

XXVIII FERIA PROVINCIAL DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

¿PODEMOS MEDIR LA ROTACIÓN DEL SOL?

San Bernardo del Tuyú, 10 al 13 de Octubre de 2000

ÁREA: CIENCIAS EXACTAS

SUBÁREA: ASTRONOMÍA

NIVEL: "F"

BADANO, Sebastián

DONÁ, Natalia Verónica

Asesor: DE LAURENTI, Miguel Ángel

**CLUB de CIENCIAS " Ing. ÁNGEL DI PALMA"
29 N° 575 - (6600) MERCEDES - Prov. de BUENOS AIRES**

AÑO 2000

¿PODEMOS MEDIR LA ROTACIÓN DEL SOL?

BADANO, Sebastián, 5° año “A”, 17 años, [1]

DONÁ, Natalia Verónica, 5° año 3^{a.}, 17 años, [2]

**CLUB DE CIENCIAS “ Ing. ÁNGEL DI PALMA”
Mercedes - Buenos Aires - Argentina**

Asesor: DE LAURENTI, Miguel Ángel
Director, Observatorio Astronómico Municipal Mercedes [3]

[1] E.E.T. N° 1, calle 31 N° 51 (6600) Mercedes (Bs. As.)

[2] E. N. S. media N° 5, calle 29 N° 874 (6600) Mercedes (Bs. As.)

[3] Observatorio Astronómico Municipal Mercedes, calle 29 N° 575 (6600) Mercedes (Bs. As.)

ÍNDICE

Resumen.....	pág. 4
Introducción.....	5
I) Antecedentes.....	5
II) Motivación del trabajo.....	8
III) Objetivos.....	9
IV) Observación del Sol y sus manchas... ..	9
Hipótesis.....	15
Desarrollo.....	16
a) Equipo y técnica utilizada.....	16
b) Cronograma.....	19
c) Recolección de datos.....	19
d) Selección de datos.....	21
e) Elaboración de datos.....	21
f) Resultado final.....	22
g) Mejoras al método y extensión del trabajo.....	24
Conclusiones.....	25
Bibliografía.....	26
Agradecimientos.....	27
Apéndice (diagramas, fotos, registros, gráficos, tablas).....	28

RESUMEN:

Se describe someramente el Sol desde un punto de vista astrofísico y se lo compara con otras estrellas para señalar la importancia que tiene la rotación en la evolución de las mismas. Esto fue lo que motivó a los autores a realizar el presente trabajo (que NO es *sobre* el Sol ni sus manchas sino sobre su rotación), con el objetivo de que sea asequible a cualquier institución. Se indican distintas maneras de hacer esta medición, los factores que intervienen y sus ventajas comparativas y las hipótesis que llevaron a optar por un método dado, que consiste en observar manchas en ciertas posiciones y durante un lapso relativamente corto de días seguidos, lo que dependerá del clima, etc. Luego se describen las observaciones realizadas con esta técnica, la selección de las mismas para su interpretación, el análisis de los datos y el resultado obtenido. Este es muy bueno en su valor promedio, y aceptable en sus valores individuales. Se demuestra la rotación diferencial del Sol. Finalmente se indican errores y posibles mejoras. Si bien por su naturaleza el método es aproximado, las hipótesis se ven corroboradas y el objetivo cumplido.

INTRODUCCIÓN:

I) ANTECEDENTES:

¿Que importancia puede tener el medir a que velocidad gira el Sol, o una estrella cualquiera, sobre su eje? Para contestar esta pregunta es necesario realizar una breve descripción del Sol y de la evolución estelar.

El Sol, como toda estrella, es una esfera de gas. Su composición es hidrógeno (92,1%) y helio (7,8%), además de otros elementos mas pesados en menor cantidad.

Es la estrella más cercana a la Tierra, y la única en la que podemos observar rasgos superficiales. Dista de ésta unos 150 millones de kilómetros, tiene un diámetro de, aproximadamente, 1.392.000 km, posee más del 99,99% de la masa de todo el Sistema Solar, una densidad 1,4 veces la del agua y una gravedad 28 veces la terrestre.

Está dividido en el núcleo (donde ocurre el proceso de fusión nuclear que genera la energía en el Sol), la zona de radiación o radiativa, la zona convectiva (donde se transporta la energía generada en el núcleo, por medio de esos dos mecanismos), la fotosfera (verdadera superficie visible del Sol), y la cromosfera y la corona (su atmósfera, cercana y externa respectivamente).

En la fotosfera, de unos 500 kms. de espesor, hay zonas oscuras características como las manchas solares, zonas más brillantes como las fáculas y granulaciones o gránulos.

Las manchas solares están creadas por el campo magnético solar, éste tiene un ciclo de actividad que dura aproximadamente 11 años. Las manchas son regiones de baja temperatura (4.000° C) comparada con la fotosfera (6.000° C) y éstas no son equiparables con la temperatura del núcleo (15.000.000° C). Los tamaños de las manchas son variables (800 a 180.000 km de diámetro, aunque este último valor es excepcional).

Las fáculas son regiones brillantes que generalmente están asociadas a las manchas solares. A veces suelen aparecer cuando éstas desaparecen.

La superficie de la fotosfera presenta un conjunto de granulaciones, es decir, granos de pequeño diámetro difíciles de apreciar y estudiar pues cambian continuamente. Su duración es en promedio de medio minuto y alcanzan diámetros que varían entre 200 y 1.400 km.

Comparado con otras estrellas, el Sol tiene un tamaño y temperatura medio: una típica estrella de secuencia principal y tipo espectral G0; también la podríamos denominar enana amarilla. Como toda estrella, tiene un ciclo evolutivo: formación, una etapa de vida normal (de la cual lleva 5 000 000 000 de años y le resta otro tanto), una serie de alteraciones comparativamente rápidas y un estadio final largo como un objeto muy denso.

Si bien todas las estrellas se forman igual, y tienen una composición parecida (aunque distintas temperaturas superficiales y tamaños), su evolución no es igual; en particular, su vida “normal” puede ser de varias veces la del Sol o de solo una pequeña fracción de la de éste. Además de estas variantes cronológicas, el final de

una estrella puede ser muy distinto, abarcando desde largas etapas a explosiones cataclísmicas.

¿Qué factores propios de la estrella intervienen para que se observen tan distintas evoluciones? El parámetro fundamental es la masa inicial de la estrella (y también la masa residual en estrellas muy masivas luego de fenómenos catastróficos); digamos, brevemente, que no existen estrellas de cualquier masa (no confundir con diámetro): se las encuentra entre aproximadamente 0.15 a 60 o 70 masas solares, y cuanto mayor es ésta más rápidos los procesos evolutivos y más corta la vida de la estrella. El otro coeficiente importante es la velocidad de rotación de la estrella, por estar ligado a factores vinculados a su estructura.

Las estrellas se forman a partir de una enorme nube de gas, que en general rota muy despacio; al contraerse para formar la estrella (de diámetro mucho más pequeño), y para mantener el momento angular, la velocidad de rotación se incrementa. Esta velocidad en la etapa “normal” de la estrella es en general elevada en estrellas calientes, azules (alrededor de 250 km/seg, en el ecuador) y va disminuyendo al pasar por estrellas más frías, amarillas y rojas (entre 70 y 5 km/seg). Señalamos en el ecuador, porque las estrellas no giran como un cuerpo rígido dada su estructura gaseosa; lo hacen más rápido en el ecuador y más lento en los polos. En el caso particular del Sol, su velocidad es muy baja: 2 km/seg (siempre en el ecuador). Lo que implica que el Sol completa un giro sobre su eje en alrededor de 26 días. Es de señalar que se supone que en su interior rota más rápido. Estas velocidades (altas o bajas) ocasionan distintos fenómenos: poco o mucho mezclado de los elementos,

eyecciones en el plano ecuatorial, etc. Y éstos influyen en el camino evolutivo del astro, en algún momento del mismo.

En cuanto a la forma de medir esta rotación, se hace aplicando el conocido efecto Doppler a la luz a través del análisis espectroscópico a la misma, lo que se traduce en el caso concreto del Sol en que la observación de su borde (“limbo”) Este se aproxima al observador lo que se manifiesta como un desplazamiento a longitudes de onda más cortas o frecuencias más altas (azules) en su espectro; lo opuesto ocurrirá en el limbo Oeste (ondas más largas, menor frecuencia, rojas). Esta técnica, formalmente correcta, requiere de un instrumental muy especializado y es la única que se puede utilizar en el caso de las estrellas, lejanas; se verá que para el Sol, al poder observar su superficie, se cuenta con una opción aceptable.

II) MOTIVACIÓN DEL TRABAJO:

Los integrantes del grupo que realizaron este trabajo son estudiantes de secundario que además participaron, como miembros del Club de Ciencias que los nuclea, en cursos de astronomía y astrofísica brindados por el Observatorio Astronómico Municipal de Mercedes. Precisamente a raíz de una charla dada sobre “evolución estelar” (de la que se extrae lo mencionado en “Antecedentes”) surgió en los autores la idea de medir la rotación del Sol utilizando las manchas solares, como ejemplo de determinación de tan importante parámetro y dado que no se cuenta con el instrumental para determinar la rotación en el caso de estrellas, ya que estas no presentan un disco visible. Y al igual que en un trabajo anterior realizado por este Club (“¿Podemos medir la velocidad de la luz?”) los mueve la idea de hacer

determinaciones fundamentales con instrumental y técnicas sencillas, al alcance de cualquier institución.

Como se ha indicado en el resumen, no es un trabajo sobre el Sol en cuanto a posición o estructura o características; tampoco lo es sobre las manchas en sí, aunque podría continuarse o completarse en esa dirección con muchas más observaciones y otro análisis completamente distinto. Simplemente se toma el Sol (como ejemplo de estrella) y sus manchas para utilizar instrumental sencillo y llegar a una medida de su rotación, parámetro éste que influye en la evolución estelar como se ha señalado (tampoco es un trabajo sobre esta evolución).

III) OBJETIVOS:

- 1) Obtener, utilizando un telescopio sencillo, con observaciones que no demoren mucho tiempo (un curso escolar), el período de rotación del Sol en el ecuador y en latitudes más altas. Utilizando una técnica tal que el trabajo lo pueda realizar una institución común.
- 2) Demostrar la rotación diferencial del Sol.
- 3) Hallar fuentes de error. Estudiar cómo se puede perfeccionar la metodología de trabajo.

