

# MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DEL AZIMUT GEOGRÁFICO POR OBSERVACIONES SOLARES

## METHODS OF DETERMINATION OF THE GEOGRAPHICAL AZIMUTH FOR SOLAR OBSERVATIONS

Ricardo Santos Rodríguez, Hildebrando Buendía Ríos,  
Franci Benito Cruz Montes, Beder Felipe Ulloa Llerena

### RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo específico desarrollar una metodología que, teniendo un sustento teórico sólido, nos permite determinar la orientación de un alineamiento con una precisión mínima que sirve como base para todo proyecto de infraestructura civil en espacios urbanos y rurales. Para lo cual luego de una revisión bibliográfica especializada y del ordenamiento de conceptos se efectuaron los procesos analíticos y la evaluación de los resultados que permitieron el planteamiento en forma directa de la determinación de la dirección del azimut geográfico por observaciones solares, lográndose de esta forma conseguir una precisión del orden de  $\pm 30''$ .

**Palabras clave:** Azimut geográfico, observaciones solares, valor más probable, ángulo horario.

### ABSTRACT

The present research had like specific objective to develop a methodology that, having a solid theoretical sustenance, allows to determinate the direction of fan alignment with a minimum precision that serves as a base for all civil infrastructures Project in urban and rural spaces. For which after a specialized bibliographical revision and of the ordering of concepts, the analytical processes and the evaluation of the results allowed the exposition in direct form the determination of the geographic azimuth by solar observations, being obtained with this form a precision of the order of  $\pm 30''$ .

**Keywords:** Geographical azimuth; solar observations, more probable value, clock angle.

## INTRODUCCIÓN

Ante el crecimiento demográfico de las principales ciudades de la Costa, Sierra y Selva, por la inmigración indiscriminada de los habitantes de las zonas rurales, las ciudades empiezan a crecer y en la mayoría de los casos lo hacen sin contar con un plan director y/o plan regulador; lo que traerá como consecuencia que el crecimiento de estas ciudades, adolecerá de los servicios básicos (esenciales para todo ser humano), en la mayoría de los casos (asentamientos Humanos y/o pueblos jóvenes, etc.). Debemos afirmar que para el desarrollo

integrado de un país se requiere elaborar planes de Desarrollo, así como en los centros poblados de importancia que van recibiendo a los inmigrantes rurales. Teniendo en cuenta las características de nuestro territorio patrio, de contar con zonas planas y carencia de ríos suficientes para cubrir su requerimiento de agua; es fundamental que en el surgimiento de nuevos centros poblados y/o el crecimiento de las actuales, se cuenten con planos cartográficos que nos indique las características del terreno donde se está produciendo el asentamiento poblacional, y a partir de ella poder elaborar sus proyectos de desarrollo, contando con un

\* Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; Universidad Nacional Mayor de San Marcos.  
E-mail: rsantosr@unmsm.edu.pe / hbuendiar@unmsm.edu.pe

plano cartográfico a priori a fin de representar lo más exacto posible las características del terreno; por esta razón es necesario apoyarse en redes de Control, establecidos por el ente de control de nuestro país, y en el establecimiento de estas redes se requieren contar con puntos geodésicos y topográficos determinados con la precisión requerida para el tipo de proyecto a elaborarse (Montes de Oca, 1994) [1]. La determinación de la dirección del Meridiano Verdadero y/o Geográfico, es indispensable para orientar las redes de triangulación y como mínimo para orientar todo trabajo de inicio en las obras civiles. Para determinar la dirección del Meridiano nos apoyamos en el azimut que tiene un astro en un momento dado, así como el ángulo horizontal que ella hace con respecto a una línea de referencia y/o de partida [2]; es decir se determina el azimut de la señal de referencia del lugar de observación. Existen varios métodos para la determinación del azimut geográfico por observaciones solares [3], por ejemplo el método convencional (cuando se conoce la latitud del lugar), método no convencional (cuando no se conoce la latitud del lugar) y el método del ángulo horario (el cual requiere contar con catálogos astronómicos).

**MÉTODO**

El método utilizado para determinar el azimut geográfico por observaciones solares fue el Observacional, y a partir de los datos obtenidos se utilizaron los siguientes procedimientos analíticos para su obtención.

**1. Método convencional**

Denominamos así al método para determinar el azimut del sol, en el cual se conoce de antemano las coordenadas geográficas del lugar de observación con una aproximación de  $\pm 30''$ , para ello se deben efectuar las visaciones al astro como mínimo en 10 sets, pero no necesariamente consecutivas.

