*. Allí Ptolomeo ofrece elementos contra el movimiento de la Tierra y dice que, al menos bajo consideraciones simples, no hay forma de discernir astronómicamente si lo que rota es el cielo o la Tierra (p. 45), lo que se decide finalmente por motivos físicos. De modo que la prueba *astronómica* de la centralidad de la Tierra debe suponer que es el cielo el que rota, y la prueba de que esto ocurre es *física*, y no *astronómica*. De modo que la apreciación de Taub sobre el carácter exclusivamente astronómico de la prueba pierde sustento.

η) Que la Tierra está en el centro

Finalmente, si se acepta que cada uno de los ítems señalados hasta aquí funcionó como presupuesto, es entonces necesario aceptar que globalmente el éxito del argumento de Ptolomeo para probar la centralidad de la Tierra depende de que se presuponga, de alguna manera, la centralidad de la Tierra.

El recorrido es el siguiente. Presuponiendo a la Tierra en el centro, se construyeron todos los términos observacionales que luego se utilizarían en el argumento: esfera, polos, eje, ecuador, eclíptica, etc. Cada uno de ellos es definido presuponiendo que no hay diferencia entre lo que se observa y lo que se observaría desde el centro: si la esfera parece una esfera equidistante de nosotros, es una esfera equidistante de nosotros; si la eclíptica parece un círculo máximo de tal esfera, es un círculo máximo, etc. También se definen y describen los movimientos, como el del sol, presuponiendo que están siendo observados como desde el centro del universo. Una vez que se hizo eso, se pregunta, con los términos tal como fueron definidos, que pasaría si la Tierra no estuviera en el centro de la esfera, de la eclíptica, del movimiento solar, etc., todo lo cual fue definido presuponiendo a la Tierra en el centro. Como eso es inconsistente con lo que se ve, entonces la Tierra debe estar en el centro. La respuesta termina siendo necesariamente la que él da. Los términos observacionales funcionan como caballos de Troya: una vez que ellos entraron, entró toda la teoría. Esto es posible comprenderlo a la luz del desarrollo histórico del argumento, analizado en el cuerpo de la Tesis.

Ap.4) El texto

Versión inglesa (Ptolomeo 1984, 41-2)

1 5. *{That the earth is in the middle of the heavens}* [n.31]

Once one has grasped this, if one next considers the position of the earth, one will find that the phenomena associated
5 with it could take place only if we assume that it is in the middle of the heavens, like the centre of a sphere. For if this were not the case, the earth would have to be either

10 [a] not on the axis [of the universe] but equidistant from both poles, or
[b] on the axis but removed towards one of the poles, or
[c] neither on the axis nor equidistant from both poles.

15 Against the first of these three positions militate the following arguments. If we imagined [the earth] removed towards the zenith or the nadir of some observer, then, if he were at *sphaera recta*, he would never experience equinox, since the horizon would always divide the heavens into two
20 unequal parts, one above and one below the earth; if he were at *sphaera obliqua*, either, again, equinox would never occur at all, or, [if it did occur,] it would not be at a position halfway between summer and winter solstices, since these intervals would necessarily be unequal, because the equator,
25 which is the greatest of all parallel circles drawn about the poles of the [daily] motion, would no longer be bisected by the horizon; instead [the horizon would bisect] one of the circles parallel to the equator, either to the north or to the south of it. Yet absolutely everyone agrees that these
25 intervals are equal everywhere on earth, since [everywhere] the increment of the longest day over the equinoctial day at the summer solstice is equal to the decrement of the shortest day from the equinoctial day at the winter solstice. But if, on the other hand, we imagined the displacement to
30 be towards the east or west of some observer, he would find that the sizes and distances of the stars would not remain constant and unchanged at eastern and western horizons, and that the time-interval from rising to culmination would not be equal to the interval from culmination to setting. This
35 is obviously completely in disaccord with the phenomena.

Against the second position, in which the earth is imagined to lie on the axis removed towards one of the poles, one can make the following objections. If this were so, the plane of
40 the horizon would divide the heavens into a part above the

earth and a part below the earth which are unequal and always different for different latitudes, whether one considers the relationship of the same part at two different latitudes or the two parts at the same latitude [n. 32]. Only
45 at *sphaera recta* could the horizon bisect the sphere; at a *sphaera obliqua* situation such that the nearer pole were the ever-visible one, the horizon would always make the part above the earth lesser and the part below the earth greater; hence another phenomenon would be that the great circle of the ecliptic would be divided into unequal parts by the plane
50 of the horizon. Yet it is apparent that this is by no means so. Instead, six zodiacal signs are visible above the earth at all times and places, while the remaining six are invisible; then again [at a later time] the latter are visible in their entirety
55 above the earth, while at the same time the others are not visible. Hence it is obvious that the horizon bisects the zodiac, since the same semi-circles are cut off by it, so as to appear at one time completely above the earth, and at another [completely] below it.

60 And in general, if the earth were not situated exactly below the [celestial] equator, but were removed towards the north or south in the direction of one of the poles, the result would be that at the equinoxes the shadow of the gnomon at
65 sunrise would no longer form a straight line with its shadow at sunset in a plane parallel to the horizon, not even sensibly [n. 33]. Yet this is a phenomenon which is plainly observed everywhere.

70 It is immediately clear that the third position enumerated is likewise impossible, since the sorts of objection which we made to the first [two] will both arise in that case.

To sum up, if the earth did not lie in the middle [of the
75 universe], the whole order of things which we observe in the increase and decrease of the length of daylight would be fundamentally upset. Furthermore, eclipses of the moon would not be restricted to situations where the moon is diametrically opposite the sun (whatever part of the heaven
80 [the luminaries are in]), since the earth would often come between them when they were not diametrically opposite, but at intervals of less than a semi-circle.

Notes:

85 31: See Pedersen 39-42.

32: The word translated here and elsewhere as '{terrestrial] latitude' is κλίμα, for the meaning of which see Introduction p. 19.

33: The *caveat* 'sensibly' is inserted because the equinox is
90 not a date but an instant of time. Therefore on the day of
equinox the sun does not rise due east and set due west (as
is implied by the rising and setting shadows lying on the
same straight line). However, the difference would be
'imperceptible to the senses'.

Ap.5) Los comentarios

Ap.5.i) James Evans (Evans 1998, 77-8)

1 The Earth is in the Middle of the Heaven

Suppose, says Ptolemy, that the Earth is not at the center of
the celestial sphere. Then is either:

5

off the axis of the sphere but equidistant from the poles.
on the axis but farther advanced toward one of the poles,
or
neither on the axis nor equidistant from the poles.

