

DETERMINAÇÃO DA OBLIQUIDADE DA ECLÍPTICA

Projeto de observação comum entre Brasil e Argentina

Néstor CAMINO¹ (Coordinador general) y muchos otros²

Resumo: *Apresentamos neste trabalho uma síntese de um processo realizado ao longo de três anos entre muitos grupos de docentes, estudantes e investigadores do Brasil e Argentina como marco de um projeto sobre Didática da Astronomia. Baseado na observação conjunta da máxima altura do Sol durante solstícios e equinócios entre 2011 e 2013 diversos grupos trabalharam a fim de determinar o valor aproximado da Obliquidade da Eclíptica, ou seu equivalente, o valor da inclinação do eixo de rotação terrestre. Embora o processo de medição seja de baixa precisão, e com grande dispersão na medição de ângulos e intervalos de tempo, consideramos que, de todos os modos, os resultados obtidos são muito satisfatórios, com um valor para $\varepsilon = 23,6^\circ$, muito próximo ao aceito na atualidade. Mas além dos resultados numéricos obtidos, evidenciamos especialmente a importância de desenhar e concretizar uma experiência de observação direta, real, do entorno astronômico, de grande duração, rigorosa desde o conceitual, com uma forte intencionalidade didática. Ressaltamos assim a grande riqueza deste projeto no que diz respeito ao trabalho compartilhado entre pessoas e instituições educativas de nossa região.*

Palavras-chave: *Obliquidade; Solstícios y Equinócios; Sol; Observação conjunta.*

DETERMINATION OF THE OBLIQUITY OF THE ECLIPTIC

Joint observation project between Brasil and Argentina

Abstract: *We report here a summary of the process undertaken for three years among many groups of teachers, students and researchers from Brazil and Argentina, as part of a project on Teaching of Astronomy, based on the joint observation of the maximum height of the sun during solstices and equinoxes, in order to determine the approximate value of the obliquity of the Ecliptic (ε), or its equivalent, the value of the tilt of Earth's rotation axis (i). Although the measurement process carried had low accuracy, and wide dispersion in the measurement of angles and ranges, we consider anyway the results are very satisfactory, with a value for $\varepsilon = 23.6^\circ$ very close to the accepted today. Beyond the numerical results obtained, we especially stress the importance of design and realize a direct experience, long-term actual observation of the astronomical environment, with a strong didactic intent, conceptually rigorous and wealthy in terms of the work shared between individuals and educational institutions in our Region.*

Key-words: *Obliquity; Solstices and Equinoxes; Sun; Joint observation.*

¹ Complejo Plaza del Cielo – CONICET – Facultad de Humanidades y Ciencias Sociales UNPSJB
nestor.camino@speedy.com.ar

² Deben considerarse Co-Autores del presente trabajo las siguientes personas, cuyas Instituciones de pertenencia se indican en el Cuadro 1: Cristina Terminiello, Javier H. Feu, Romina Guaragno, Vanesa Viña, Aida Figallo, Conrado F. Kurtz, Fernando Descalzo, Alejandro Gangui, Esteban Dicoovski, María Iglesias, Elina Godoy, Julio Cabrera, Fernando Karaseur, Virgínia Mello Alves, Maria de Fátima Saraiva, Daniela Pavani, Marina Sanfelice Valenzuela, Odilon Giovannini Jr. (Responsable), Francisco Catelli, Débora Scheeren, Elisa Danda de Oliveira, Fernanda Miotto, Giovani Rech, Luís Fernando Basso, Rodrigo Barbieri, Andrea Elisabete de Paula, Thais Cortellini Abrahão, Vicente Pereira de Barros, Leiana Camargo, Ariane Braga, Alberto Moreau, Valter Araújo, Roberta Proença, Cristina Leite, Daniel R. Soler, Flávia Polati Ferreira, Marcos Daniel Longhini, Hanny Angeles Gomide, Mariana Ferreira de Deus, Telma Cristina Dias Fernandes, Jules Soares, Leandro Kerber, Auta Stella de Medeiros Germano, Antonio Dgerson Pereira da Costa, Daniella Maria Cunha, Luciana da Cunha Ferreira.