IV) OBSERVACIÓN DEL SOL Y SUS MANCHAS:

Es importante aclarar ante todo que **LA OBSERVACIÓN DIRECTA DEL SOL ES PELIGROSA PARA LA VISTA, POR LO QUE DEBE EVITARSE**

SIEMPRE. En particular se debe tener cuidado con filtros caseros o inapropiados, que muchas veces dejan pasar radiación ultravioleta suficiente para dañar la vista. Mas abajo se describirá la técnica para una observación segura.

Podemos ver el Sol como un disco amarillento, que se oscurece hacia el borde; ocasionalmente, o con una ayuda óptica, vemos algún rasgo superficial como los indicados, casi exclusivamente manchas. Desde la antigüedad los observadores chinos notaron la existencia de manchas oscuras en el Sol, pero las observaciones las hacían a simple vista cuando el Sol estaba bajo u oculto parcialmente por la niebla. Alrededor del 1600, Galileo Galilei usó su telescopio para probar que las manchas no eran nubes situadas en la superficie solar (fotosfera), como indicaban algunos, sino que eran rasgos propios de la fotosfera. En el siglo XIX, Richard Carrington observó que las manchas solares que estaban próximas al ecuador solar tardaban dos días menos en dar la vuelta al Sol que las manchas ubicadas a mayores latitudes. Con esto se llega a la conclusión de que el Sol no rota como un cuerpo rígido. El Sol, con sus manchas, rota de Este a Oeste . Es decir, vemos a las manchas desplazarse en trayectorias paralelas al ecuador solar (longitud), derivando muy poco en latitud.

¿Cómo son las manchas? Su estructura presenta dos zonas características, una llamada “umbra” que se observa de color oscuro rodeada de otra, la “penumbra”, de color más claro, donde se observan estrías. El color de estas zonas no es real sino que al ser menos brillantes que la fotosfera parecen ser más oscuros. Generalmente aparecen en grupos. No son fijas ni permanentes. Evolucionan y mientras las más pequeñas duran sólo unos días, las mayores pueden durar más de 100 días. Es raro observarlas cerca de los polos, en general son ecuatoriales o hasta latitudes medias.

El número de manchas que se observan no es siempre el mismo. Existen períodos en que casi no se observan y otros por el contrario donde abundan. Si se construyen gráficos con el número medio anual de manchas, se comprueba que éstas cumplen ciclos de 11,3 años. Precisamente en este año 2000 se atraviesa un máximo de este ciclo, lo que favorece su observación.

Para estudiar como rota el Sol se prefiere usar las manchas solares, ya que los otros rasgos superficiales que presenta el Sol son de menor apreciación, definición y duración. Si bien las manchas se mueven diferencialmente con el Sol, el movimiento es casi insignificante (sobre todo en períodos cortos) y no siempre se da, por eso se pueden utilizar como “marcas” en el Sol que pueden ayudar a demostrar que gira y cuanto dura esa rotación. Es importante señalar que otros rasgos pueden tener pequeñas diferencias en período con respecto a las manchas, cosa fácil de visualizar si recordamos que es un medio gaseoso.

En principio, el trabajo a realizar es sencillo: se utiliza un pequeño telescopio para proyectar una imagen del Sol, de un tamaño apropiado, sobre una hoja de papel. En ésta se dibuja el contorno del Sol (lo que se puede hacer previamente, tras unas pruebas) y las manchas que se observan (sí las hubiera). Se anota fecha y hora y condiciones de visibilidad y cualquier otro dato de interés (p. ej. equipo, observador, etc., lo que en este trabajo no ha variado). Las observaciones se repiten todos los días posibles, durante unos meses. No es razonable esperar que el Sol complete una revolución sobre su eje (casi un mes) manteniendo una mancha dada sin deformarse (para poder reconocerla) y sin que esta se traslade sobre su superficie. Por lo tanto, se debe medir su cambio de posición (del E al W) en un corto lapso, p. ej. de 2 a 5 días.

Como la imagen es un disco pero en realidad observamos una esfera, no es conveniente tomar mediciones de manchas en los bordes, que aparecerán distorsionadas (“efecto Wilson”). Es mejor hacerlo, entonces, cerca del meridiano central de nuestra observación. A continuación se lleva ese desplazamiento **angular** en el tiempo tomado a la revolución completa de 360° ; el nuevo tiempo obtenido es el período del Sol, **a la latitud observada** (puede compararse con datos conocidos)

Este período se denomina sinódico, dado que en el transcurso de las observaciones, mientras el Sol gira, la Tierra efectúa su movimiento de traslación, por consiguiente cambia el punto de vista con respecto a la primera observación. Para obtener el verdadero giro del Sol (mecánico, con respecto a las estrellas “fijas”) denominado período sidereo, se debe hacer un sencillo cálculo como se indica en la elaboración de datos.

Ya se ha señalado que vemos el Sol como un disco, cuando es una esfera. Y que el desplazamiento de la mancha en ese disco, lineal, debe pasarse a una medida angular. Una forma de hacerlo puede verse en el **Diagrama 1**, adaptado de Gingerich y Tresch-Fienberg (1982). El diagrama se explica por sí solo (los puntos en el disco son manchas en distintas fechas, y se pasa a un ángulo). Otra solución es trazar una grilla con latitudes y longitudes, similares a las de un globo terraqueo: se medirá el desplazamiento en longitud, que es angular. Pero para realizar esta grilla se debe tener en cuenta como se ve el Sol desde la órbita terrestre.

En efecto, la inclinación que tiene el ecuador solar con respecto a la eclíptica o plano de la órbita terrestre varía en el transcurso de la traslación de la Tierra alrededor del Sol y alcanza un máximo de poco más de 7° . Además, el ecuador

terrestre está inclinado con respecto a la eclíptica $23^{\circ}.5$. El efecto combinado de ambos valores hace ver el Sol como un trompo, inclinando el eje de giro (p.ej. N) hacia la Tierra o en sentido opuesto desde 0° hasta $7^{\circ}.2$ (latitud heliográfica B_0); y con respecto a la dirección N-S celeste, el eje de giro del Sol tendrá una inclinación, hacia el E u W, de 0° a $26^{\circ}.3$ (ángulo de posición P). En el **Diagrama 2**, adaptado de Fucci (1986) se puede observar en la parte superior la órbita de la Tierra; se ha señalado en el mismo el Sol con su eje y su ecuador, la Tierra con lo mismo y su oblicuidad con respecto a la eclíptica, a ésta con sus polos y para todos su sentido de giro (igual). Además se señala la causa de diferencia entre período sinódico y sidéreo, puesto de manifiesto entre las posiciones T y T' con respecto a una mancha m (m'). En la parte inferior de este diagrama se puede ver la resultante de este “cabeceo” del Sol a lo largo del año y cada 3 meses. El ángulo entre NS y N'S' es B_0 . Las manchas usualmente no se desplazarán recorriendo sobre el disco trayectorias rectilíneas, sino que describirán elipses, que representan las proyecciones ortográficas de los paralelos solares vistos desde la Tierra. Solamente en los casos en que nuestro planeta se encuentra en los dos puntos opuestos de su órbita en que la eclíptica corta al plano del ecuador solar, las manchas tendrán un movimiento aparente rectilíneo, puesto que en esas circunstancias el ecuador solar se presentará como un diámetro del disco aparente (la línea visual Tierra-Sol es perpendicular al eje de rotación del Sol).

Entonces, a principios de junio y diciembre los dos polos se encuentran exactamente sobre el limbo, $B_0=0^{\circ}$ y P es -14° y $+14^{\circ}$ respectivamente; los valores máximos de P se dan a principios de abril (-) de octubre (+): desde enero hasta julio el polo norte se encuentra al W (-) de la dirección N-S y de julio a enero al E (+) .

A principios de septiembre el polo norte del Sol está dirigido hacia la Tierra con $B_0 = +7^\circ.2$; y a principios de marzo se nos presenta el polo sur con $B_0 = -7^\circ.2$. Todos estos valores, exactos, se obtienen de una Efemérides Astronómicas (2000).

Para decirlo en forma clara: B_0 indica cuanto un polo del Sol está inclinado hacia nosotros ($-7^\circ \dots 0^\circ \dots +7^\circ \dots$) y P indica cuanto está inclinado ese eje respecto de nuestra dirección N-S ($-26^\circ \dots 0^\circ \dots +26^\circ \dots$).

NOTA: Además de B_0 y P las tablas indican L_0 , longitud heliográfica (que es equivalente al meridiano de Greenwich terrestre) del centro del disco. Este se define como el meridiano que el 01.5/01/1854 pasó por el nodo ascendente (es decir sobre la eclíptica) del ecuador solar. Se cuenta de 0° a 360° en dirección E-W del disco aparente. Siendo la determinación de los autores *diferencial*, este valor no es relevante y no se lo utiliza.

Por todo lo expuesto, una solución es hacer unos discos de tamaño apropiado con una grilla de latitud y longitud acorde con la inclinación que tiene el ecuador del Sol (B_0) en la fecha de la observación (redondeada al grado). Este disco se orienta en la dirección E-W, lo que nos dará la dirección N-S (celeste). Para obtener E-W y N-S solar se gira este disco (+,-) P° . Otra manera de resolver esto podría ser observar con 0° de inclinación ($B_0=0$), solución muy azarosa (por el clima), además no coincide con $P=0$ aunque esto no es tan importante si se cuenta con buenas y abundantes observaciones (es decir muchos días seguidos y muchas manchas). Obviamente, lo mejor es el disco. Este se puede construir fácilmente con un software comercial. En el desarrollo de las observaciones se indicará como fue usado por los autores.

En resumen, las hipótesis que manejamos para realizar este trabajo se indican a continuación.

HIPÓTESIS:

- 1) Si el Sol gira y presenta rasgos fijos (manchas) en su superficie, éstas girarán con él en torno a su eje y paralelas al ecuador solar; entonces se puede, mediante observaciones adecuadas y su posterior análisis, demostrar el movimiento del Sol y cuál es la duración de esa rotación y si esta es uniforme o no en toda su superficie.
- 2) Las condiciones de observación serán tales que podamos medir la posición angular de manchas bien identificables alejadas de los bordes, en latitudes ecuatoriales y medias y durante 3 a 5 días seguidos, para minimizar cambios propios de las manchas.