10

Let us examine case (a). In figure 2.3, the Earth lies off the
axis of the celestial sphere, but at equal distances from two
celestial poles. In this case there will be trouble with the
equinoxes. Let an observer A on the Earth's equator, with
15 horizon YAQ. At the time of the equinox, the Sun lies on the
celestial equator and therefor runs around circle WXYZ in
the course of one day. The observer A will see the Sun above
the horizon only for the short time the Sun requires to run
arc YZW, and the Sun will be below for the long time it takes
20 to travel arc WXY. Bu this contradicts the observed fact that,
at equinox, the period of daylight is equal to the period of
darkness at all places on Earth.

Now consider case (B), in which the Earth is on the axis of
25 the universe but nearer on of the poles. Then everywhere
(except at the Earth's equator) the plane of the horizon will
cut the celestial sphere into unequal parts, which is contrary
to observation, since one half of the sphere is always found
above the horizon (fig. 2.4). And it is not possible to advance
30 to case (c) since de objections to (a) and (b) would apply
here also.

(...)

35 [The proposition that the Earth is] at the center of the

heaven, rest partially on empirical evidence and is partly conventional. Certainly, the axis of the daily rotation must pass through the Earth. But, granted this, as long as the stars are very far away, it can make no difference whether the Earth is exactly in the middle of things or not. Every observer, whether on the Earth, the Moon, or Jupiter, can legitimately treat his or her own home as the center of the universe (as far as appearances are concerned). (...) [The proposition] that the heaven is spherical is wholly conventional. Because the stars are very far away from us, it makes no difference whether they all lie on a single spherical surface or not. But we will not get into trouble by assuming that they do.

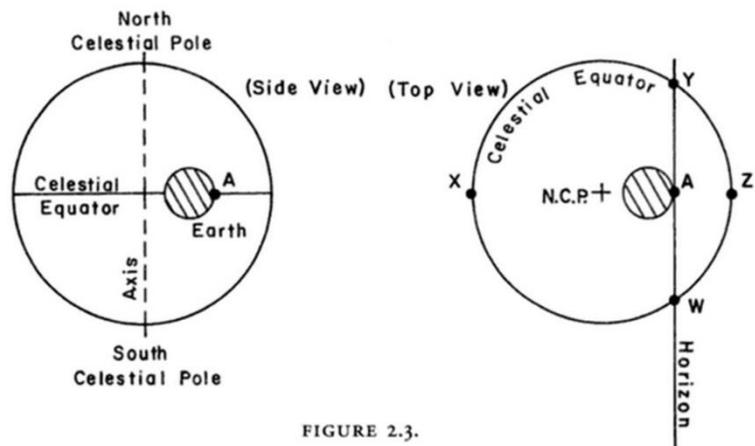


FIGURE 2.3.

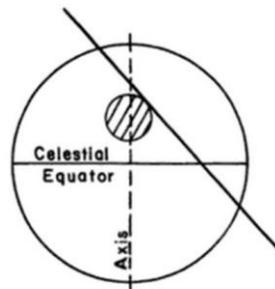


FIGURE 2.4.

1 To support his hypothesis that the Earth is in the middle of
the heavens, Ptolemy relied on argument based on
astronomical observations, rather than considerations of
any physical theory. In his justification of the hypothesis
5 stating the central position of the Earth, with regard to the
senses, he noted that if the Earth were not in the middle of
the heavens it could only be situated in a position: (1) not on
the axis of the universe but equidistant from each of the
poles; or (2) on the axis but displaced toward one of the
10 poles; or (3) neither on the axis nor equidistant from poles.

He provided the following arguments against the first
possibility. First, if the Earth were either above or below the
axis of the universe, equinoxes either would not occur at all
15 or would not occur when they do, because the horizon would
bisect not the celestial equator, but one of the circles parallel
to it. Ptolemy pointed out that this cannot be the case since
“everyone agrees” the equinoxes occur at the same time
everywhere, that is, midway between summer and winter
20 solstice.

If the Earth were moved to the east or the west of the axis,
“the sizes and distances of the stars would not appear equal
and the same at the eastern and western horizons”. Here,
25 Ptolemy was presuming that the displacement of the Earth
with regard to the axis must be large relative to the size of
the heaven. He had a further objection to this possible
position of the Earth, because the consequence would be
that the sizes and distances of the stars would not appear to
30 be equal at the eastern, nor would the time for rising to the
middle of the heaven be equal to the time for setting from
the middle of the heaven. Neither of these occurrences
would be in accord with the phenomena. If the Earth were
on the celestial axis, but closer to one pole than the other,
35 other anomalies would result. The horizon would divide the
heavens into two unequal parts, as well as the ecliptic (“the
great circle through the middle of the zodiac”). However,
since at all times and places six zodiacal signs are visible
above the Earth, while six are invisible, the horizon must
40 bisect the ecliptic and the heavens. Further, on the day of
equinox, the shadow cast by a gnomon at sunrise would not
form a straight line with the shadow cast at sunset, which
would be contrary to what is observed.

45 Ptolemy rejected the third possible position of the Earth by referring to the above arguments, which would also apply in this case. He added that if the Earth were not in the center of the universe, eclipses of the Moon would not occur only when the moon is in position diametrically opposed to the Sun, since the Earth would often come between them when they were not diametrically opposed to one another, but at intervals of less than a semicircle.

55 The mathematical and astronomical consequences of the Earth's shape and position seem to have been the most important for Ptolemy. Physical considerations and arguments had no place in Ptolemy's justification of the idea that the Earth is at the center of the Universe.

Ap.5. iii) Olaf Pedersen (Pedersen y Jones 2011, 39-42).

1 So far Ptolemy has established that the Earth is spherical and placed somewhere inside a spherical universe. Now follows a proof that its only possible position is at the centre of the heavenly sphere [I, 5; Hei 1, 17]. The proof is indirect since Ptolemy shows that any other position is impossible for astronomical reasons, leaving out any 'physical' argument derived from the theory of gravitation.

10 1] If the Earth were placed outside the axis but at the same distance from each pole [i.e. in the plane of the celestial equator, see Figure 2.4] there would be trouble with the equinoxes. On the terrestrial equator [position 1 of the horizontal plane] day and night could never be equal everywhere simultaneously, since the horizontal plane would divide both the celestial equator and any other diurnal arc of the Sun into unequal parts. At other places [position 2] either the same would be true, or else the equinoxes would not fall in the middle between Summer and Winter solstice. This is because the circle halved by the horizon would no longer be the celestial equator, but some other circle lying asymmetrically with respect to the two tropics.

25 Moreover, a traveller moving East would see the relative distance of the stars change, and the constellations with them. He would also find the time between the rising and culmination of a star at one place different from the time between culmination and setting at another place on the same parallel.

2] Next we suppose the Earth to be placed on the axis but
30 nearer to one pole than to the other [Figure 2.5]. In this case an
observer at a point T outside the terrestrial equator will find
the heavenly sphere divided into two unequal parts by his
horizontal plane. In particular the ecliptic would be divided
35 into unequal parts too, and we would not always see 6 zodiacal
signs above and 6 below the horizon, which is contrary to
experience.