LA TIERRA VISTA DESDE EL ESPACIO

La Tierra, vista desde un punto muy lejano en el espacio exterior, puede caracterizarse como una esfera casi perfecta, en rotación sobre sí misma y en traslación en una órbita alrededor del Sol.

El eje de rotación de la Tierra y el eje de la órbita del planeta no son paralelos en el espacio, sino que mantienen un ángulo (el cual puede considerarse aproximadamente fijo para procesos de corta duración, como lo es el presente Proyecto); tal ángulo se refiere como “inclinación del eje terrestre”, que se simboliza con la letra i . Ambos ejes son perpendiculares a dos planos fundamentales, el plano de simetría rotacional de la Tierra (Ecuador) y el plano de la órbita terrestre (Eclíptica), respectivamente. Por esto, el Ecuador y la Eclíptica forman a su vez un ángulo que se refiere como “Oblicuidad de la Eclíptica”, que se simboliza con la letra griega ϵ (Figura 1). El valor actual de ambos ángulos es de $23,44^\circ$ (Wittmann, 1979).

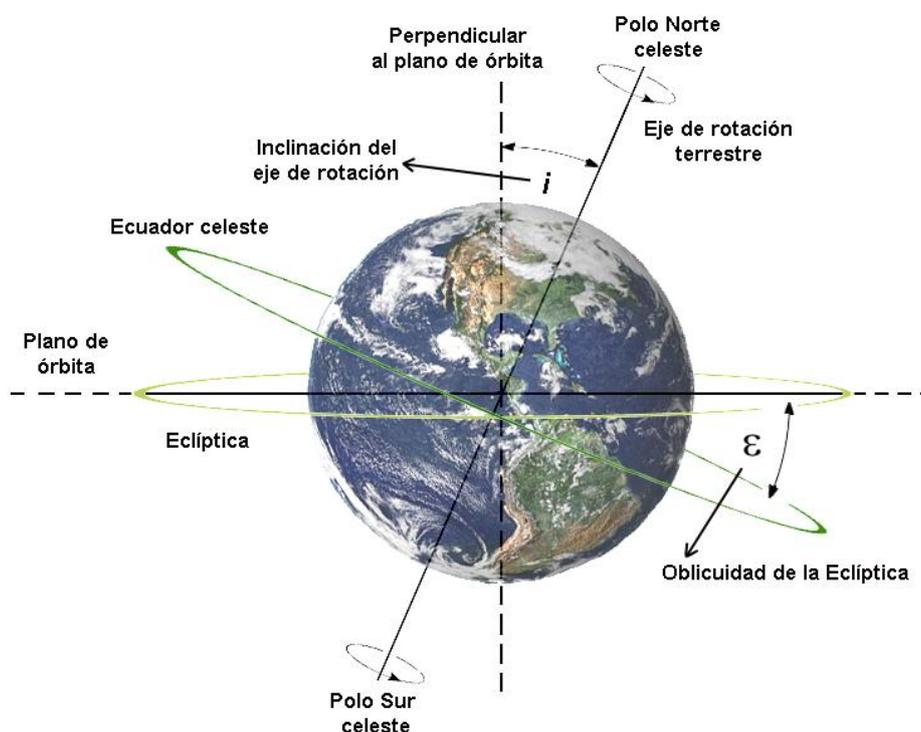


Figura 1: La inclinación del eje de rotación terrestre i y la Oblicuidad de la Eclíptica ϵ .

Fuente: Axial Tilt Obliquity_Dennis Nilsson Creative Commons (traducido).

Ambos movimientos de la Tierra en el espacio, de rotación y de traslación, generan efectos visibles en el cielo local, desde una perspectiva topocéntrica: en especial, el Sol cambia su posición en el cielo instante tras instante, y día tras día (reflejo cinematográfico de ambos movimientos del planeta).

LO QUE SE OBSERVA DESDE EL SUELO TERRESTRE

Más allá de la igualdad matemática de ambos ángulos, i y ϵ , es muy importante a los fines de este trabajo resaltar que el término “oblicuidad de la Eclíptica” remite a lo que puede percibir un observador ubicado sobre el suelo (la posición topocéntrica) al estudiar sistemáticamente el cambiante movimiento del Sol en el cielo local, durante un período de tiempo de al menos un año.