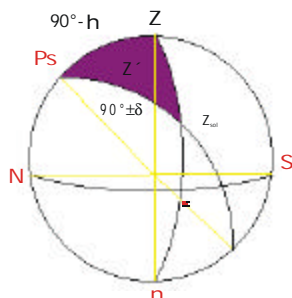


Figura N° 1

Teniendo en cuenta la figura N° 1 formulamos las ecuaciones siguientes:

1. 
$$\text{Cos}(Z') = \frac{\text{Cos}(p) - \text{Sen}(h)\text{Sen}(\varnothing)}{\text{Cos}(h)\text{Cos}(\varnothing)}$$
2. 
$$\text{Cos}^2\left(\frac{Z'}{2}\right) = \frac{\text{Cos}(S)\text{Cos}(S - p)}{\text{Cos}(\varnothing)\text{Cos}(h)}$$

En la que:  $2S = h + i + \tilde{n}$

Con estas tres expresiones se calcula  $Z'$  y por ende «Z» (Santos, 1992).

**2. Método no convencional**

Es otra forma de determinar el meridiano de un lugar, en el cual no se requiere conocer la latitud de la estación.

Para ello se requiere que se efectúen las visaciones al astro en 10 sets y ellas se realicen en forma consecutiva.

Para determinar el azimut de un astro se trabaja con pares de sets, que deben cumplir la siguiente condición:

$$20^m \leq \Delta t \leq 30^m$$

Resolviendo el triángulo astronómico, de acuerdo a la figura N° 2 se determina previamente el valor de la latitud mediante dos ecuaciones que deben dar el mismo valor, y cuya diferencia absoluta debe cumplir con la precisión requerida, según la siguiente condición:

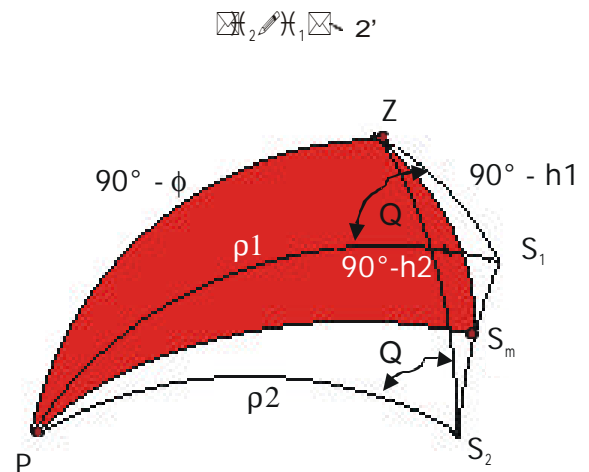


Figura N° 2

$$\begin{aligned} \text{Sen}(\varnothing_1) &= \text{Cos}(\mathbf{r}_m)\text{Sen}(h_m) + \text{Sen}(\mathbf{r}_m)\text{Cos}(h_m)\text{Cos}(Q) \\ \text{Sen}(\varnothing_2) &= \text{Cos}(\mathbf{r}_m)\text{Sen}(h_m) - \text{Cos}^2(h_m)(dZ/dt) \end{aligned}$$

Si se cumple con la precisión requerida se acepta el par de sets considerados y se continúa con el cálculo del azimut del astro.

Aplicando las relaciones trigonométricas en el triángulo astronómico P-Z-S<sub>m</sub> de la figura N° 3 y considerando:

$$h_m = (h_1 + h_2)/2 \quad y$$

$$\rho_m = (\rho_1 + \rho_2)/2$$

Se tiene:

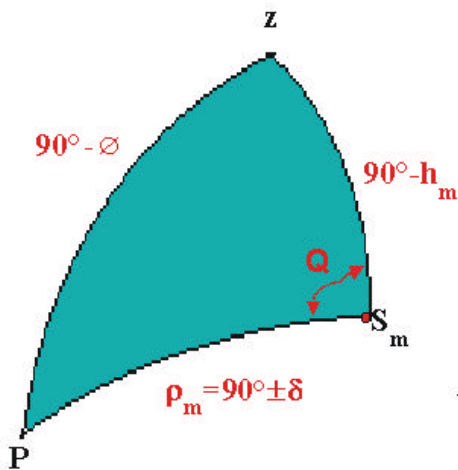


Figura N° 3

$$\text{Ctg}(Q) = \text{Cos}(h_m) (dZ)/(h_2 - h_1)$$

$$dt = (HL_2 - HL_1) * 15$$

$$dZ = (<H_2 - <R_2) - (<H_1 - <R_1)$$

$$\text{Sen}(\varnothing) = \text{Cos}(\mathbf{r}_m)\text{Sen}(h_m) + \text{Sen}(\mathbf{r}_m)\text{Cos}(h_m)\text{Cos}(Q) \Rightarrow 1$$

$$\text{Sen}(\mathbf{r}_m) = \text{Cos}(\varnothing)\text{Sen}(h_m) + \text{Cos}(\varnothing)\text{Cos}(h_m)\text{Cos}(Z') \Rightarrow 2$$