Another consequence would be that at the equinoxes [if such
dates exist for the given position of the Earth], the Sun would
40 neither rise in the East nor set in the West. This argument is
not made explicit. Figure 2.6 shows the horizontal plane of
Figure 2.5 The dotted line AQB is the trace of the plane of a
circle parallel to the equator and halved by the horizontal
45 plane. If this circle is so situated that the Sun is able to reach it,
then there will be a date when day and night are equal. Looking
at the horizon from above, the trace of this circle will be the
line AQB. It follows that a gnomon at T will cast a morning
shadow along TC and an evening shadow along TD; these two
50 shadows are not diametrically opposed, contrary to what is
observed everywhere on the Earth.

3] Finally the Earth is supposed to lie neither on the axis, nor
with the same distance from the poles [Figure 2.7]. This
assumption leads to all the objections raised against the two
55 former positions, and is clearly impossible. But Ptolemy has
still another reason for the central position of the Earth, taken
from eclipses of the Moon. It is a matter of experience that such
eclipses occur only at oppositions [or Full Moons] when the
Sun, Earth and Moon are on a straight line connecting
60 diametrically opposite points of the heavens. But if the Earth
were not central it could happen that it came between the Sun
and the Moon at positions which were not diametrically
opposite but had a difference of longitude smaller than 180° .

65 This argument is only hinted at, but Theon has developed it
more fully [ed. Rome, p. 78ff.]. It rests on the assumption that
the Earth is outside the centre of the universe, but that both
Sun and Moon are moving upon circles around this centre
[Figure 2.8]. In that case it is obvious that in the eclipse shown
70 in the figure the line through Sun, Earth, and Moon will not
divide the heavens into equal parts.

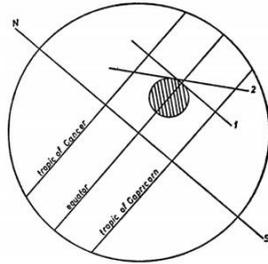


Fig. 2.4

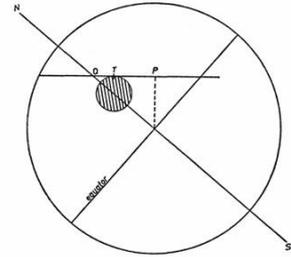


Fig. 2.5

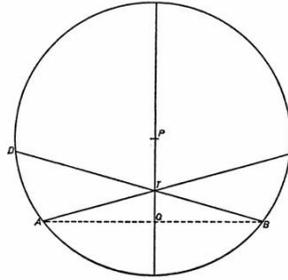


Fig. 2.6

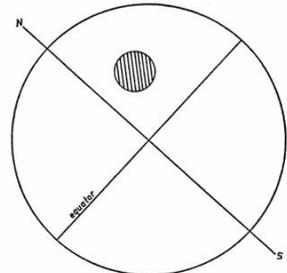


Fig. 2.7

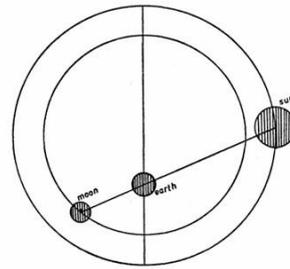


Fig. 2.8

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achinstein, Peter. 1964. «On the Meaning of Scientific Terms». *The Journal of Philosophy* 61 (17): 497-509.
- Alberti, Leon B. 1996. *De la pintura*. Editado por Universidad Nacional Autónoma de México. Traducido por Martínez E. J. Rafael. México: UNAM, Facultad de Ciencias.
- Andersen, Hanne, Peter Barker, y Xiang Chen. 2006. *The Cognitive Structure of Scientific Revolutions*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Apianus, Petrus. 1524. *Cosmographicus liber*. Landshutae.
- Arabatzis, Theodor, y Vasso Kindi. 2013. «The Problem of Conceptual Change in the Philosophy and History of Science». En *International Handbook of Research on Conceptual Change*, editado por Stella Vosniadou. London: Routledge.
- Arato. 1993. «Fenómenos». En *Fenómenos - Introducción a los Fenómenos*, de Gémino y Arato, traducido por Esteban Calderón Dorda. Madrid: Editorial Gredos.
- Aristóteles. 1996. «Acerca del Cielo». En *Acerca del cielo; Meteorológicos*, traducido por Miguel Candel. Madrid: Gredos.
- Arnheim, Rudolf, y María L. Balseiro. 2002. *Arte y percepción visual: psicología del ojo creador: nueva versión*. Madrid: Alianza Editorial.
- Autier, Michel. 1998. «La refracción y el 'olvido' cartesiano». En *Historia de las ciencias*, de Michel Serres. Madrid: Cátedra.
- Autólico. 1885. *Autolyki De sphaera quae movetur liber [;] De ortibus et occasibus libri duo*. Lipsiae: In Aedibus B. G Teubneri.
- Barrett, Katy. 2011. «"Explaining" Themselves: The Barrington Papers, the Board of Longitude, and the Fate of John Harrison». *Notes and Records of the Royal Society of London* 65 (2): 145-62.
- Barsalou, Lawrence. 1992. «Frames, Concepts and Conceptual Fields». En *Frames, Fields, and Contrasts: New Essays in Semantic and Lexical Organization*, de Adrienne Lehrer y Eva Feder Kittay. Hillsdale, New Jersey: L. Erlbaum Associates.

- Bernal, John D. 1971. *Science in History*. Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press.
- Bessel, Friedrich W. 1838. «II. A Letter from Professor Bessel to Sir J. Herschel, Bart., Dated Königsberg, Oct. 23, 1838». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 4 (17): 152-61.
- Blair, Ann. 1990. «Tycho Brahe's Critique of Copernicus and the Copernican System». *Journal of the History of Ideas* 51 (3).
- Bowen, Alan C., y Robert B. Todd. 2004. «Introduction». En *Cleomedes' Lectures on Astronomy: A Translation of The Heavens*. Berkeley: University of California Press.
- Brahe, Tycho. 1919. *Opera omnia*. Editado por John L. E. Dreyer. Vol. 6. Haniae: Glydendal.
- Bredenkamp, Horst, Irene Brückle, Oliver Hahn, y Paul Needham. 2011. *Galileo's O*. Berlin: Akademie Verlag.
- Britton, John P. 1992. *Models and Precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters*. New York: Garland.
- Brown, Harold I. 2007. *Conceptual Systems*. London; New York: Routledge.
- Bruno, Giordano. 1980. *Opere latine: il triplice minimo e la misura, la monade, il numero e al figura, l'immenso e gli innumerevoli*. Editado por Carlo Monti. Torino: UTET.
- . 1993. *Del infinito: el universo y los mundos*. Traducido por Miguel Ángel Granada. Madrid: Alianza Universidad.
- Burucúa, José E. 1984. «El libro de la naturaleza : Estudio acerca de las ideas de Galileo Galilei sobre las artes figurativas». Tesis de Doctorado, Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- . 1991. «Nugae perspectivae. El debate sobre la percepción del espacio tridimensional y su representación». *Temas medievales*. 1: 39-80.
- Butterfield, Herbert. 1965. *The Whig Interpretation of History*. New York: Norton.
- Caius Plinius Secundus. 1841. *Historiae Naturalis Libri XXXVII*. Editado por C. H. Weisio. Lipsiae: Sumtibus et Typis Caroli Tauchnitii.
- Carman, Charles H. 2007. «Alberti and Nicholas of Cusa: Perspective as "Coincidence of Opposites"». *Explorations in Renaissance Culture* 33 (2): 196-219.