En proyección sobre el fondo de estrellas, la posición instantánea del Sol describe una trayectoria a lo largo del año denominada “Eclíptica” (cuya raíz proviene de que únicamente había posibilidad de que ocurriera un eclipse cuando la Luna cruzaba esa línea imaginaria; la Luna cruza la Eclíptica dos veces por mes, lo que es una condición necesaria pero no suficiente para la ocurrencia de eclipses).

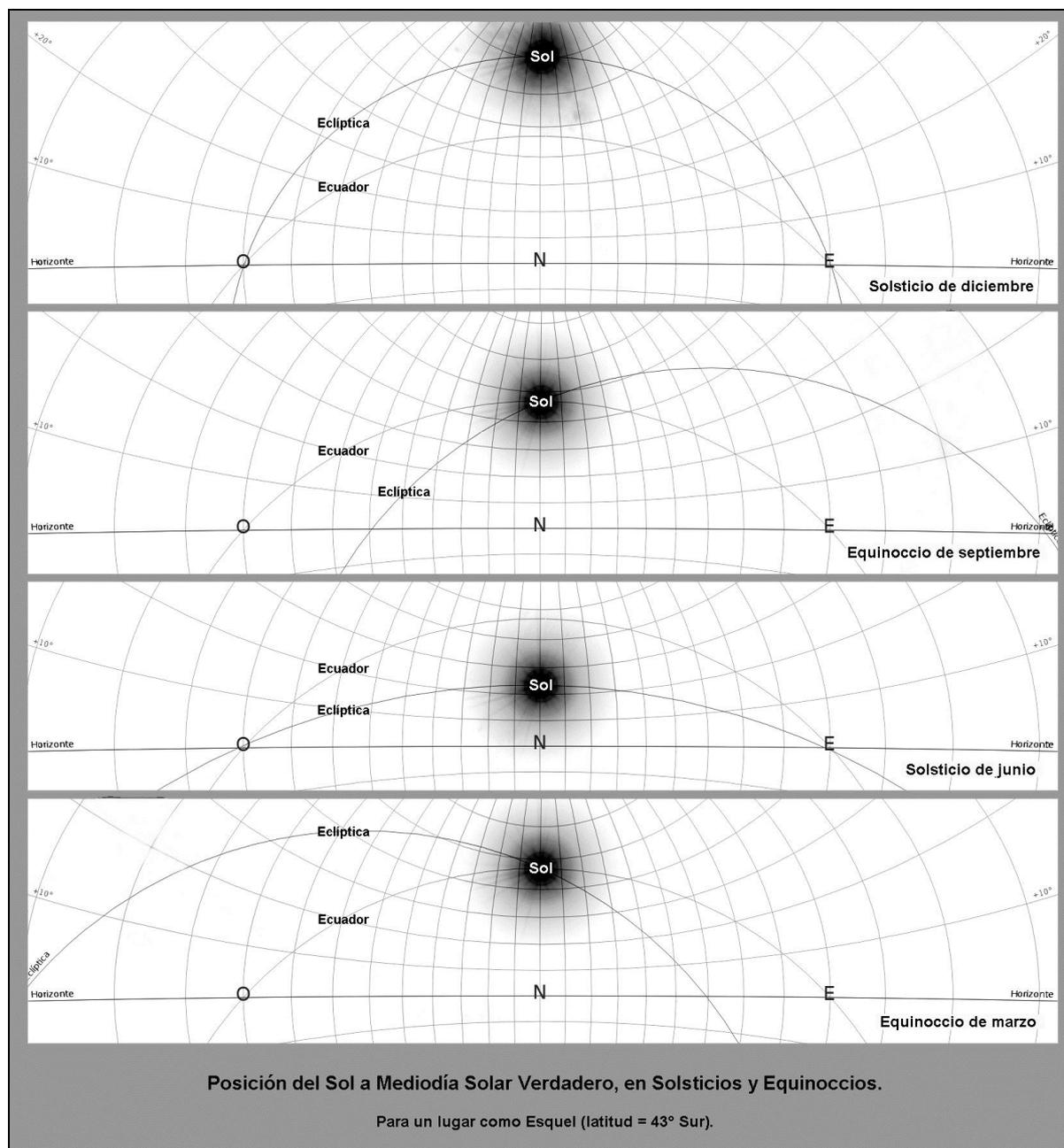


Figura 2: La posición del Sol en su culminación superior, durante equinoccios y solsticios, para una posición topocéntrica como la de Esquel.