DESARROLLO:

En este apartado se describirá el equipo usado para efectuar las observaciones y la técnica utilizada; el cronograma de dichas observaciones; las observaciones en sí (recolección de datos) y su posterior selección, etc.; y los resultados obtenidos (elaboración de datos). Un detalle cronológico de todo esto se puede ver en la "carpeta de campo", partes de la misma seleccionadas (registros, hoja de cálculo final) se puede ver reproducida en el apéndice. También se indican posibles mejoras.

a) Equipo y técnica utilizados: Todas las observaciones se hicieron con un telescopio refractor de 85 mm de diámetro y aprox. 1.20 mts. de distancia focal con un ocular de 20 mm lo que da unos 60 aumentos. Este cuenta con una montura ecuatorial tipo alemana , no tiene ningún mecanismo de relojería motorizado que compense el movimiento de rotación terrestre automáticamente, ésto se hace a mano a través de un tornillo sinfín y un engranaje que mueven el tubo del telescopio para dejar la imagen centrada.

Modificar un telescopio de este tipo para la observación solar es fácil: los autores fabricaron un soporte "casero", solidario al telescopio, para una pantalla de chapa fina de 25 x 25 cm que se coloca tras el ocular, a unos 30 cm y que permite su desplazamiento longitudinal. Sobre esta chapa se coloca bien sujeta una hoja de papel, en la que se proyecta el disco solar. Es muy fácil enfocar el sol SIN mirar por el buscador (¡peligroso!). Se optó por enfocar hasta tener una imagen de diámetro 20 cm exactos, uniformando así los registros lo que para la técnica usada es importante.

Como la claridad diurna dificulta ver la imagen proyectada, se instaló delante una “sombrija” de madera terciada de 60 x 60 cm para que proyecte una sombra sobre la pantalla de observación. Su posición es tal que el telescopio queda bien contrapesado o balanceado. Todo el instrumento puede verse en las **fotografías A y B**.

La técnica es muy sencilla: en la pantalla de proyección se coloca una hoja de registro en blanco, como la que se ve en el apéndice, previamente confeccionada y con un diámetro del disco solar de 20 cm. y el centro marcado. Se apunta al Sol y se hace coincidir su imagen proyectada con los bordes del círculo. Los autores encuentran esta hoja de registro en blanco más fácil de usar que la hoja con grilla. Luego se observa una mancha y su desplazamiento (con el Sol) debido a la rotación de la Tierra, es decir sin mover el telescopio para contrarrestar ésta. La dirección en que se desplaza es de E a W. Se traza una línea en esta dirección que pase por el centro; una perpendicular a ésta nos da la dirección N-S (si el W está a las 12 hs., el N está a las 3 hs., lo que puede verificarse moviendo el telescopio en declinación en un sentido conocido). Una alternativa es dibujar previamente las dos líneas, hacer coincidir una mancha y ver su desplazamiento y mover la hoja para que coincida éste con la línea; pero como en algunas posiciones la pantalla tocaba la montura si se la giraba y la hoja de registro tenía un tamaño algo ajustado, se usó el primer método. Estos puntos son celestes, para pasarlos a solares debemos girar la hoja (+,-) P° . Por el motivo señalado anteriormente, se decide marcar después esta dirección N-S y E-W solar, con un transportador y a partir de las líneas originales celestes, las que se borran para evitar confusiones. Una alternativa es tener una escala graduada en la hoja (Fucci, 1986) o en la pantalla, móvil y con espacio suficiente. En las **fotografías**

C y D se observa la hoja y el sol proyectado en ella, distinguiéndose claramente unas manchas (la distorsión es debida a paralaje, al no estar alineado el eje óptico de la cámara con la normal a la pantalla).

Con todo dispuesto, se dibujan las manchas solares visibles con la mayor exactitud posible y se anotan fecha y hora y visibilidad. Mientras se dibuja se debe contrarrestar el movimiento terrestre cada 10 segundos aprox, porque con los aumentos que el telescopio brinda, la imagen se “corre” muy rápido. Se debe destacar lo esencial de la orientación, que no debe fiarse a “como estaba el día anterior”, sobre todo en una montura alemana por el problema de su tránsito (es decir pasar el telescopio de uno a otro lado del meridiano local). No interesa si vemos al Sol “derecho” o invertido. Lo importante es marcar bien los puntos en el registro. También es importante marcar RÁPIDO y BIEN las manchas. En la carpeta de campo hay un cálculo de error: 2 mm en el registro (1%) implican $1^{\circ}.8$ en la rotación y esto representa $0^{\text{d}}.13$ (casi 3 hs.).

Las fechas y horas están en HLA (Hora Legal Argentina), que tiene una diferencia de 3 horas (GMT-3) con el Tiempo Universal (UT), que es la hora del Meridiano de Greenwich; por ejemplo, a las 22 hs. del 15/10/2000 HLA son las 1 hs. del 16/10/2000 UT. Luego se expresarán estos tiempos en JD (Día Juliano), que es un calendario en que se cuentan los días en forma consecutiva (sin meses ni años). Se expresa en tiempo medio y comienza el 1/1/4713 a.C. (JD=1). La hora se anota, junto con el día, como fracción decimal de día, lo que lo hace muy útil para cálculos astronómicos, además de que el día juliano cambia al mediodía y no a la medianoche. Se puede calcular con un programa de computación o sacarlo de un manual

astronómico. Así, para 2000, el JD es 2451543,5 (“,5” por la medianoche) + día del año. Luego se reduce hora, minuto y segundo a día y se le suma a este valor. Esto sólo lo haremos con los registros seleccionados, es decir los que cumplan el punto (2) de las hipótesis.

b) Cronograma: Se tratará de hacer observaciones durante algunos meses, una vez al día y siempre que el clima y la disponibilidad del instrumento lo permitan. Luego se elegirán las más favorables para los cálculos, como se indicó más arriba.

c) Recolección de datos: Se observó el Sol unos 30° por arriba del horizonte al menos, para evitar problemas de refracción que introducirían errores en la imagen y consecuentemente en el dibujo y cálculos, y con cielo despejado. Tampoco es favorable observar con el objeto bien alto (preferentemente en verano), porque el ocular del instrumento puede sobrecalentarse. Es conveniente observar a media mañana antes de que el Sol caliente el ambiente y ponga algo difusa la imagen; pero por problemas de horizonte E desde el lugar de observación se impuso hacerlo de tarde casi siempre.

Registros y Observaciones: los autores se remiten a la carpeta de campo, donde se encontrarán todos los registros acá indicados:

26/12/1999 14:30; visibilidad regular; B0= -2,32; P= +5.00

29/12/1999 15:45; visibilidad buena; B0= -2,69; P= +3.30

30/12/1999 14:15; visibilidad excelente; B0= -2,80; P= +3.00

10/01/2000 16:25; visibilidad regular (velado); B0= -4,06 ; P= -2.40

11/01/2000 09:45; visibilidad excelente; telesc. Transitado; B0= -4,13 ; P= -2.90

17/01/2000 16:50; visibilidad excelente; B0= -4,77; P= -5.70

19/01/2000 18:05; visibilidad excelente; B0= -4,97; P= -6.65

22/01/2000 17:20; visibilidad buena; B0= -5,24; P= -8.00

25/01/2000 18:15; visibilidad buena; B0= -5,50; P= -9.10

03/02/2000 18:30; visibilidad buena; B0= -6,18; P= -13.05

13/02/2000 17:30; visibilidad excelente; B0= -6,75; P= -16.30

15/02/2000 18:50; visibilidad regular; B0= -6,84; P= -17.45

23/02/2000 18:20; visibilidad regular (ligero velo); B0= -7,11; P= -20.00

26/02/2000 18:20; visibilidad regular; B0= -7,16; P= -20.56

27/02/2000 15:40; visibilidad buena; telesc. Transitado; B0= -7,18 ; P= -20.83

28/02/2000 18:05; visibilidad excelente; B0= -7,20; P= -21.10

03/03/2000 18:20; visibilidad buena; B0= -7,24; P= -22.10

06/03/2000 18:10; visibilidad buena; B0= -7,25; P= -22.78

14/03/2000 09:50; visibilidad excelente; telesc. Transitado; B0= -7,17; P= -24.32

25/03/2000 18:10; visibilidad buena; B0= -6,82; P= -25.70

20/04/2000 18:00; visibilidad regular; B0= -5,09; P= -25.65

22/04/2000 17:15; visibilidad buena; B0= -4,92; P= -25.45

23/04/2000 17:20; visibilidad buena; B0= -4,82; P= -25.20

06/05/2000 17:10; visibilidad buena; B0= -3,53; P= -22.95

26/05/2000 13:10; visibilidad excelente; B0= -1,26; P= -17.20

27/05/2000 14:15; visibilidad excelente; B0= -1,14; P= -16.80

03/06/2000 15:00; visibilidad buena (viento); B0= -0,29; P= -14.25

04/06/2000 15:35; visibilidad regular (ligero velo); B0= -0,17; P= -13.85

16/06/2000 10:35; visibilidad buena (viento); telesc. Transitado; B0= +1,25; P= -8.95

18/06/2000 16:50; visibilidad excelente; B0= +1,52; P= -8.50

19/06/2000 14:40; visibilidad excelente; B0= +1,62; P= -8.00

01/07/2000 16:00; visibilidad buena; B0= +3,00; P= -2.20

d) Selección de datos:

Para el análisis, una vez tomadas las imágenes, es mejor elegir las manchas solares que son más grandes porque permanecen más tiempo en el Sol que las pequeñas; éstas duran poco (desaparecen) o cambian de forma y no se reconocen, las grandes también se deforman, pero son reconocibles fácilmente (por la ubicación, configuración del grupo, tamaño, etc.). Pero si son muy grandes cuesta tomar un centro, lo que plantea una solución de compromiso. En general se considera una mancha adecuada una fácilmente identificable en el lapso en cuestión. Tomando en cuenta la hipótesis, se seleccionaron los registros de los días 26 (A), 27 (B) y 28/02/2000 (C), con las manchas 1 y 2 (aprox. latitud 13° al S y N respectivamente) y la mancha 3 (aprox. latitud 37° N)

e) Elaboración de datos:

Los registros seleccionados (una copia de ellos se ve en el apéndice) se calcaron al disco de latitud heliográfica correspondiente a la fecha (B0= -7°), disponiéndoselos uniformemente. Puede verse el disco en blanco y con los tres

registros calcados en el apéndice. Además de los datos del registro, se colocó la fecha juliana del instante de observación y se identificaron las manchas seleccionadas para la medición asignándoles su correspondiente valor de latitud (- al S y al E). Las latitudes y longitudes se refieren al “Meridiano central” (instantáneo) y “Ecuador Solar”, respectivamente.