Reemplazando 1 en 2:

$$\text{Cos}(\varnothing)\text{Cos}(Z') = \text{Cos}(\mathbf{r}_m)\text{Cos}(h_m) - \text{Sen}(h_m)\text{Sen}(\mathbf{r}_m)\text{Cos}(Q) \Rightarrow 3$$

También:

$$\text{Cos}(\varnothing)\text{Sen}(Z') = \text{Sen}(\mathbf{r}_m)\text{Sen}(Q) \Rightarrow (\text{Ley de Senos}) \Rightarrow 4$$

Dividiendo 3 entre 4:

$$\text{Ctg}(Z') = \text{Ctg}(\mathbf{r}_m)\text{Cos}(h_m)\text{Cosec}(Q) - \text{Sen}(h_m)\text{Ctg}(Q) \Rightarrow 5$$

Con la ecuación «5» se obtiene el valor de Z', el cual debe analizarse para determinar el azimut del astro, según que las observaciones se hayan realizado en la mañana o en la tarde. (Montes de Oca, 1994).

### 3. Método del ángulo horario

Este método requiere que se conozca de antemano las coordenadas geográficas del punto topográfico; es decir la latitud ( $\phi$ ) y longitud ( $\lambda$ ) con la precisión necesaria para obtener la dirección del meridiano.

La característica de este método es que sólo utiliza como dato del proceso de observación a los astros; el tiempo en el instante en que el astro es tangente a los hilos reticulares.

El número de sets a efectuarse es semejante a los métodos anteriores, es decir 10 sets.

Con el tiempo de observación al astro, se obtiene el Tiempo Universal y el Tiempo Sideral; a partir de los cuales se obtienen las coordenadas ecuatoriales del astro en el instante de la visación apoyado en el Almanaque Astronómico, así como el ángulo horario que hace el astro en ese instante; teniendo en cuenta:

$$TU = H_L + H$$

$$TSL = 1.00273765556TU + T_{SGx}^{\circ} - \lambda$$

$$t = TSL - \alpha$$

En la que:

$$H_L = \text{Hora Legal}$$

$$TSL = \text{Tiempo Sideral Local}$$

$$H = \text{Huso}$$

$$T_{SGx}^{\circ} = \text{Tiempo Sideral en Greenwich a } 0^{\text{h}} \text{ de TU del día «X» (The astronomical almanac, 2004) [4]}$$

$$TU = \text{Tiempo Universal}$$

$$\lambda = \text{Longitud del Lugar}$$

$$t = \text{Ángulo Horario}$$

$$\alpha = \text{Ascensión Recta}$$

Teniendo en cuenta el triángulo astronómico de la figura N° 4

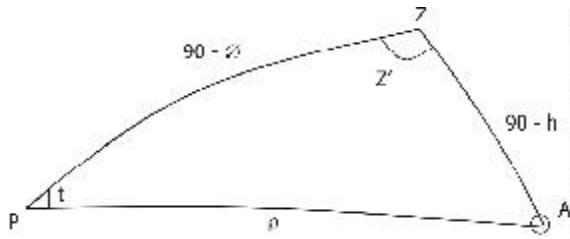


Figura N° 4

$$\text{Sen}(h) = \cos(\tilde{n}) \text{sen}(\varnothing) + \text{sen}(\tilde{n}) \cos(\varnothing) \cos t \tag{1}$$

$$\text{Cos}(\tilde{n}) = \text{sen}(\varnothing) \text{sen}(h) + \cos(\varnothing) \cos(h) \cos(Z') \tag{2}$$

$$\frac{\text{sen}(t)}{\cos(h)} = \frac{\text{sen}(Z')}{\text{sen}(\tilde{n})} \rightarrow \cos(h) = \frac{\text{sen}(t) \text{sen}(p)}{\text{sen}(Z')} \tag{3}$$