Fuente: capturas de pantalla del software Stellarium, editadas a posteriori.

Se estima que hacia el año 564 antes de Cristo, en China, ya existían valores relativamente precisos del valor de la oblicuidad de la órbita terrestre. Aquellas determinaciones fueron realizadas principalmente a través de observaciones diurnas, con sistemas de precisos gnomons y grandes períodos de observación, en variadas posiciones topocéntricas (Li y Sun, 2009).

En el siglo II antes de Cristo, Hiparco da un valor cercano al actual: $23^{\circ} 51'$, el cual es utilizado luego en el Almagesto de Ptolomeo (siglo II dC) (Britton, 1969), asociado también a la observación de las sombras de un gnomon durante solsticios y equinoccios. Siglos después (XI dC), son los árabes quienes revisan tales resultados, y sientan las bases para la posterior construcción de un modelo dinámico del sistema astronómico, fuertemente ligado a las muy precisas observaciones realizadas por Tycho Brahe (1546-1601) en 1584, no sólo diurnas sino también de estrellas, y a la nueva cosmovisión iniciada por las ideas de Copérnico y otros (Swerdlow, 2010).

La trayectoria del Sol en el cielo local durante un día puede describirse como un arco cuyos extremos son los puntos de salida y puesta, y su altura máxima se da en el plano del meridiano local (hacia el Norte o hacia el Sur, según sea la latitud geográfica del lugar de observación y el día dentro del año). Los arcos diurnos son producidos por el movimiento de rotación de la Tierra sobre su propio eje.

A su vez, tal trayectoria diurna cambia día tras día en el período de un año, con dos arcos extremos: uno el más hacia el Sur sobre el horizonte y el otro el más hacia el Norte sobre el horizonte. Ambos arcos suceden en dos días muy especiales para la mayoría de las culturas a través de la Historia: los solsticios. El arco más hacia el Sur ocurre en el solsticio de diciembre, y el arco más hacia el Norte ocurre el solsticio de junio. Tal variación en los arcos diurnos es producida por el movimiento de traslación de la Tierra inclinada en su órbita alrededor del Sol.

Entre aquellos dos arcos diurnos extremos, y durante fechas también muy importantes para todas las culturas, el Sol recorre un arco que divide al cielo (y al suelo) en dos mitades perfectas: los equinoccios, uno en marzo y el otro en septiembre. La posición del Sol en los equinoccios coincide con la zona que se conocía como “Ecuador celeste”, o sea, la mitad del cielo.

A través de siglos de observación y estudios sistemáticos, se determinó lo que finalmente fue denominado “Oblicuidad de la Eclíptica”, es decir: cuánto se apartan en el cielo local la Eclíptica del Ecuador, ambos arcos fundamentales para describir posiciones y movimientos de objetos en el cielo, sus cambios a través del tiempo, y sus efectos sobre la ubicación de un observador terrestre (Figura 2).

EL PROYECTO DE OBSERVACIÓN CONJUNTA

Luego de la muy fructífera experiencia que realizáramos con muchos colegas de Brasil, Argentina y Uruguay con motivo del equinoccio de marzo de 2009 (Camino et alii, 2009), proyectamos realizar un proyecto de observación conjunta aún más ambicioso: la determinación de la oblicuidad de la órbita terrestre a partir de la observación de la posición del Sol en el instante de su culminación superior, durante solsticios y equinoccios, desde las distintas ubicaciones geográficas.

La experiencia se realizó entre diciembre de 2011 y marzo de 2013, incluyendo este período tres equinoccios y tres solsticios. Los equipos de docentes, estudiantes e investigadores participantes en el Proyecto se indican en el Cuadro 1.

EL PROCESO DE MEDICIÓN

Las mediciones tomadas en cada momento (mediodía solar verdadero, en equinoccios y solsticios) consistieron en determinar en forma indirecta la altura angular del Sol sobre el horizonte del lugar de observación.