A continuación se elaboró una hoja de cálculo sobre un software comercial para efectuar el mismo; esta hoja se ve al final del apéndice.

El cálculo implica obtener para cada mancha la diferencia en grados en longitud para cada una de las tres fechas observadas. Como tenemos un tiempo para un cierto ángulo, calculamos el tiempo para 360° , es decir, la rotación completa. Este es el período sinódico. Los valores individuales (AB, BC, AC) sinódicos se han promediado para cada mancha, dando un período sinódico final para cada latitud observada.

Estos se transforman en período sidéreo con la fórmula:

$$P = S \times E / (S + E)$$

Donde P es período sidéreo, S el sinódico y $E = 365.26$ días (un año terrestre).

F) RESULTADO FINAL:

En las latitudes medidas se acepta un período sidéreo de $25^d.35$ (mancha 1, lat. -15°), $25^d.23$ (mancha 2, lat. 12°) y $26^d.92$ (mancha 3, lat. 37°).

Los autores obtuvieron estos valores confeccionando una curva en un **gráfico** que se puede observar en el apéndice con los valores tabulados de la rotación del Sol

a distintas latitudes: 0° , 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° (Abetti, 1962). Una simple interpolación gráfica da los valores buscados.

En el mismo se puede observar un “plotting” de los valores propios del trabajo (15° , 12° y 37°) que son, en ese mismo orden, $25^d.73$, $24^d.74$ y $26^d.52$. Como se cuenta con solo esos tres puntos, solo es factible realizar una sencilla regresión lineal que arroja una tendencia (línea recta gruesa) en acuerdo con la curva de los valores tabulados (pero insuficiente para deducir períodos para otras latitudes: esto requiere mas observaciones, en las condiciones de la hipótesis 2). Podemos entonces pasar a considerar los errores como una simple diferencia entre lo observado y lo tabulado o calculado, es decir (o-c).

En consecuencia, los errores (de los valores promedio) para las manchas 1, 2 y 3 son, respectivamente, $+0^d.38$, $-0^d.49$ y $-0^d.40$. O, expresados porcentualmente:

$-1,5\%$, $+2\%$ y $+1,5\%$.

Y si se toma cada medida individual (las diferencias AB, BC, AC) para cada mancha (pasada a período sidéreo) se tienen los siguientes errores, respectivamente:

$+2\%$, $+3\%$, $+2,5\%$; -7% , $+2,5\%$, $-1,5\%$; $+7,5\%$, $-4,5\%$, $+1,5\%$

Si se considera que la lectura de posición sobre la grilla puede tener un error de 1° y esto es inferior al 1%, es obvio que la fuente de error es el dibujo de las manchas sobre la hoja de registro. Los autores estiman un error aceptable del 8% en el método, tal cual fue aplicado. Esto implica un error en la posición dibujada de la mancha (o la determinación del centro) de unos 6 mm (acumulados) sobre el registro utilizado.

g) Mejoras al método y extensión del trabajo: Como el principal error es el dibujo de la mancha proyectada, es obvio que hacer esto más preciso mejora el método; así, un soporte rígido y un mecanismo de relojería en un telescopio fijo permiten un mejor registro.

Por otra parte una toma instantánea del Sol, proyectado o no, con una cámara fotográfica apropiada o un dispositivo electrónico que muy bien puede ser una cámara para PC (luz es lo que sobra) sería lo ideal. De todas maneras debe practicarse la orientación del registro y corregirse por B0, lo que podría hacerse de alguna otra manera que la expuesta. También, si el registro no es directo con una cámara digital, ya sea un dibujo o una fotografía, escanearlas mediante una computadora y procesarlas con un software que lea las coordenadas de la imagen escaneada (u obtenida directamente) facilita la medición. Pero estos métodos no siempre están disponibles en cualquier institución, por lo que no cumplirían el objetivo propuesto. Lo mismo sucede, claro está, con la técnica espectrográfica.

Medir y promediar más series de 3 o más días con manchas adecuadas a este fin (posición, tamaño) también puede ser interesante, pero queda demostrado que es más relevante lo anterior.

Por último, una extensión natural del presente trabajo es el estudio del Sol, más tomando en cuenta que atraviesa un período de máxima actividad. Para esto sería necesario llevar un registro más largo, que cubra además de este año el anterior y el siguiente, lo que permitiría visualizar el respectivo aumento y disminución del número de manchas, su distribución y morfología, superficie cubierta y “Número de Wolf”, etc.

CONCLUSIONES

Contrastando con las hipótesis planteadas:

- 1) Se demuestra la rotación del Sol, por observación de sus manchas. Se demuestra que éste no gira como un cuerpo rígido, haciéndolo más rápido en el ecuador, donde se obtiene un período sidéreo de 25.2 días contra 26.5 días en latitudes intermedias. La velocidad promedio en la superficie es entonces del orden de 2 km/seg.

- 2) La técnica propuesta de reunir observaciones hasta dar con una (o más) series de 3 o más días con manchas apropiadas demostró en sus resultados finales ser correcta, arrojando bajos errores.

BIBLIOGRAFÍA

- Abetti, G., 1962, *El Sol* (EUDEBA).
- De Laurenti, M., 2000, *Manual Astronómico* (Pub. OAMM).
- Feinstein, A. y Tignanelli, H., 1999, *Objetivo universo* (Ed. Colihue SRL).
- Fucci, F., *Revista Astronómica* N° 236/239 pags. 24-32. (Asociación Argentina Amigos de la Astronomía)
- Gingerich, O. y Tresch-Fienberg, R., *Sky & Telescope*, Vol. 64 N° 5 pags. 433-438 (Sky Publishing Corporation).
- Miczaika, G.R. y Sinton, W.M., 1967, *Las herramientas del astrónomo* (EUDEBA).
- Meeus, J., 1991, *Astronomical algorithms* (Willmann-Bell, Inc).
- Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, 2000, *Efemérides Astronómicas*.
- Sears, F. W., 1967, *Fundamentos de física. III. Óptica* (Aguilar SA ediciones).
- Severny, A., 1962, *Física del Sol* (Ed. Lautaro).
- Unsöld, A., 1977, *El nuevo cosmos* (Siglo XXI editores SA).
- Vorontsov-Veliamínov, B. A., 1979, *Problemas y ejercicios prácticos en astronomía* (ed. MIR).

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al Observatorio Astronómico dependiente de la Dirección de Cultura de la Municipalidad de Mercedes, por permitir el uso de su instrumental y biblioteca.

APÉNDICES

Pag. 29—(DIAGRAMA 1) Disco solar y proyección angular de una mancha en distintas fechas.

Pag. 30---(DIAGRAMA 2) Movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol; inclinación de los respectivos ecuadores; período sinódico; como se ve el Sol desde la Tierra en distintas fechas.

Pag. 31---(FOTOGRAFÍAS A y B) Uno de los autores observando.

Pag. 32---(FOTOGRAFÍAS C y D) Detalle del instrumento usado; imagen solar.

Pag. 33---(HOJA DE REGISTRO EN BLANCO) Id.

Pag. 34 a 36---Registros utilizados en la elaboración de datos.

Pag. 37---Grilla para $B_0=7^\circ$, utilizada para las observaciones seleccionadas.

Pag. 38 a 40---Las observaciones, pasadas a la grilla y con las manchas identificadas (de abajo hacia arriba) y sus coordenadas medidas.

Pag. 41---Hoja de cálculo. Para cada mancha se obtiene el período sinódico diario y su promedio; este se pasa a sidéreo.

Pag. 42---Gráfico periodo-latitud. La curva corresponde a valores tabulados; la recta, a una regresión lineal de los tres valores observados.