- . 2014. *Leon Battista Alberti and Nicholas Cusanus: Towards an Epistemology of Vision for Italian Renaissance Art and Culture*. Burlington: Ashgate Publishing, Ltd.
- Carman, Cristián C. 2010. «On the Determination of Planetary Distances in the Ptolemaic System». *International Studies in the Philosophy of Science* 24 (3): 257-65.
- Carnap, Rudolf. 1936. «Testability and Meaning». *Philosophy of Science*. 3 (4).
- . 1947. *Meaning and Necessity: A Study in Semantics and Modal Logic*. Chicago: University of Chicago Press.
- . 1969. *Fundamentación lógica de la física*. Buenos Aires: Sudamericana.
- Casazza, Roberto. 2016. «Sphaericum Ordo. La fundamentación del marco cosmológico esférico en la tradición clásica.» Tesis de Doctorado [Versión Preliminar], Universidad Nacional de Rosario.
- Cassini, Alejandro P. F. 2015. «Una reivindicación de los experimentos cruciales». *Revista de Filosofía* 40 (1): 105-37.
- Cassirer, Ernst. 1951. *Individuo y cosmos en la filosofía del Renacimiento*. Buenos Aires: Emecé.
- Chalmers, Alan F. 1985. «Galileo's Telescopic Observations of Venus and Mars». *British Journal for the Philosophy of Science* 36 (2): 175-84.
- . 1990. «The Extraordinary Prehistory of the Law of Refraction». En *Science and Its Fabrication*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- . 2013. *What Is This Thing Called Science?* 4.^a ed. Indianapolis/Cambridge: Hackett Publishing.
- Chen, Xiang, y Peter Barker. 2000. «Continuity through Revolutions: A Frame-Based Account of Conceptual Change during Scientific Revolutions». *Philosophy of Science* 67 (3).
- Chi, Michelene T. H, Paul J Feltovich, Robert Glaser, y University of Pittsburgh. Learning Research and Development Center. 1981. *Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices*. [Pittsburgh, Pa.]: Learning Research and Development Center, University of Pittsburgh.
- Clark, Herbert H. 1996. *Using Language*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.

- Cleomedes. 2004. *Cleomedes' Lectures on Astronomy: A Translation of The Heavens*. Traducido por Alan C Bowen y Robert B Todd. Berkeley: University of California Press.
- Colomer, Eusebi. 1970. «Modernidad y tradición en la metafísica del conocimiento de Nicolás de Cusa». En *Nicolò Cusano agli inizi del mondo moderno.*, editado por Congresso internazionale Nicolò Cusano. Firenze: G.C. Sansoni.
- Comellas, José L. 1992. *El cielo de Colón: técnicas navales y astronómicas en el viaje del descubrimiento*. Madrid: Tabapress.
- Conesa Tejada, Salvador. 2011. «Perspectiva naturalis y perspectiva artificialis, el espacio perspectivo en la pintura primitiva italiana. Propuestas para la creación artística.» Tesis de Doctorado, Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Copérnico, Nicolás. 1983. «Commentariolus». En *Opúsculos sobre el movimiento de la Tierra*, de Nicolás Copérnico, Thomas Digges, y Galileo Galilei. Madrid: Alianza.
- . 1997. *Sobre las revoluciones (de los orbes celestes)*. Barcelona: Altaya.
- Cuesta Domingo, M. 2004. «Alonso de Santa Cruz, cartógrafo y fabricante de instrumentos náuticos de la Casa de Contratación». *Revista Complutense de Historia de América* 30: 7-40.
- Damisch, Hubert. 1997. *El origen de la perspectiva*. Madrid: Alianza.
- Daston, Lorraine, y Elizabeth Lunbeck. 2011. *Histories of Scientific Observation*. Chicago: University of Chicago Press.
- Davidson, Donald. 1974. «On the Very Idea of a Conceptual Scheme». *Proceedings and Addresses of The American Philosophical Association* 47: 5-20.
- Da Vinci, Leonardo. 1944. *Tratado de la pintura*. Traducido por Mario Pittaluga. Buenos Aires: Losada.
- de Andrade Martins, Roberto, y Walmir Cardoso. 2008. «O Trattato Della Sfera Ovvero Cosmografia De Galileo Galilei E Algumas Cosmografias E Tratados Da Esfera Do Século Xvi». *Episteme* 27.
- de Cusa, Nicolás. 2003. *Acerca de la docta ignorancia. Libro I: Lo máximo absoluto*. Traducido por Jorge M. Machetta y Claudia D'Amico. Buenos Aires: Biblos.

- . 2004. *Acerca de la docta ignorancia. Libro II: lo máximo contrato o universo*. Traducido por Jorge M. Machetta, Claudia D'Amico, y Silvia Manzo. Buenos Aires: Biblos.
- de Solla Price, Derek. 1969. «Contra-Copernicus: A Critical Re-Estimation of the Mathematical Planetary Theory of Ptolemy, Copernicus, and Kepler». En *Critical Problems in the History of Science: Proceedings of the Institute for the History of Science, 1957*, editado por Marshall Clagett. University of Wisconsin Press.
- Dickson, F. P. 1968. *The Bowl of Night; the Physical Universe and Scientific Thought*. Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press.
- Díez, José A., y Carlos U. Moulines. 1997. *Fundamentos de filosofía de la ciencia*. Barcelona: Ariel.
- Digges, Thomas. 1983. «Una perfecta descripción de las esferas...» En *Opúsculos sobre el movimiento de la Tierra*, de Nicolas Copérnico, Thomas Digges, y Galileo Galilei. Madrid: Alianza.
- Di Liscia, Daniel A. 2015. «Johannes Kepler». En *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, editado por Edward N. Zalta, Summer 2015. <http://plato.stanford.edu/archives/sum2015/entries/kepler/>.
- Donahue, William H. 1981. *The Dissolution of the Celestial Spheres*. New York: Arno Press.
- Drake, Stillman. 1983. *Telescopes, Tides and Tactics: A Galilean Dialogue about the Starry Messenger and Systems of the World*. Chicago: University of Chicago Press.
- . 1993. «Galileo». En *Cosmology: Historical, Literary, Philosophical, Religious, and Scientific Perspectives*, de Norriss S Hetherington. New York: Garland Pub.
- Edgerton, Samuel Y. 1984. «Galileo, Florentine “Disegno”, and the “Strange Spottedness” of the Moon». *The Art Journal / College Art Association of America* 44 (3): 225-32.
- . 1991. *The Heritage of Giotto's Geometry: Art and Science on the Eve of the Scientific Revolution*. Ithaca: Cornell University Press.
- Euclides. 2000a. «Fenómenos». En *Sobre las líneas indivisibles - Mecánica - Óptica - Catóptrica - Fenómenos*, de Aristóteles y Euclides, traducido por Paloma Ortiz García. Madrid: Gredos.