Es decir, no se observó al Sol directamente, sino que se materializó con hilos la visual al Sol (desde el extremo de la sombra del gnomon en el suelo, pasando por el extremo del gnomon, hasta el Sol), midiendo el ángulo que ésta forma con la vertical astronómica del lugar (el gnomon) (Camino et alii, op. cit.). Este ángulo es complementario de la altura angular del Sol sobre el horizonte. (Figura 3)



Figura 3: Medición del ángulo que los “hilos de luz” forman con la vertical astronómica del lugar, materializada por el gnomon, a mediodía solar verdadero. Este ángulo es complementario de la altura angular del Sol sobre el horizonte en su culminación superior. Fotos de Buenos Aires, Esquel y Caxias do Sul.

Para comparar los resultados obtenidos y analizar las incertezas experimentales de todo el proceso, se buscó que todos los gnomons tuvieran una longitud de un metro (1 m). Asimismo, se tuvo una tolerancia de más o menos dos días respecto del momento que correspondiera, previendo problemas climáticos.

En la Figura 4 se muestran las relaciones geométricas entre los ángulos bajo los cuales llega la luz del Sol y los largos de las sombras de gnomons de igual longitud, en el plano del meridiano local (a mediodía solar verdadero local), en distintos lugares de observación sobre la Tierra, durante solsticios y equinoccios.

La medición de ángulos permite determinar en forma sencilla qué es lo común a todos los lugares de observación (finalmente, será la Oblicuidad de la Eclíptica), más allá de que por las diferencias de latitud geográfica entre los distintos lugares de observación las sombras que proyectan sobre el suelo gnomons de idéntica longitud sean muy diferentes (instantáneamente, más largas en el Sur que en el Norte).

Previamente a la medición propiamente dicha, fue necesario concretar los siguientes pasos metodológicos (basados en Camino et alii, op. cit.):

- Instalación del gnomon recto vertical: una varilla recta de un metro (1 m) de largo, en forma perpendicular al suelo, en una zona plana y que esté iluminada directamente por el Sol durante todo el día.
- Determinación de la línea meridiana: mediante el método “de las alturas iguales”, se determina la línea Norte-Sur (meridiana), la cual permite, junto con el gnomon, materializar el plano del meridiano astronómico en el lugar de observación.