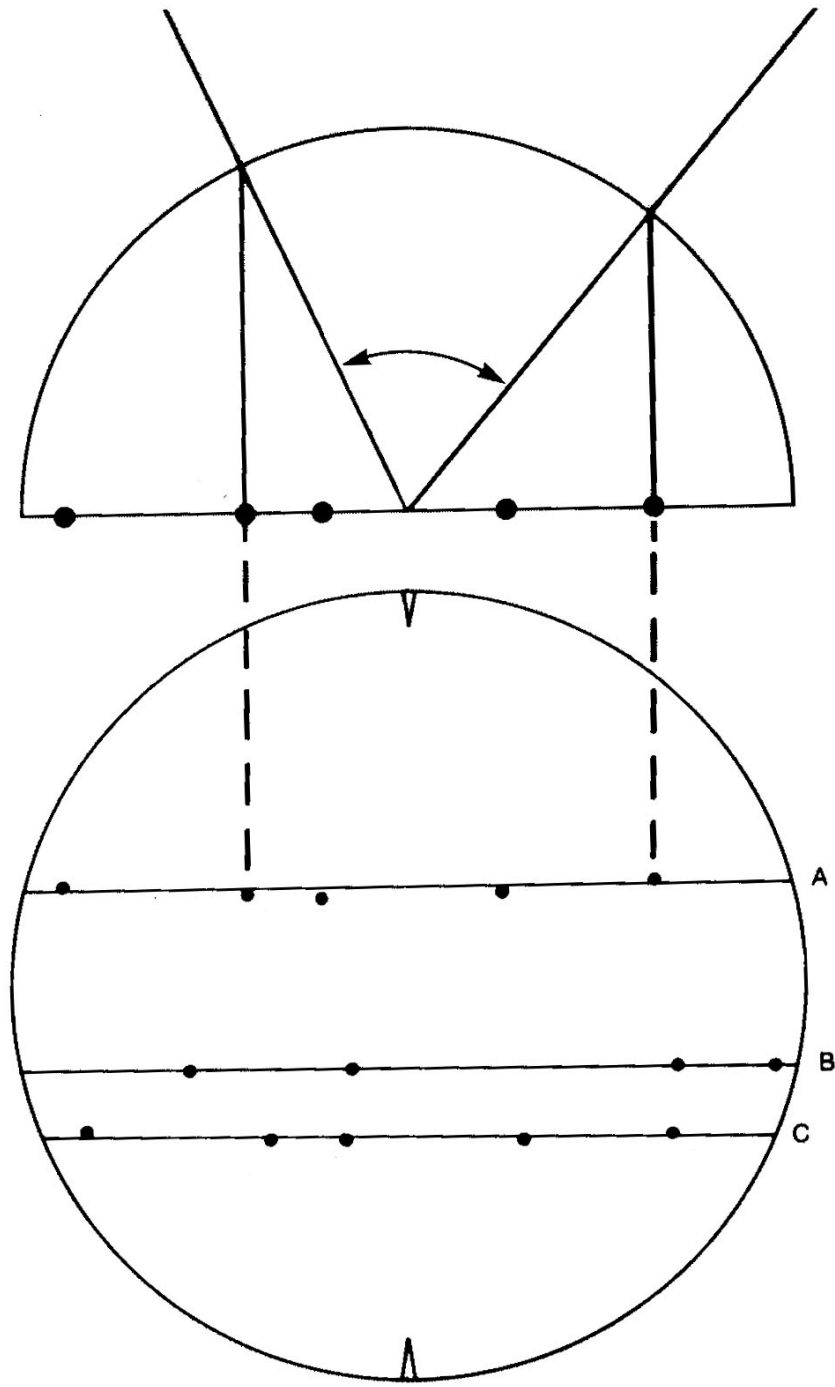
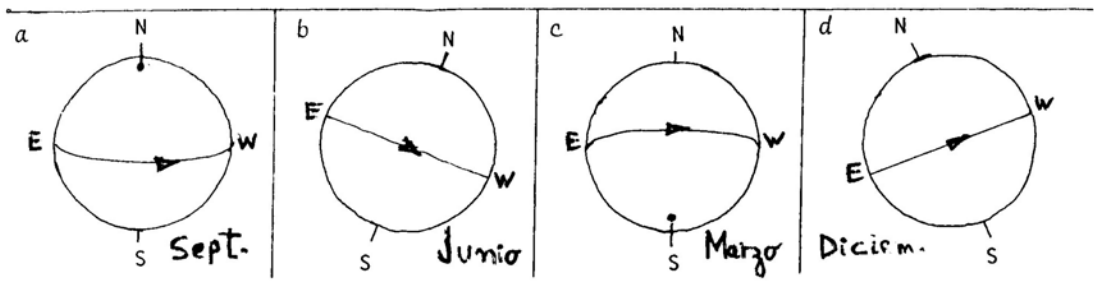
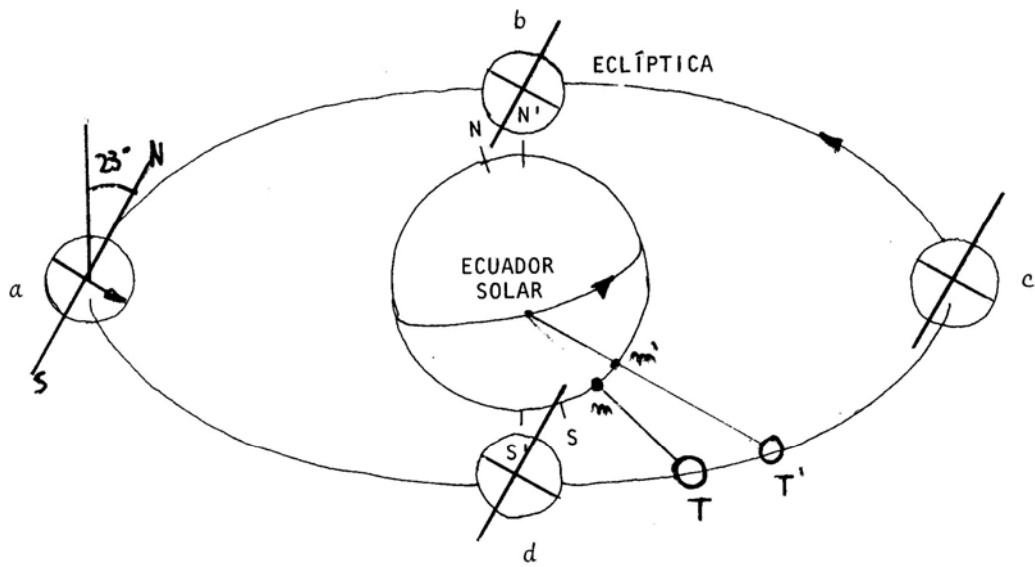
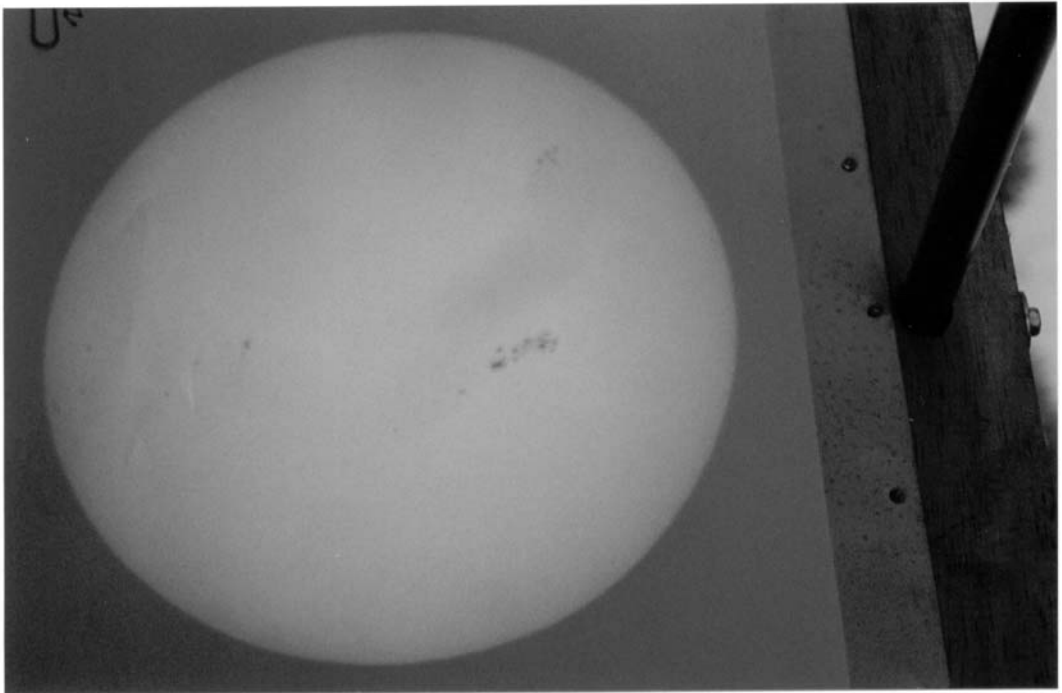


Figure 1.1.1. Construction of a circle from a semi-circle.



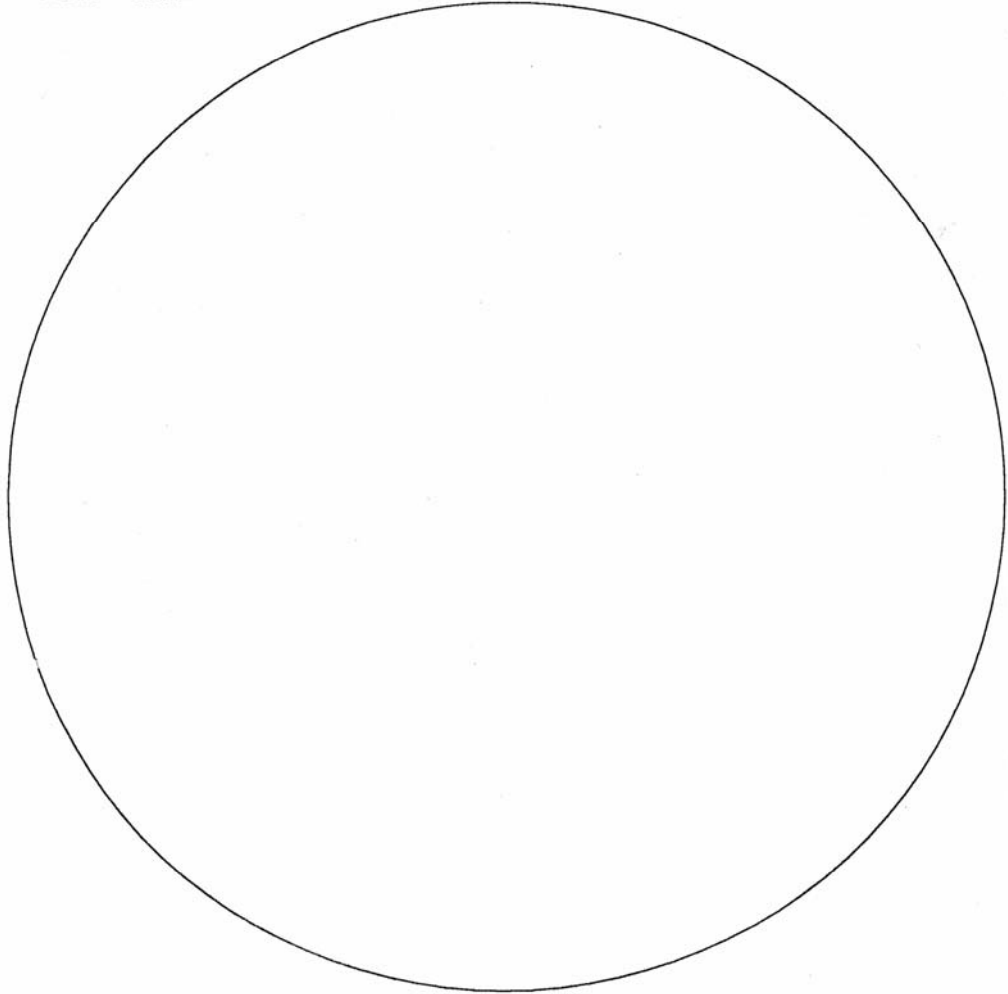




Fecha: / /
Hora: :

SOL

Visibilidad:

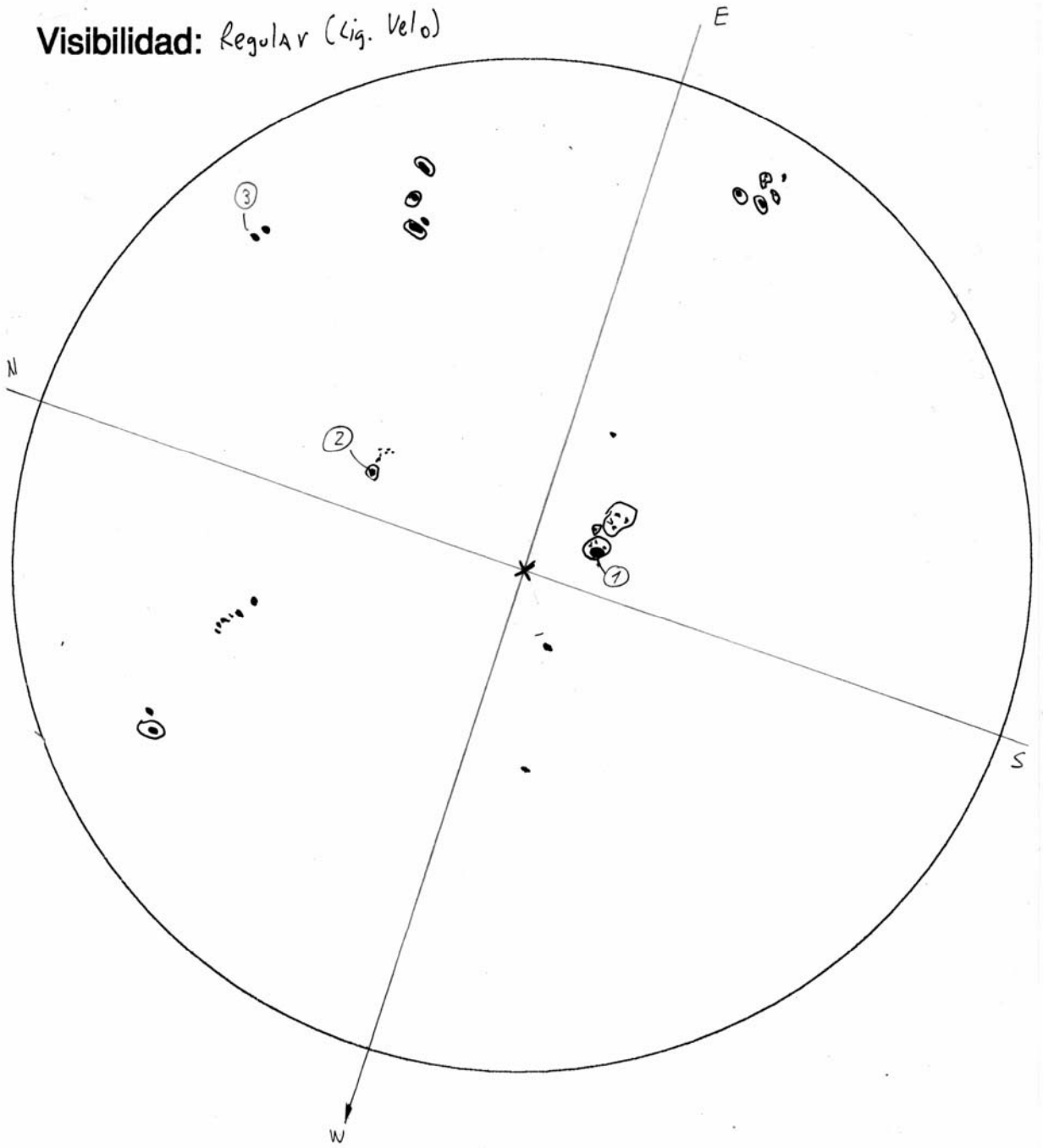


Fecha: 26 / 2 / 2000

SOL

Hora: 18 : 20 HLA

Visibilidad: Regular (Lig. Velo)



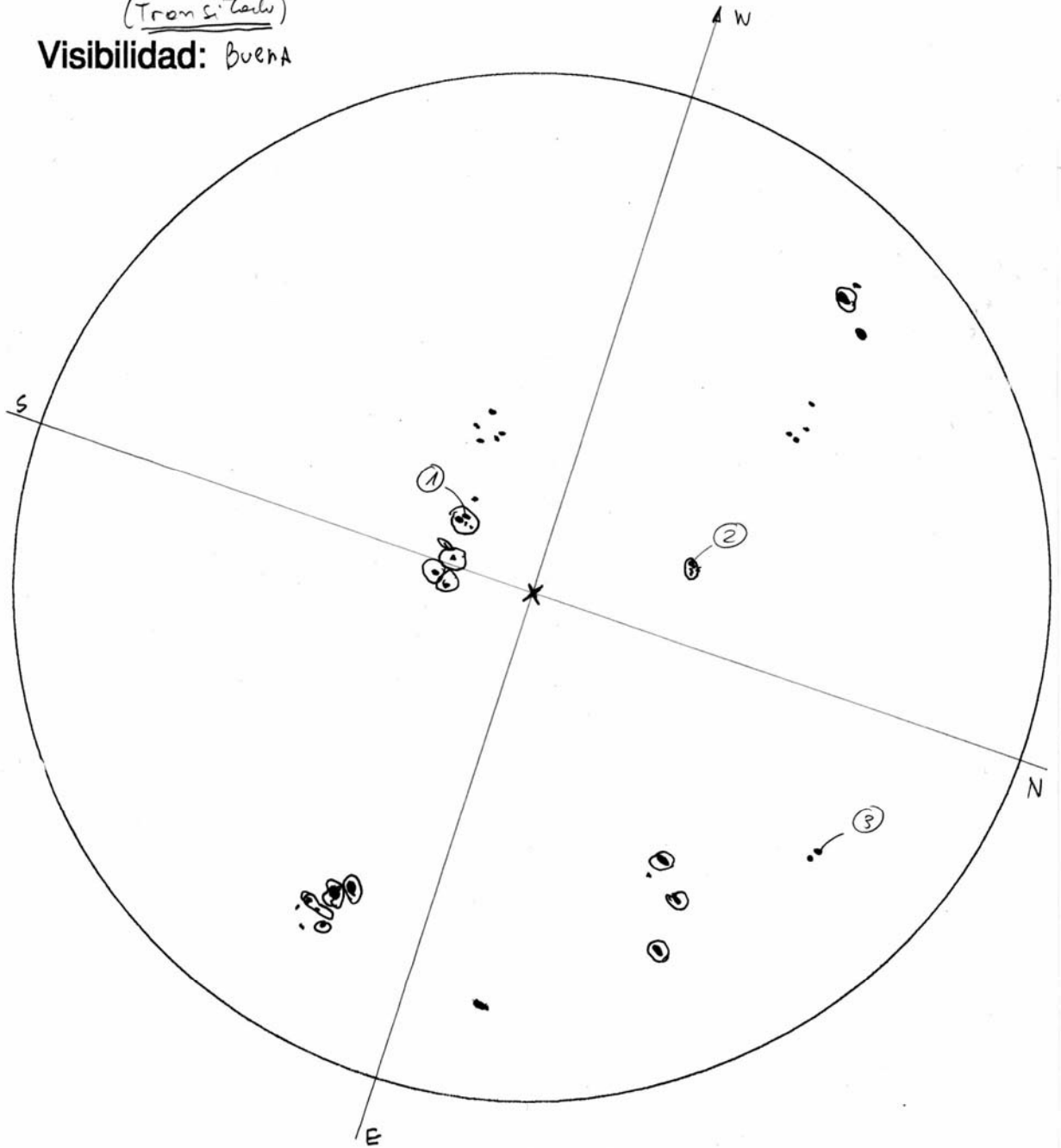
Fecha: 27 / 2 / 2000

Hora: 15 : 40 HLA

(Transitales)