Reemplazando (1) y (3) en (2)

$$\text{Cos}(\tilde{n}) = \text{sen}^2(\tilde{A}) \cos(\tilde{n}) + \text{sen}(\tilde{n}) \text{sen}(\tilde{A}) \cos(\tilde{A}) \cos(t) + \cos(\tilde{A}) \text{sen}(t) \text{sen}(\tilde{n}) \text{ctg}(Z')$$

$$\text{Cos}(\tilde{n}) \cos(\tilde{A}) = \text{sen}(\tilde{n}) \text{sen}(\tilde{A}) \cos t + \text{sen}(t) \text{sen}(\tilde{n}) \text{ctg}(Z')$$

$$\text{Sen}(t) \text{sen}(\tilde{n}) \text{ctg}(Z') = \cos(\tilde{n}) \cos(\tilde{A}) - \text{sen}(\tilde{n}) \text{sen}(\tilde{A}) \cos(t) \text{sen}(\tilde{n})$$

$$\text{Ctg}(Z') = \frac{\cos(\tilde{n}) \cos(\tilde{A}) - \text{sen}(\tilde{n}) \text{sen}(\tilde{A}) \cos(t)}{\text{sen}(t) \text{sen}(\tilde{n})}$$

$$\text{Tg}(Z') = \frac{\text{sen}(t) \text{sen}(p)}{\cos(\tilde{n}) (\cos(\tilde{A}) - \text{sen}(\tilde{n}) \text{sen}(\tilde{A}) \cos(t))}$$

$$\text{Tg}(Z') = \frac{\text{sen}(t) \text{tg}(\tilde{n}) \text{sec}(\tilde{A})}{1 - \text{tg}(\tilde{n}) \text{tg}(\tilde{A}) \cos(t)}$$

Con este valor y teniendo en cuenta la posición del astro (al Este y/o al Oeste), se obtiene el azimut del astro en el instante de la visación y a partir de ella haciendo uso de los ángulos horizontales y de referencia al astro se tiene:

$$Z_{\text{ref}} = Z - <H + <R$$

### RESULTADOS

Con los datos observados en campo, se efectuó el procesamiento en gabinete, obteniéndose los promedios de la Hora Legal, Ángulo Horizontal, Vertical y Referencia (cuadro N° 1).

Cuadro N° 1. Promedios de hora legal y ángulos horizontal y vertical (estado del reloj: 3<sup>m</sup>16<sup>s</sup> Atrasado)

SET	HL			<H			<V			< REF			Eo
	h	m	s	°	'	''	°	'	''	°	'	''	
1	15	8	29.25	81	17	20.30	49	7	2.50	0	0	29	+0.5
2	15	41	27	88	36	36.00	57	6	47.75	9	2	56	+2.5
3	15	02	02.75	96	58	47.12	60	25	15.90	18	5	10	-2.5
4	16	3	48	105	40	37.48	62	8	53.00	27	7	28.4	-5.4
5	16	7	38	114	17	23.30	63	30	43.35	36	0	24.2	-8.1
6	16	13	26	123	2	50.63	64	55	41.70	45	2	18	-1.0
7	16	18	45	131	49	5.20	66	21	3.50	54	5	12	-2.1
8	16	25	45	140	32	39.52	67	56	16.88	63	7	13	-7.6
9	16	32	14	149	7	14.22	69	30	58.50	72	0	8	+0.9
10	16	38	37	157	52	22.90	71	4	27.77	81	3	9	-2.5
11	16	46	17	166	32	58.57	72	56	15.95	90	5	6	-0.5

Estación: Santa Eulalia - Chosica / Referencia: Hospital UNFV  
 Fecha: 10-10-04 / Cota: 945.00 m.s.n.m. / Latitud: 11° 54' 54.21"  
 Huso: 5 w / Presión: 678.58 mmHg

Estos resultados se utilizaron en las fórmulas correspondientes de cada método y el mismo

sirvió de base para determinar el azimut geográfico (cuadros N° 2, 3 y 4).

**Cuadro N° 2.** Cálculo del azimut de sol de la referencia: método convencional.

ESTACIÓN:		SANTA EULALIA-CHOSICA	
REFERENCIA:		HOSPITAL UNFV	
FECHA:	10/10/2004	COTA:	945 m.s.n.m.
HUSO:	5 W	PRESIÓN:	678.58 mmHg
LATITUD:		11°54'54.21" S	

SET	Z REF			V	V <sup>2</sup>
1	9	44	6.46	R *	*
2	9	44	11.32	-4.072	16.583542
3	9	44	12.62	-2.766	7.6522876
4	9	44	10.28	-5.112	26.133923
5	9	44	17.10	1.709	2.9222745
6	9	44	11.62	-3.768	14.197702
7	9	44	19.36	3.976	15.808594
8	9	44	21.56	6.177	38.152105
9	9	44	29.52	R *	*
10	9	44	22.32	6.935	48.089291
11	9	44	12.31	-3.078	9.4751121
<b>? =</b>	<b>87</b>	<b>38</b>	<b>18.49</b>	<b>? V<sup>2</sup> =</b>	<b>179.0148388</b>

VMP= 9 44 15.39 +- 1.06 "

Z<sub>ref</sub>: Azimut de Sol de la Referencia.