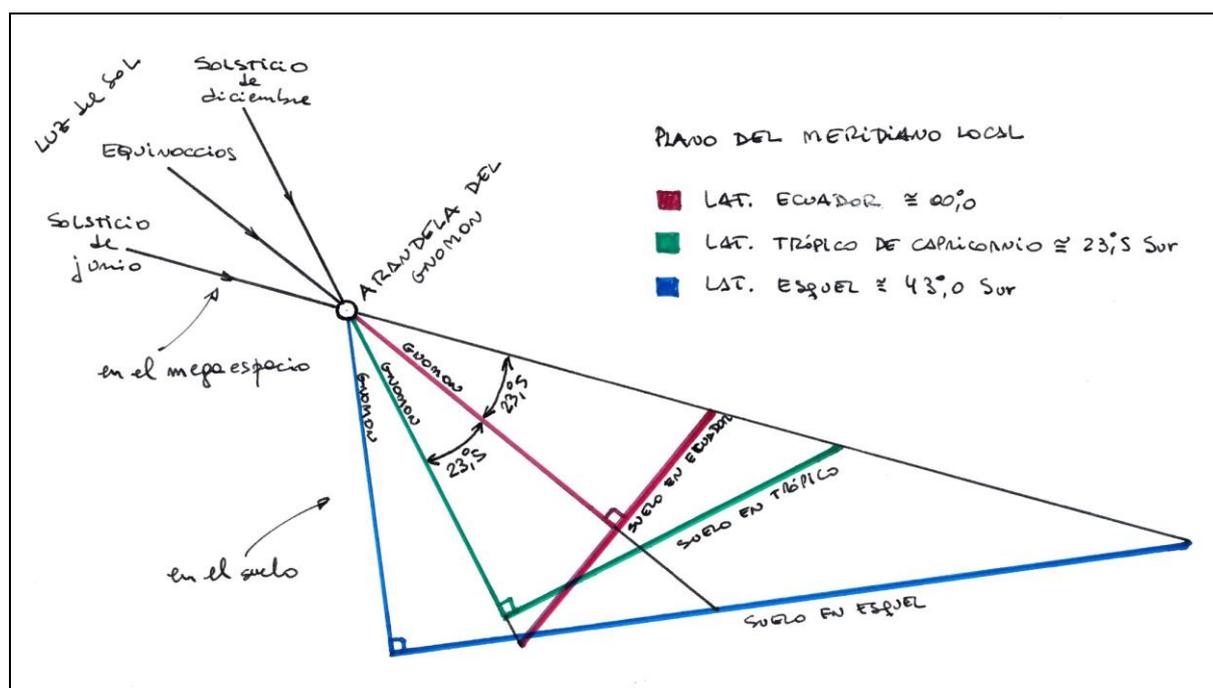


Figura 4: Variação em longitude y dirección de la sombra de un gnomon con la latitud.

- Materialización de sombras y rayos de luz: en cada instante de observación, se marca sobre el suelo el extremo de la sombra que da el gnomon, se une con un hilo la base del gnomon con el clavo (el extremo de la sombra de éste) y se une con otro hilo el clavo con el agujero de la arandela del gnomon. Los hilos en el suelo representan sombras, los hilos en el “aire” representan rayos de Sol.
- Medición de la máxima altura angular del Sol: a mediodía solar verdadero la sombra proyectada por el gnomon será la más corta de ese día, y estará contenida en la línea Norte-Sur. Marcando esta sombra y el rayo de luz correspondiente, es posible medir el ángulo que forma el hilo que representa la luz del Sol en el plano del meridiano, con respecto al gnomon. El ángulo así determinado es complementario a la máxima altura angular del Sol sobre el horizonte local, en el instante del mediodía solar verdadero.

Es importante notar que no es condición necesaria para la realización de las mediciones del Proyecto la determinación de instantes ni de intervalos de tiempo (por ejemplo, para el mediodía solar verdadero) debido a que trabajamos principalmente sobre la dimensión espacial (ángulos y longitudes) y no sobre la dimensión temporal (instantes e intervalos de tiempo) de los fenómenos a estudiar.

Del conjunto de pares de valores (solsticio-equinoccio) obtenidos en todos los lugares de observación, finalmente se obtiene un valor promediado, representativo del Proyecto, de la Oblicuidad de la Eclíptica. Los distintos valores obtenidos por cada Equipo de trabajo, en cada momento, así como el promedio general del valor de la Oblicuidad de la Eclíptica, se dan en la Tabla 1.

Cuadro 1: Equipos de docentes, estudiantes e investigadores del Proyecto.

Ciudad y País	Latitud	Longitud	Institución	Participantes
Esquel, Argentina	42° 55' S	71° 19' O	Complejo Plaza del Cielo, CONICET – FHCS UNPSJB	Néstor Camino (Responsable), Cristina Terminiello
Claypole, Argentina	34° 47' S	58° 23' O	Grupo de Enseñanza de la Astronomía de Almirante Brown	Javier H. Feu (Responsable), Vanesa Viña, Aida Figallo, Conrado F. Kurtz, Fernando Descalzo, Romina Guaragno
CABA, Argentina	34° 33' S	58° 25' O	IAFE - CONICET	Alejandro Gangui (Responsable), Esteban Diczovski, María Iglesias, Elina Godoy, Julio Cabrera, Fernando Karaseur
Pelotas, Brasil	31° 25' S	52° 23' O	UF Pelotas	Virgínia Mello Alves (Responsable)
Porto Alegre, Brasil	30° 01' S	51° 14' O	UFRGS	Maria de Fátima Saraiva (Responsable), Daniela Pavani, Marina Sanfelice Valenzuela
Caxias do Sul, Brasil	29° 10' S	51° 10' O	Universidade de Caxias do Sul	Odilon Giovannini Jr. (Responsable), Francisco Catelli, Débora Scheeren, Elisa Danda de Oliveira, Fernanda Miotto, Giovanni Rech, Luís Fernando Basso, Rodrigo Barbieri, Andrea Elisabete de Paula
São Bernardo do Campo, Brasil	23° 42' S	46° 34' O	Faculdade de Educação, USP	Thais Cortellini Abrahão (Responsable)
Itapetininga, Brasil	23° 36' S	48° 03' O	Instituto Federal de São Paulo	Vicente Pereira de Barros (Responsable), Leiana Camargo, Ariane Braga, Alberto Moreau, Valter Araújo, Roberta Proença
São Paulo, Brasil	23° 33' S	46° 38' O	Grupo de Ensino de Física e Astronomia, Inst. de Física, USP	Cristina Leite (Responsável), Daniel R. Soler, Flávia P. Ferreira
Uberlândia, Brasil	18° 56' S	48° 15' O	UF de Uberlândia	Marcos Daniel Longhini (Responsável), Hanny Angeles Gomide, Mariana Ferreira de Deus, Telma Cristina Dias Fernandes
Ilhéus, Bahia, Brasil	14° 47' S	39° 08' O	Grupo de Astrofísica	Jules Soares y Leandro Kerber (Responsables)
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil	05° 50' S	35° 12' O	Grupo de Ensino de Física e Astronomia, UFRN	Auta Stella de Medeiros Germano (Responsável), Antonio Dgerson Pereira da Costa, Daniella Maria Cunha,
Manaus, Brasil	03° 06' S	60° 02' O	Estação Ciências, Casa da Física UFAM	Luciana da Cunha Ferreira (Responsable)