- . 2000b. «Óptica». En *Sobre las líneas indivisibles - Mecánica - Óptica - Catóptrica - Fenómenos*, de Aristóteles y Euclides, traducido por Paloma Ortiz García. Madrid: Gredos.
- Evans, James. 1998. *The History and Practice of Ancient Astronomy*. New York: Oxford University Press.
- Farrington, Benjamin. 1974. *Mano y cerebro en la antigua Grecia*. Madrid: Editorial Ayuso.
- Ferreira Ruiz, María J. 2016. «La naturaleza de las tesis cusanas acerca de los cuerpos celestes en De Docta Ignorantia II»,. En *Filosofia e história da ciência no Cone Sul: Seleção de trabalhos de 9º Encontro*, editado por Encontro de Filosofia. Associação de Filosofia e História de Ciência do Cone Sul [AFHIC].
- Feyerabend, Paul K. 1965. «On the “Meaning” of Scientific Terms». *The Journal of Philosophy* 62 (10): 266-74.
- . 1970. «Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge». En *Analyses of Theories and Methods of Physics and Psychology*, editado por Michael Radner y Stephen Winokur, NED - New edition. Vol. 4. University of Minnesota Press.
- . 1975. *Against Method: Outline of an Anarchistic Theory of Knowledge*. London: Verso.
- . 1981. «An Attempt at a Realistic Interpretation of Experience». En *Realism, Rationalism, and Scientific Method*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- . 1995. *Killing Time: The Autobiography of Paul Feyerabend*. Chicago: University of Chicago Press.
- Fox Keller, Evelyn. 2000. *Lenguaje Y Vida: Metáforas de La Biología En El Siglo XX*. Buenos Aires: Manantial.
- Galilei, Galileo. 1610. *Sidereus, nuncius: magna, longeque admirabilia spectacula pandens, suspicienda[ue] proponens vnicuiq[ue], praesertim vero philosophis, atq[ue] astronomis*. Prostat Francof.: In Paltheniano.
- . 1632. *Dialogo di Galileo Galilei Linceo: dove ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernicano*. Fiorenza.
- . 1891. «Tratatto della sfera ovvero Cosmografía». En *Le opere di Galileo Galilei. Edizione nazionale sotto gli auspicii di Sua Maestà il re d'Italia.*, editado por Antonio Favaro, 2:211-55. Firenze: Tip. di G. Barbèra.

- . 1933. «Lettera a Francesco Ingoli». En *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*, de Galileo Galilei y Antonio Favaro, 6:509-61. Firenze: Tip. di G. Barbèra.
- Galilei, Galileo, y Johannes Kepler. 1984. *El Mensaje y el mensajero sideral*. Editado por Carlos Solís Santos. Madrid: Alianza.
- Gatti, Hilary. 1985. «Minimum and Maximum, Finite and Infinite Bruno and the Northumberland Circle.» *Journal of the Warburg and Courtauld Institutes* 48.
- Gémino. 1993. «Introducción a los Fenómenos». En *Fenómenos - Introducción a los Fenómenos*, de Gémino y Arato, traducido por Esteban Calderón Dorda. Madrid: Gredos.
- Gentile, Nélica. 2013. *La tesis de la inconmensurabilidad: A 50 años de la estructura de las revoluciones científicas*. Buenos Aires: Eudeba.
- Geymonat, Ludovico. 1970. *Storia del pensiero filosofico e scientifico*. Milano: Garzanti.
- Gingerich, Owen. 1975. «Commentary: Remarks on Copernicus' observations». En *The Copernican Achievement*, de Robert S. Westman. Berkeley: University of California Press.
- Gingerich, Owen, y James H MacLachlan. 2005. *Nicolaus Copernicus: Making the Earth a Planet*. New York: Oxford University Press.
- Goldstein, Bernard R, y Peter Barker. 1995. «The Role of Rothmann in the Dissolution of the Celestial Spheres». *Brit. J. Hist. Sci. The British Journal for the History of Science* 28 (04).
- Granada, Miguel A. 1984. «Introducción». En *La cena de las cenizas*, de Giordano Bruno, traducido por Miguel A. Granada. Madrid: Editorial Nacional.
- . 2001. «Giordano Bruno y el final de la cosmología aristotélica». En *Galileo y la gestación de la ciencia moderna*, 97-118. Canarias.
- Grant, Edward. 1984. «In Defense of the Earth's Centrality and Immobility: Scholastic Reaction to Copernicanism in the Seventeenth Century». *Transactions of the American Philosophical Society, New Series*, 74 (4): 1-69. doi:10.2307/1006444.
- Greif, Esteban, y Aníbal Szapiro. 2012. «La percepción de Giordano Bruno en la historiografía reciente». En *Epistemología e Historia de la Ciencia: Selección de Trabajos de las XXII Jornadas*, editado por Luis Salvático, Maximiliano Bozzoli, y L. Pesenti, 251-56. Córdoba: UNC.