Visibilidad: Buena

SOL

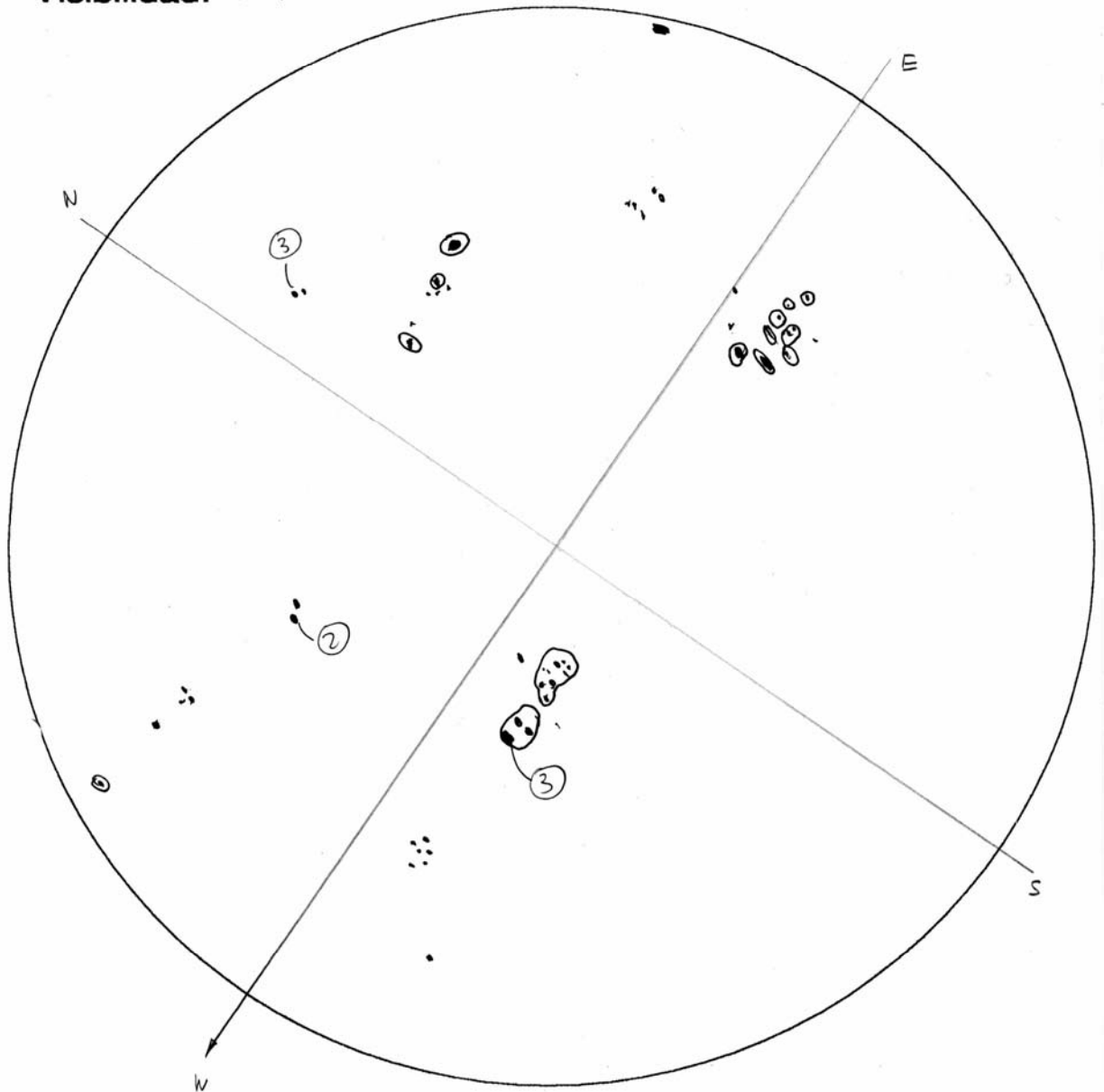


Fecha: 28 / 2 / 2000

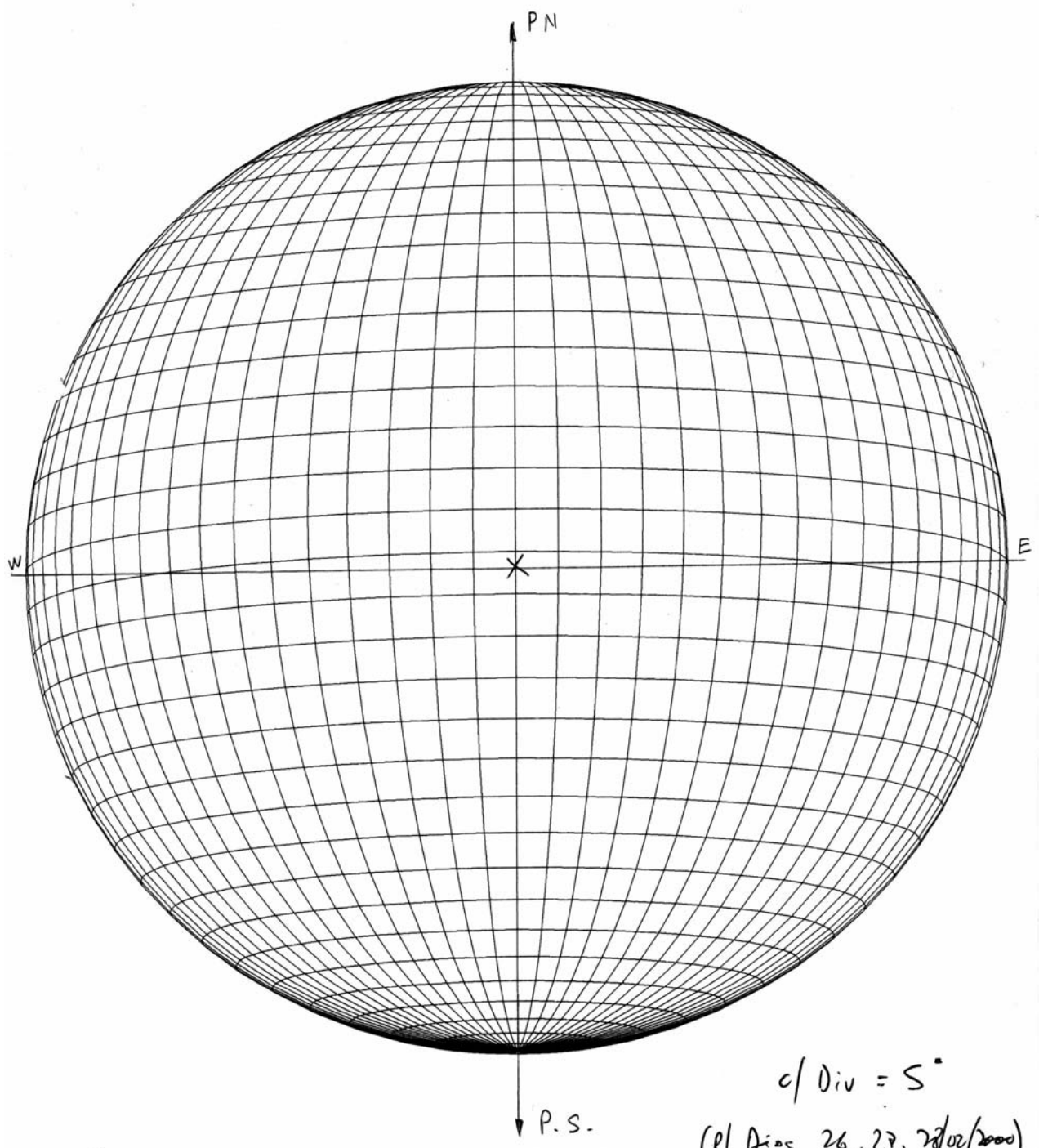
SOL

Hora: 18 : 05 HCA

Visibilidad: Excelente



- 4°

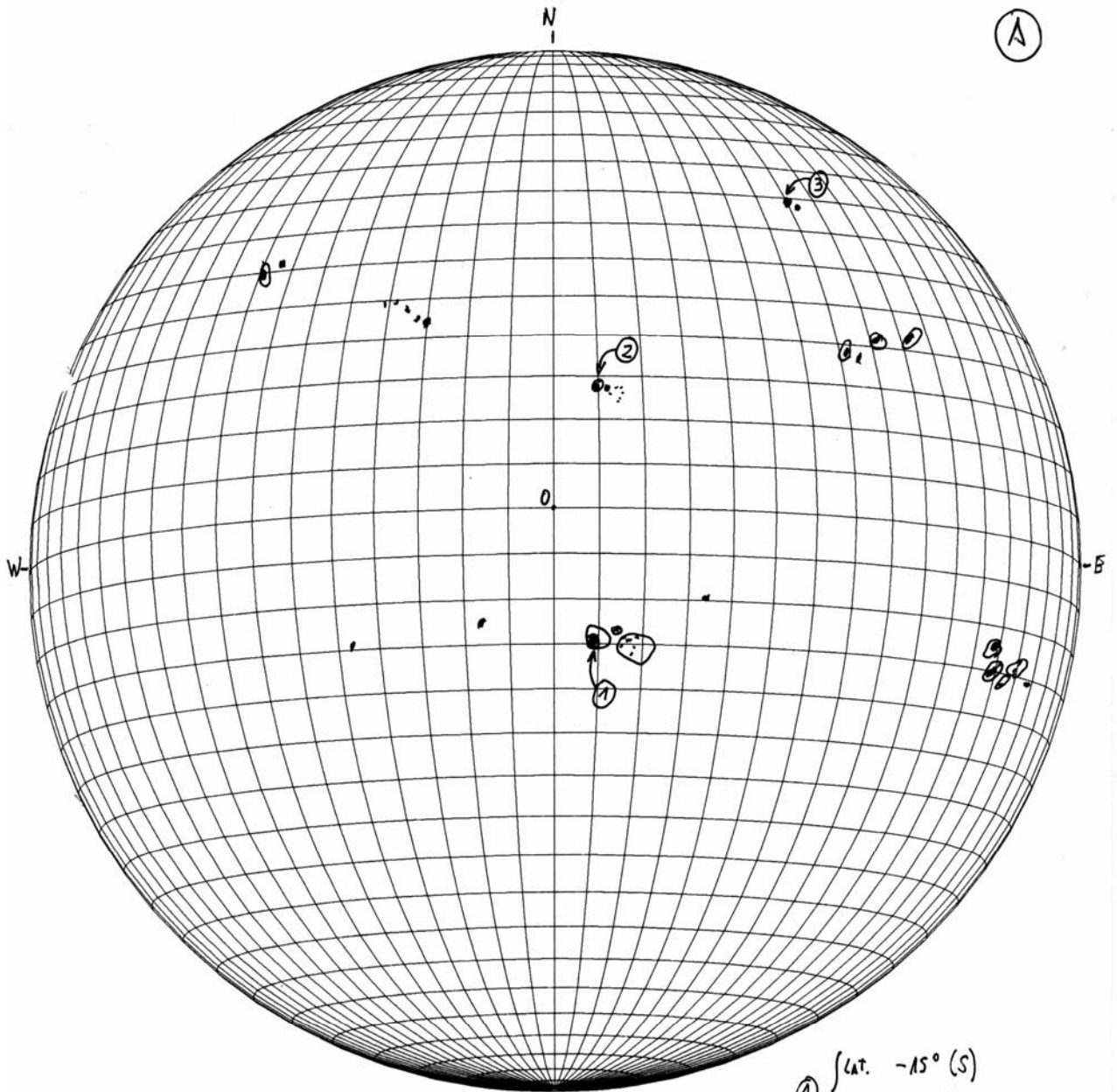


+ 4°

c/ Div = 5°
(Pl. Dias 26, 27, 28/02/2000)

26/02/2000
 18:20 HUS
 JD 2451601.2639

(A)