VMP: Valor más Probable del Azimut de Sol.

R\*: Valor Retirado que no interviene en el VMP porque supera la tolerancia permitida.

**Cuadro N° 3.** Cálculo del azimut de sol de la referencia: método del ángulo horario.

ESTACIÓN:		STA. EULALIA		CHOSICA-LIMA	
REFERENCIA:		HOSPITAL UNFV			
FECHA:	10/10/2004	COTA:	945	msnm	
HUSO:	5 W	PRESIÓN:	678.58	mmHG	
LATITUD:	11° 54' 54.21" S	LONGITUD:	76°39' 52.50" W		

SET	Z REF			V	V <sup>2</sup>
1	9	44	45.76	R *	*
2	9	44	1.15	R *	*
3	9	44	0.66	R *	*
4	9	44	3.80	-8.191	67.09950204
5	9	44	11.45	-0.541	0.2931449
6	9	44	4.05	-7.941	63.06628776
7	9	45	38.63	R *	*
8	9	44	18.28	6.289	39.54613061
9	9	44	22.84	10.849	117.691502041
10	9	44	17.88	5.889	34.67527347
11	9	44	5.64	-6.351	40.34064490
<b>? =</b>	<b>68</b>	<b>9</b>	<b>23.94</b>	<b>? V<sup>2</sup> =</b>	<b>362.71248571421</b>

VMP= 9 44 11.99 ± 1.98 "

**Cuadro N° 4.** Cálculo del azimut de sol de la referencia: método no convencional.

PARES		Z <sub>REF</sub>			V	V <sup>2</sup>	ΔHL	$\frac{\Delta H}{L}$	$\frac{\Delta H}{L}$	$\frac{\Delta H}{L}$
1	2-4	9°	46'	1.00	13.43	180.36	22	1.97	11° 58'	2.51
2	2-5	9°	46'	28.00	-13.57	184.14	26	1.05	11° 59'	7.11
3	3-7	9°	45'	30.00	44.43	*	23	0.73	11° 57'	44.10
4	3-8	9°	46'	23.00	-8.57	73.44	30	0.57	11° 59'	46.59
5	4-8	9°	46'	33.00	-18.57	344.84	22	0.99	11° 59'	46.14
6	4-9	9°	46'	44.00	-29.57	*	28	1.25	12° 0'	19.34
7	5-9	9°	46'	29.00	-14.57	212.28	24	1.30	11° 59'	31.24
8	6-10	9°	46'	17.00	-2.57	6.60	25	1.02	11° 59'	43.71
9	7-10	9°	45'	56.00	18.43	*	20	15.73	*	
10	8-11	9°	44'	59.00	75.43	*	21	1.88	11° 56'	52.50
PROM:		9°	46'	14.43		1001.69			11° 58'	59.25
<b>VPM</b>		<b>9°</b>	<b>46'</b>	<b>14.43</b>	<b>+/-</b>	<b>3.89752</b>				

## DISCUSIÓN

Los métodos antes descritos nos permite calcular el Azimut Geográfico por observaciones solares y en los cuales se observa lo siguiente:

Los valores obtenidos difieren en precisiones menores que  $\pm 30''$ .

Se observa que los valores calculados por los métodos convencional y ángulo horario nos proporcionan mejores resultados para efectuar trabajos topográficos, teniendo en cuenta que su aplicación es para distancias hasta de 10 km; en el cual se considera que las direcciones son paralelas.

Los valores obtenidos por el método no convencional difieren a los valores calculados con los métodos anteriores debido, probablemente, a que

no se contó con un cronómetro adecuado para el caso y un equipo astronómico de mayor precisión.

Por tanto, se puede deducir que los métodos convencional y del ángulo horario son aplicables a nuestra realidad.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Montes de Oca, M. (1994). *Topografía*. México: Alfa y Omega.
2. Martín, F. (1992). *Astronomía*. Madrid: Edit. ALBER.
3. Santos, R. (1992). *Astronomía de Posición*. Perú: Universidad Nacional de Ingeniería.
4. U.S. Government Printing Office. (2004). *The Astronomical Almanac for the year*. London: The Stationery Office.