- Grosseteste, Roberto. 1985. *Óptica*. Buenos Aires: Ediciones El Rey.
- . 1988. *Astronomía*. Buenos Aires: Ediciones El Rey.
- Hanson, Norwood R. 1958. *Patterns of Discovery: An Inquiry into the Conceptual Foundations of Science*. Cambridge [England]: Cambridge University Press.
- . 1969. *Perception and Discovery; an Introduction to Scientific Inquiry*. San Francisco: Freeman, Cooper.
- . 1971. *Observation and Explanation: A Guide to Philosophy of Science*. New York: Harper & Row.
- Harrison, Edward R. 1987. *Darkness at Night: A Riddle of the Universe*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- . 2000. *Cosmology: The Science of the Universe*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Hawking, Stephen W. 2014. «Information Preservation and Weather Forecasting for Black Holes». enero 22. <http://arxiv.org/abs/1401.5761>.
- Hempel, Carl G. 1950. *Problems and Changes in the Empiricist Criterion of Meaning*. Wetteren: Universal.
- . 1966. *Philosophy of Natural Science*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- . 1991. *Filosofía de la ciencia natural*. Madrid: Alianza.
- Henderson, Janice Adrienne. 1991. *On the Distances between Sun, Moon, and Earth according to Ptolemy, Copernicus, and Reinhold*. Leiden; New York: E.J. Brill.
- Hinton, Geoffrey E. 1988. «Representing part-whole hierarchies in connectionist networks». En *Proceeding of the Tenth Annual Conference of the Cognitive Science Society*, 48-54. Montreal: Erlbaum.
- Hon, Giora, y Yaakov Zik. 2009. «Kepler's Optical Part of Astronomy (1604): Introducing the Ecliptic Instrument». *Perspectives on Science* 17: 307-45.
- Hopkins, Jasper. 1996. *Nicholas of Cusa on wisdom and knowledge*. Minneapolis: A.J. Banning Press.

- Ingoli, Francesco. 1933. «De situ et quiete Terrae contra Copernici systema disputatio». En *Edizione nazionale delle opere di Galileo Galilei*, de Galileo Galilei y Antonio Favaro. Vol. 5. Firenze: Tip. di G. Barbèra.
- Jacobsen, Thorkild. 1957. «Enuma Elish, the Babylonian Genesis». En *Theories of the Universe. From Babylonian Myth to Modern Science.*, de Milton Karl Munitz. Glencoe: Free Press.
- Johnson, Christine R. 2006. «Renaissance German Cosmographers and the Naming of America». *Past and Present*, n.º 191: 3-44.
- Johnson, Francis R., y Sanford V. Larkey. 1934. «Thomas Digges, the Copernican System, and the Idea of the Infinity of the Universe in 1576». *The Huntington Library Bulletin*, n.º 5 (abril): 69-117.
- Jones, Alexander. 2016. «Limits of Observation and Pseudoempirical Arguments in Ptolemy's Harmonics and Almagest». En *Instruments - Observations - Theories. Studies in the History of Early Astronomy in Honor of James Evans*, editado por Cristián C. Carman y Alexander Jones. en prensa.
- Kagan, Richard, y Benjamin Schmidt. 2007. «Maps and the Early Modern State: Official Cartography». En *Cartography in the European Renaissance*, editado por David Woodward. Chicago: University of Chicago Press.
- Karttunen, Hannu. 1987. *Fundamental Astronomy*. Berlin; New York: Springer-Verlag.
- Kepler, Johannes. 1604. *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur*. Francofurti.
- . 1610. *Ioannis Kepleri Dissertatio cum Nuncio sidereo nuper ad mortales misso à Galilæo Galilæo ...* Pragæ: Typis Danielis Sedesani.
- . 2000. *Optics: Paralipomena to Witelo & Optical Part of Astronomy*. Traducido por William H Donahue. Santa Fe, N.M.: Green Lion Press.
- Klimovsky, Gregorio. 1994. *Las desventuras del conocimiento científico: una introducción a la epistemología*. Buenos Aires: A-Z editora.
- Knorr, Wilbur R. 1985. «Archimedes and the Pseudo-Euclidean Catoptrics: Early Stages in the Ancient Geometric Theory of Mirrors». *Archives Internationales D'histoire Des Sciences* 35: 28-105.
- Kosso, Peter. 1989. *Observability and Observation in Physical Science*. Dordrecht; Boston: Kluwer Academic Publishers.

- Koyré, Alexandre. 1979. *Del mundo cerrado al universo infinito*. México: Siglo Veintiuno.
- Kremkow, Jens, Jianzhong Jin, Stanley J Kombar, Yushi Wang, Reza Lashgari, Michael Jansen, Xiaobing Li, Qasim Zaidi, y Jose-Manuel Alonso. 2013. «Neuronal nonlinearity explains greater visual spatial resolution for dark than for light stimuli». *BMC Neuroscience* 14 (Suppl 1).
- Kubovy, Michael. 1988. *The Psychology of Perspective and Renaissance Art*. Cambridge; New York; New Rochelle; Melbourne; Sydney: Cambridge University Press.
- Kuhn, Thomas S. 1962. *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago: University of Chicago Press.
- Kuhn, Thomas S. 1984. *La revolución copernicana*. Barcelona: Orbis.
- Kuhn, Thomas S. 2000. *The Road since Structure: Philosophical Essays, 1970-1993, with an Autobiographical Interview*. Chicago: University of Chicago Press.
- Lakatos, Imre. 1970. «History of Science and Its Rational Reconstructions». *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association* 1970: 91-136.
- Lakatos, Imre, y Elie Zahar. 1975. «Why Did Copernicus' Research Program Supersede Ptolemy's?» En *The Copernican Achievement*, de Robert S. Westman, 354-353. Berkeley: University of California Press.
- Laudan, Larry. 1977. *Progress and Its Problems: Toward a Theory of Scientific Growth*. Berkeley: University of California Press.
- Levinas, Marcelo L., y Aníbal Szapiro. 2011. «El carácter histórico de la concepción cusana de verdad». *Revista Latinoamericana de Filosofía* XXXVII (1): 67-95.
- . 2012. «Las transformaciones de la noción de horizonte como reflejo de las cosmologías y del cambiante carácter de la observación». En *Filosofia e Historia da ciencia no Cone Sul: selecao de trabalhos do 7º Encontro da AFHIC*, editado por Luis Salvático y C. C. Silva, 289-98. Porto Alegre: Entrementes.
- Lindberg, David C. 1968. «The Cause of Refraction in Medieval Optics». *The British Journal for the History of Science* 4 (01).
- López de Velasco, Juan. 1577. «Instrucción y advertimientos para la observación de los eclipses de la luna, y cantidades de las sombras que