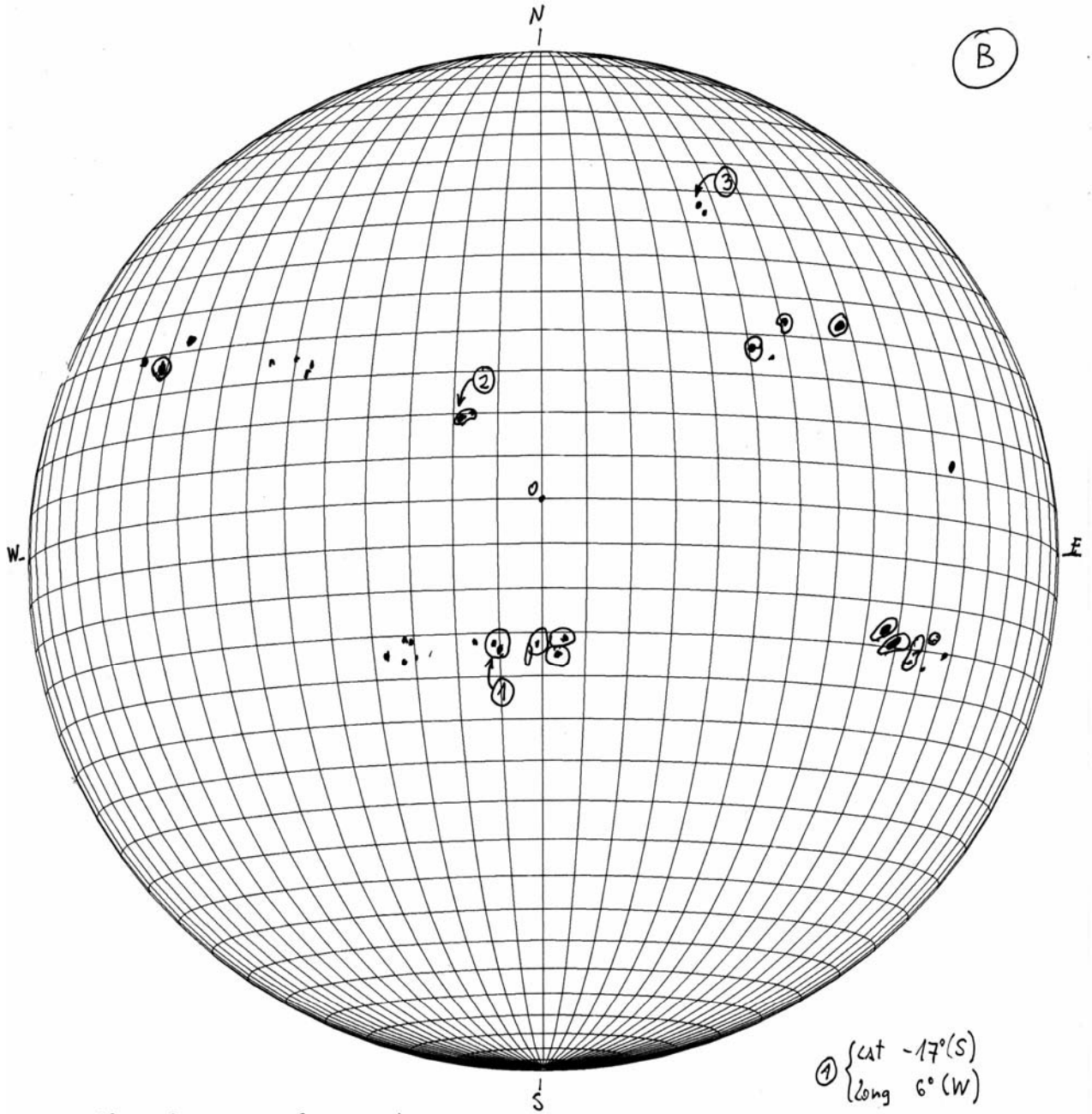
$B_0 = -7,16^\circ$ $P = -20,56^\circ$ ($L_0 = 351^\circ$)

S

- ① $\begin{cases} \text{Lat. } -15^\circ \text{ (S)} \\ \text{Long } -5^\circ \text{ (E)} \end{cases}$
- ② $\begin{cases} \text{Lat } 14^\circ \\ \text{Long } -5^\circ \end{cases} (\pm 1^\circ)$
- ③ $\begin{cases} \text{Lat } 39^\circ \\ \text{Long } -34^\circ \end{cases}$

27/02/2000
 15:40 HLA
 JD 2481602.1528

(B)

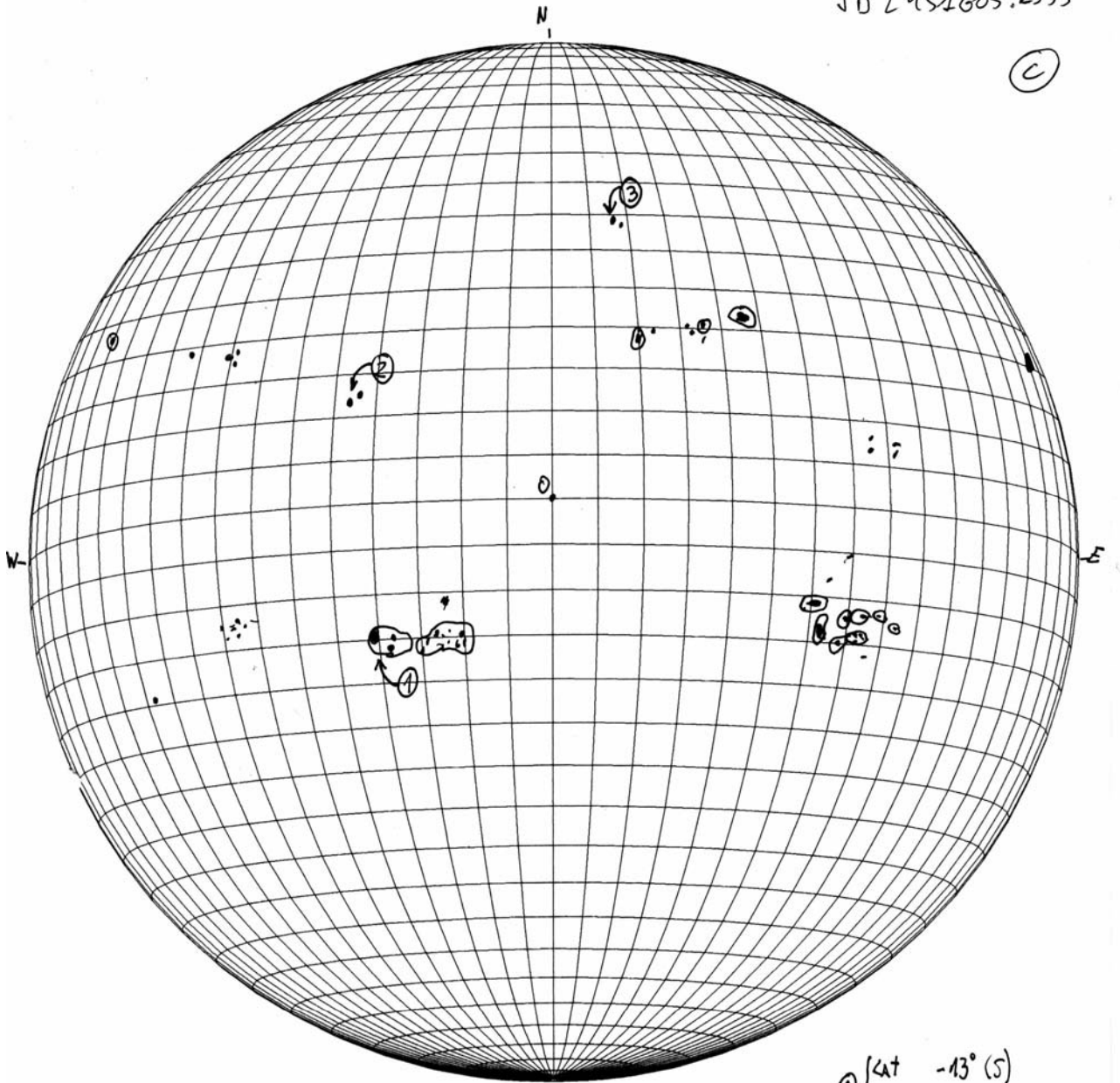


$\theta_0 = -7,18^\circ$ $\rho = -20,83^\circ$ ($\alpha_0 = 337^\circ$)

- ① $\begin{cases} \text{lat } -17^\circ (\text{S}) \\ \text{long } 6^\circ (\text{W}) \end{cases}$
- ② $\begin{cases} \text{lat } 10^\circ \\ \text{long } 7^\circ \end{cases} \quad \begin{pmatrix} + \\ - \end{pmatrix} 1^\circ$
- ③ $\begin{cases} \text{lat } 38^\circ \\ \text{long } -22^\circ \end{cases}$

28/02/2000
 18:05 HLA
 JD 2451603.2535

Ⓒ



$B_0 = -7,20^\circ$ $\rho = -21^\circ,1$ $(L_0 = 324^\circ)$ $\frac{1}{5}$

- ① $\begin{cases} \text{Lat} & -13^\circ \text{ (S)} \\ \text{Long} & 21^\circ \text{ (W)} \end{cases}$
- ② $\begin{cases} \text{Lat} & 12^\circ \\ \text{Long} & 22^\circ \end{cases} \begin{pmatrix} +1^\circ \\ -1^\circ \end{pmatrix}$
- ③ $\begin{cases} \text{Lat} & 34^\circ \\ \text{Long} & -9^\circ \end{cases}$

Mancha Nº1							P. Sidéreo
	Datos			Diferencia			
	A	B	C	AB	BC	AC	
Días	2451601,264	2451602,153	2451603,254	0,8889	1,1007	1,9896	
Longitud(E-W+)	-5	6	21	11	15	26	
Latitud(S-N+)	-15	-17	-13	2	4	2	
Rotación(días)				29,09127272	26,41680001	27,54830769	
Promedio(ABC)	27,68546014	días para lat.:	15	(P. Sinódico)			25,73484668
Mancha Nº2							
	Datos			Diferencia			
	A	B	C	AB	BC	AC	
Días	2451601,264	2451602,153	2451603,254	0,8889	1,1007	1,9896	
Longitud(E-W+)	-5	7	22	12	15	27	
Latitud(S-N+)	14	10	12	4	2	2	
Rotación(días)				26,66699999	26,41680001	26,528	
Promedio(ABC)	26,53726667	días para lat.:	12	(P. Sinódico)			24,73984085
Mancha Nº3							
	Datos			Diferencia			
	A	B	C	AB	BC	AC	
Días	2451601,264	2451602,153	2451603,254	0,8889	1,1007	1,9896	
Longitud(E-W+)	-34	-22	-9	12	13	25	
Latitud(S-N+)	39	38	34	1	4	5	
Rotación(días)				26,66699999	30,48092309	28,65024	
Promedio(ABC)	28,59938769	días para lat.:	37	(P. Sinódico)			26,52269484