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Dado que el objetivo principal de este proyecto de observación conjunta fue la determinación del valor de la Oblicuidad de la Eclíptica, podemos concluir que el mismo ha sido satisfecho ampliamente. El valor obtenido, aun siendo un promedio con alto grado de incerteza y dificultades metodológicas, se mantiene cerca del 1/100 del valor aceptado en la actualidad (23,6° versus 23,4°, respectivamente).

De todos modos, cabe notar que este tipo de proyectos tiene una dispersión metodológica muy grande, lo que en particular trae como consecuencia un alto grado de incerteza experimental, cuyas causas principales son las siguientes: diferencias entre las alturas de los gnomons, dispersión en los instantes de observación debido principalmente a razones climáticas, distintos métodos matemáticos para determinar los ángulos buscados, determinación de los ángulos por largos de sombras en vez de la medición directa por medio de un transportador.

Comparando los datos obtenidos en los seis momentos elegidos, hemos determinado los siguientes valores de ϵ .

Tabla 1: Resultados de la medición conjunta de la oblicuidad terrestre.

Lugar de observación	Latitud	Máxima altura angular del Sol (h_{\odot})						Oblicuidad de la Eclíptica		
		Solsticio dic. 2011 (1)	Equinoccio mar. 2012 (2)	Solsticio jun. 2012 (3)	Equinoccio sep. 2012 (4)	Solsticio dic. 2012 (5)	Equinoccio mar. 2013 (6)	Promedio (1), (5) – Promedio (2), (4), (6)	Promedio (2), (4), (6) – (3)	Valor medio
Esquel, Argentina.	42° 55' S	71°	47°	24°	47°	71°	sin registros	24°	23°	23.5°
Claypole, Argentina.	34° 47' S	sin registros	55°	31°	55°	81°	sin registros	26°	24°	25°
CABA, Argentina.	34° 33' S	79°	55°	31.5°	sin registros	sin registros	sin registros	24°	23.5°	23.75°
Porto Alegre, Brasil.	30° 01' S	83,15°	sin registros	sin registros	60,31°	sin registros	sin registros	22,84°	-----	22,84°
Caxias do Sul, Brasil.	29° 10' S	82.3°	60.3°	sin registros	62,3°	85,9°	sin registros	22.8°	-----	22.8°
São Paulo, Brasil.	23° 33' S	89° 19'	66° 21'	sin registros	sin registros	sin registros	sin registros	22° 58'	-----	22° 58'
Uberlândia, Brasil	18° 56' S	sin registros	sin registros	sin registros	71°	95° (85° S)	sin registros	24°	-----	24°
Ilhéus, Bahia, Brasil.	14° 47' S	sin registros	sin registros	sin registros	74°	97° (83° S)	sin registros	23°	-----	23°
Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.	05° 50' S	107° (73° S) ³	sin registros	sin registros	sin registros	sin registros	sin registros	-----	-----	-----
Valor medio general representativo del Proyecto⁴ como un todo:								$\epsilon = 23.5^\circ$		

Cabe destacar que los lugares que no están indicados en la tabla anterior no han podido registrar datos debido a diversas razones, siendo la de mayor influencia las condiciones climáticas del lugar en cada momento de observación.