- su Majestad manda hazer». En *Ordenanzas de la Hacienda Real en Indias*. Vol. 1:fs 40-41.
- Machetta, Jorge M. 2003. «Lo máximo y la coincidencia de opuestos». En *Acerca de la docta ignorancia*, de Nicolás De Cusa. Buenos Aires: Biblos.
- Mammola, Simone. 2014. *Il problema della grandezza della terra e dell'acqua negli scritti di Alessandro Piccolomini, Antonio Berga e G. B. Benedetti e la progressiva dissoluzione della cosmologia delle sfere elementari nel secondo '500*. Berlin: Max-Planck-Inst. für Wissenschaftsgeschichte.
- Manilio, Marco. 1996. *Astrología*. Traducido por Francisco Calero y María José Echarte Cossío. Madrid: Gredos.
- Manzo, Silvia. 2004. «La cosmología cusana». En *Acerca de la docta ignorancia. Libro II: lo máximo contracto o universo.*, de Nicolás de Cusa, traducido por Jorge M. Machetta, Claudia D'Amico, y Silvia Manzo. Buenos Aires: Biblos.
- Mariconda, Pablo R. 2005. «O alcance cosmológico e mecânico da carta de Galileu Galilei a Francesco Ingoli». *Scientiae studia* 3 (3): 443-65.
- McMullin, Ernan. 1987. «Bruno and Copernicus». *Isis: Department of Science and Technology Studies, Cornell University* 78.
- Mendoza, Ramón G. 1995. *The Acentric Labyrinth: Giordano Bruno's Prelude to Contemporary Cosmology*. Shaftesbury, Dorset; Rockport, Massachusetts: Element.
- Miller, Clyde L. 2015. «Cusanus, Nicolaus [Nicolas of Cusa]». *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu/archives/fall2015/entries/cusanus/>.
- Minsky, Marvin L. 1974. *A Framework for Representing Knowledge*. Cambridge: MIT.
- Moran, Bruce T. 1982. «Christoph Rothmann, The Copernican Theory, and Institutional and Technical Influences on the Criticism of Aristotelian Cosmology». *The Sixteenth Century Journal* 13 (3): 85-108.
- Moranchel Pocaterra, Mariana. 2001. «Las Ordenanzas del Real y Supremo Consejo de Indias de 1636: Primera parte». *Cuadernos de historia del derecho*, n.º 8: 273-379.
- . 2002. «Las ordenanzas del Real y Supremo Consejo de Indias de 1636. Segunda Parte». *Cuadernos de Historia del Derecho*, n.º 9: 247-364.
- Mosterín, Jesús. 2000. *Conceptos y teorías en la ciencia*. Madrid: Alianza.

- Murphy, Gregory L. 2002. *The Big Book of Concepts*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Nersessian, Nancy J. 1994. *Opening the Black Box: Cognitive Science and History of Science*. Atlanta: College of Computing, Georgia Institute of Technology.
- Netz, Reviel. 2004. *The Shaping of Deduction in Greek Mathematics a Study in Cognitive History*. Cambridge; New York: Cambridge University Press.
- Neugebauer, Otto. 1975. *A History of Ancient Mathematical Astronomy*. Berlin; New York: Springer-Verlag.
- Nunn, George E. 1932. *The Columbus and Magellan Concepts of South American Geography*. Glenside: Priv. Print.
- Oberheim, Eric. 1999. «Appendix: The Works of Paul Feyerabend». En *Knowledge, Science, and Relativism: 1960-1980*, de Paul K. Feyerabend, editado por John Preston. New York: Cambridge University Press.
- . 2006. *Feyerabend's Philosophy*. Berlin; New York: Walter de Gruyter.
- O'Gorman, Edmundo. 1958. *La invención de América; el universalismo de la cultura de Occidente*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Ordine, Nuccio. 2008. *El umbral de la sombra: literatura, filosofía y pintura en Giordano Bruno*. Madrid: Siruela.
- Panofsky, Erwin. 2003. *La perspectiva como «forma simbólica»*. Barcelona: Tusquets Editores.
- Parry, John H. 1991. *El descubrimiento del mar*. México D.F.: Grijalbo.
- Pedersen, Olaf, y Alexander Jones. 2011. *A Survey of the Almagest*. New York: Springer.
- Pines, Shlomo. 1986. *Studies in Arabic Versions of Greek Texts and in Mediaeval Science*. Jerusalem; Leiden: Magnes Press, Hebrew University ; E.J. Brill.
- Popper, Karl R. 1959. *The Logic of Scientific Discovery*. New York: Basic Books.
- Portuondo, María M. 2009. *Secret Science Spanish Cosmography and the New World*. Chicago: University of Chicago Press.
- Posner, George J., Kenneth A. Strike, Peter W. Hewson, y William A. Gertzog. 1982. «Accommodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change». *Science Education* 66 (2): 211-27.

- Powell, John. 1935. «Perfection as a Cosmological Postulate: Aristotle and Bruno». *The Philosophical Review* 44 (1): 57-68.
- Preston, John. 1997. *Feyerabend: Philosophy, Science, and Society*. Cambridge, UK; Malden, Massachusetts: Polity Press.
- Preston, John, Gonzalo Munévar, y David Lamb, eds. 2000. *The Worst Enemy of Science? Essays in Memory of Paul Feyerabend*. New York; Oxford: Oxford University Press.
- Ptolomeo, Claudio. 1967. *The Arabic Version of Ptolemy's Planetary Hypotheses*. Traducido por Bernard Raphael Goldstein. Philadelphia: American Philosophical Society.
- . 1984. *Ptolemy's Almagest*. Traducido por Gerald J. Toomer. New York: Springer-Verlag.
- . 1996. *Ptolemy's Theory of Visual Perception: An English Translation of the Optics*. Traducido por A. Mark Smith. Philadelphia: American Philosophical Society.
- Pumfrey, Stephen. 2009. «Harriot's Maps of the Moon: New Interpretations». *Notes and Records of the Royal Society* 63 (2): 163-68.
- Reichenbach, Hans. 1938. *Experience and Prediction; an Analysis of the Foundations and the Structure of Knowledge*. Chicago: University of Chicago Press.
- Riedenauer, Markus. 2005. «Pluralità di prospettive finite nell'orizzonte dell'infinito. Conseguenze della epistemologia nuova di Cusano». En *El problema del conocimiento en Nicolás de Cusa: genealogía y proyección*, editado por Jorge M. Machetta y Claudia D'Amico. Buenos Aires: Editorial Biblos.
- Rindler, Wolfgang. 1956. «Visual Horizons in World Models». *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 116: 662.
- Rodrigues Neto, Guilherme. 2013. «Euclides e a geometria do raio visual». *Scientiae Studia* 11 (4): 873-92.
- Rosch, Eleanor, Carolyn B. Mervis, Wayne D. Gray, David M. Johnson, y Penny Boyes-Braem. 1976. «Basic Objects in Natural Categories». *Cognitive Psychology* 8 (3): 382-439.
- Rosen, Edward. 1985. «The Dissolution of the Solid Celestial Spheres». *Journal of the History of Ideas* 46 (1): 13-31.

- Rossi, Paolo. 2001. *The birth of modern science*. Oxford; Malden, Mass.: Blackwell.
- Sabra, Abdelhamid I. 1967. *Theories of Light from Descartes to Newton*. London: Oldbourne.
- Sacrobosco, Iohannis de. 1478. *Tractatus de Sphæra*. Editado por Roberto Andrade Martins. Campinas: Universidade Estadual de Campinas en base a Ed. Venice: Adam de Rottweil, circa 1478.
- Santa Cruz, Alonso de, y Antonio Blázquez. 1921. *Libro de las longitudes y manera que hasta agora se ha tenido en el arte de navegar*. s.n.: s.n.
- Santinello, Giovanni. 1958. *Il pensiero di Nicolò Cusano nella sua prospettiva estetica*. Padova: Liviana editrice.
- Saralegui y Medina, Manuel de. 1914. *Alonso de Santa Cruz, inventor de las cartas esféricas de navegación*. Madrid: Impr. de los hijos de M.G. Hernandez.
- Sarton, George. 1957. *The Study of the History of Mathematics, and The Study of the History of Science*. New York: Dover Publications.
- Schmidle, Nicholas. 2013. «A Very Rare Book - The New Yorker». *The New Yorker*, diciembre 16. <http://www.newyorker.com/magazine/2013/12/16/a-very-rare-book>.
- Sekiguchi, Naosuke. 1980. «Photometry of the Lunar Surface during Lunar Eclipses». *The Moon and the Planets* 23 (1): 99-107.
- Shapere, Dudley. 1966. «Meaning and Scientific Change». En *Mind and Cosmos; Essays in Contemporary Science and Philosophy*, de Robert G. Colodny. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Singer, Dorothea W. 1941. «The Cosmology of Giordano Bruno (1548-1600)». *Isis* 33: 187-96.
- Smith, A. Mark. 1996. «Introduction». En *Ptolemy's Theory of Visual Perception: An English Translation of the Optics*, de Claudio Ptolomeo. Philadelphia: American Philosophical Society.
- Sobel, Dava. 1997. *Longitud*. Madrid: Debate.
- Suppe, Frederick, ed. 1977. *The Structure of Scientific Theories*. Urbana: University of Illinois Press.

- Swerdlow, Noel M. 1975. «On Copernicus' Theory of Precession». En *The Copernican Achievement*, de Robert S. Westman, 49-98. Berkeley: University of California Press.
- . 1998. «Galileo's Discoveries with the Telescope and Their Evidence for the Copernican Theory». En *The Cambridge Companion to Galileo*, editado por Peter Machamer, 244-70. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 2004. «An Essay on Thomas Kuhn's First Scientific Revolution, "The Copernican Revolution"». *Proceedings of the American Philosophical Society* 148 (1): 64-120.
- Swerdlow, Noel M., y Otto Neugebauer. 1984. *Mathematical Astronomy in Copernicus's De Revolutionibus*. New York: Springer-Verlag.
- Swinburne, Richard G. 1966. «Cosmological Horizons». *Philosophy of Science* 33 (3): 210-14.
- Szapiro, Aníbal. 2007. «La explicación histórica: un análisis de su naturaleza a través del estudio del pensamiento de Nicolás de Cusa». Tesis de Licenciatura, Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- . 2010. «El campo de investigaciones sobre cambio conceptual y sus aportes al estudio de las revoluciones científicas. Una aproximación crítica desde la historia de la ciencia». En *Epistemología e Historia de la Ciencia: Selección de Trabajos de las XX Jornadas*, editado por Alba Massolo y Pío García, 595-605. Córdoba: UNC.
- Tannery, Paul. 1976. *Recherches sur l'histoire de l'astronomie ancienne*. New York: Arno Press.
- Taub, Liba Chaia. 1993. *Ptolemy's Universe: The Natural Philosophical and Ethical Foundations of Ptolemy's Astronomy*. Chicago: Open Court.
- Thagard, Paul. 1992. *Conceptual Revolutions*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Thoren, Victor E., y John R. Christianson. 1990. *The Lord of Uraniborg: A Biography of Tycho Brahe*. New York: Cambridge University Press.
- Toomer, Gerald J. 1980. «Hipparchus' Empirical Basis for His Lunar Mean Motions: A Historical Footnote to Olaf Pedersen, A Survey of the Almagest, 161-64». *Centaurus* 24: 97-109.
- . 1984. *Ptolemy's Almagest*. New York: Springer-Verlag.

- Toulmin, Stephen. 1961. «Seventeenth Century Science and the Arts». En *Seventeenth Century Science and the Arts*, editado por Hedley H. Rhys. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Tula Molina, Fernando. 2011. *Eficacia y legitimidad en las prácticas científicas los textos galileanos tras la huella de Paul Feyerabend*. Buenos Aires: Eudeba.
- van Fraassen, Bas C. 1987. *The Scientific Image*. Oxford: Clarendon Press.
- Van Helden, Albert. 1985. *Measuring the Universe: Cosmic Dimensions from Aristarchus to Halley*. Chicago; London: University of Chicago press.
- van Maanen, Adriaan. 1918. «Stellar Parallaxes». *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 30 (173): 29-36.
- Vernet, Juan. 2000. *Astrología y astronomía en el Renacimiento: la revolución copernicana*. Barcelona: El Acantilado.
- Vidal, Silvina P., y José E. Burucúa. 2004. «La perspectiva naturalis y la perspectiva artificialis en la obra de Giordano Bruno: los avatares de su dialéctica entre los argumentos a favor de la infinitud del universo». *Revista latinoamericana de filosofía* 30 (1): 125.
- Vogel, Klaus. 2006. «Cosmography». En *Early Modern Science*, editado por Katharine Park y Lorraine Daston. Cambridge: Cambridge University Press.
- von Helmholtz, Hermann. 1896. *Handbuch der physiologischen Optik*. Hamburg: Voss.
- Vosniadou, Stella, ed. 2008. *International Handbook of Research on Conceptual Change*. New York: Routledge.
- . , ed. 2013. *International Handbook of Research on Conceptual Change*. London: Routledge.
- Westman, Robert S. 2011. *The Copernican Question: Prognostication, Skepticism, and Celestial Order*. Berkeley: University of California Press.
- Whittlesey, Derwent. 1945. «The Horizon of Geography». *Annals of the Association of American Geographers* 35 (1).
- Williams, Mari. 1982. «James Bradley and the Eighteenth Century “Gap” in Attempts to Measure Annual Stellar Parallax». *Notes and Records of the Royal Society of London* 37 (1): 83-100.

- Winkler, Mary G., y Albert Van Helden. 1992. «Representing the Heavens: Galileo and Visual Astronomy». *Isis / Department of Science and Technology Studies, Cornell University*. 83.
- Würschmidt, José. 1950. «Refracción atmosférica». *Revista de la Unión Matemática Argentina* 14 (3): 163-81.
- Yamaki, Kazuhiko. 2013. *Nicholas of Cusa: A Medieval Thinker for the Modern Age*. London: Routledge.
- Yates, Frances A. 1964. *Giordano Bruno and the Hermetic Tradition*. Routledge. London.
- Zik, Yaakov. 2002. «Kepler and Galileo: Theories of Light and Vision: Practical Knowledge and the Status of the Telescope as a Scientific Instrument at the Beginning of the Seventeenth Century». Haifa: University of Haifa.