³ Todos los valores de la máxima altura angular del Sol indican ángulos medidos entre la visual al Sol y el plano del Horizonte, en la mitad Norte del plano del meridiano celeste local. En el caso de Natal, 107° significa que el Sol cruzó el Cenit hacia el Sur, por lo que los 73° (el ángulo complementario) se miden en la mitad Sur del plano del meridiano celeste del lugar. Lo mismo sucede con los valores de Uberlândia y con los de Ilhéus.

⁴ Calculado aproximando los valores presentados por cada Equipo a un decimal. El valor aceptado actualmente para la Oblicuidad de la Eclíptica, a un decimal, es 23,4°.

COMENTARIO FINAL

La importancia de una experiencia como la que hemos presentado en este trabajo reside principalmente en los siguientes aspectos: en lo social, porque muestra que es posible realizar acciones colaborativas, solidarias, comprometidas, entre personas e instituciones muy alejadas geográficamente y con idiosincrasias culturales distintas; en lo educativo, porque es una forma de demostrar que es posible educar a través de proyectos compartidos de larga duración, generando nuevas formas de enseñar y de aprender, no necesaria ni únicamente vinculadas a lo formal, ni a los recursos tecnológicos, ni a los currículum estructurados en cada sistema educativo; finalmente, en lo que respecta a la Didáctica de la Astronomía, porque hemos recorrido de alguna manera un camino similar al que muchas otras personas de distintos pueblos vivieron a través de siglos para sistematizar observaciones del cielo, para desarrollar procesos de medición y para generar explicaciones que les resultaran significativas para una nueva cosmovisión, y fundamentalmente porque hemos fortalecido la observación real de eventos astronómicos desde nuestros propios lugares, algo que es necesario para la Enseñanza de la Astronomía, más allá de la utilización de maquetas, simulaciones, softwares, y automatización de procesos mediados o dependientes de la tecnología.

El proceso compartido en un período de casi tres años entre colegas de muchos lugares de Brasil y Argentina, muestra que es posible generar acciones concretas, en particular para determinar en forma rigurosa parámetros del sistema físico, astronómico, en el cual vivimos, en el contexto de una experiencia didáctica socialmente relevante. De eso se trata, justamente, el desafío de la Didáctica de la Astronomía, y de la investigación educativa asociada con esta aún joven disciplina.

La riqueza de un proceso como el que hemos compartido excede en mucho los resultados numéricos obtenidos (los cuales, de todos modos, han sido excelentes). En especial, porque brinda a quienes aprenden (estudiantes de profesorado, gente común, chicos) situaciones concretas para que el proceso de construcción conceptual que desarrollan no sólo sea una actividad mental sino también una acción (en el sentido piagetiano) que involucre transformación, compromiso, tridimensionalidad espacial y transcurrir temporal, en entornos diferentes al tradicional del aula. Así, consideramos que reviste gran interés dar continuidad a esta clase de proyectos sobre Didáctica de la Astronomía, que requieran de la observación de fenómenos astronómicos reales en forma conjunta.

REFERENCIAS

- BRITTON, J. (1969). "Ptolemy's determination of the obliquity of the Ecliptic". *Centaurus*, Vol. 14, N°1, 29-41.
- CAMINO, N., et alii. (2009). "Observación conjunta del Equinoccio de marzo, Proyecto CTS 4 – Enseñanza de la Astronomía". *Caderno N°31, SBPC*.
- JONES, A. (2002). "Eratosthenes, Hipparchus and the obliquity of the Ecliptic". *Journal for the History of Astronomy*, Vol. 33, Part 1, No. 110, 15-19.
- LI, Y., SUN, X-Ch. (2009). "Gnomon shadow lengths recorded in the Zhoubi Suanjing: the earliest meridian observations in China?" *Research in Astron. Astrophys.* Vol. 9 No. 12, 1377–1386
- SWERDLOW, N. M. (2010). "Tycho, Longomontanus, and Kepler on Ptolemy's Solar Observations and Theory, Precession of the Equinoxes, and Obliquity of the Ecliptic". A. Jones (ed.), *Ptolemy in Perspective*, Archimedes 23.
- WITTMANN, A. (1979). "The obliquity of the ecliptic". *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 73, N° 1-2, . 129-131.