

Bol. Invest. Mar. Cost.	38 (1)	151-169	ISSN 0122-9761	Santa Marta, Colombia, 2009
-------------------------	--------	---------	----------------	-----------------------------

LA VARIACIÓN ANUAL DE LOS ÁNGULOS SOLARES EN LA LATITUD DE SANTA MARTA Y SU IMPORTANCIA LOCAL

Jacobo Blanco R.¹ y Eliseo Pérez²

1 Universidad del Magdalena, Programa Ingeniería Pesquera, Santa Marta, Colombia. jablarce@gmail.com

2 Centro Nacional de Restauración, Bogotá, Colombia. eliseopm@latinmail.com

RESUMEN

Se analizan los cambios anuales en el rumbo aparente del sol (azimut) y de su altura relativa en el cielo, expresada por su altitud y su declinación para la latitud de Santa Marta (Colombia). Los datos de las observaciones del azimut medido localmente no difieren significativamente de los calculados. Se calculó también la duración del día local en minutos. Se estiman los parámetros del modelo predictivo en función del número del día y sus I.C. del 95 %. Por su topografía montañosa, la región de Santa Marta presenta áreas donde la disponibilidad de luz solar cambia durante el año por su posición al norte o al sur de los promontorios y los ángulos solares respectivos. Se discuten las implicaciones para las comunidades vivas locales.

PALABRAS CLAVE: Azimut, Altitud, Declinación, Duración del día, Santa Marta.

ABSTRACT

Sun angles annual variation at Santa Marta latitude and its local significance. Annual changes on the sun's apparent bearing (azimuth) and on its relative height on the sky, expressed as Altitude and Declination for Santa Marta's Latitude, are analyzed. Observed azimuth data did not differ significantly from those calculated. Local daylight duration in minutes was also computed. The parameters for a predictive model as a function of the day's number and their C.I. at 95 % are estimated. Because of its mountainous topography, the Santa Marta region shows areas where sunlight availability changes throughout the year due to their northern or southern location of promontories and to the respective solar angles. Implications for local living communities are discussed.

KEY WORDS: Azimuth, Altitude, Declination, Day length, Santa Marta.



INTRODUCCIÓN

Siendo el sol la fuente principal de energía en la biosfera, el conocimiento de su relación con el ambiente local permite una mejor comprensión de los fenómenos biológicos que ocurren en cualquier ecosistema natural. Con mayor razón en los trópicos, donde aunque la energía solar se encuentra en abundancia, el tiempo real de iluminación y el modo como se recibe pueden marcar la diferencia.

La palabra trópico proviene del griego tropein que significa cambiar de rumbo. Los primeros navegantes europeos que trataron de localizarse en los trópicos notaron este aparente cambio de dirección o rumbo del sol durante el año, hacia el norte y hacia el sur, mientras que en latitudes altas de la zona templada el sol se observa más alto o más bajo, pero siempre del mismo lado. Por esto la denominación. Sin embargo, este aspecto tan especialmente distintivo del trópico, generalmente es dejado de lado por considerarlo poco importante, tanto que muchos nunca lo han notado.

Aunque en el trópico no se presentan estaciones similares a las de la zona templada, existen diferencias entre la cantidad de radiación solar que se recibe en la biosfera y la duración del día, o el ángulo de incidencia de los rayos solares en diferentes meses. Este ángulo de incidencia depende de la posición relativa del sol con respecto a un punto fijo, de latitud conocida, en un tiempo dado y varía durante el año. Así el rumbo aparente del sol cambia con los días. En cualquier punto de la zona tórrida, entre los paralelos 23°27' N y 23°27' S, el sol se encuentra directamente perpendicular al punto en algún tiempo del año. Esto ocurre dos veces: en una, el sol parece moverse hacia el norte y en la otra, hacia el sur.

Estas diferencias no parecen ser notorias en áreas de topografía plana; sin embargo, en áreas montañosas puede tener un significado para las comunidades vegetales, situadas al lado norte o sur de la montaña, cuyo tiempo de luz diario y su intensidad cambian durante el año. Más aún debe ser importante el efecto en comunidades de macroalgas sumergidas del litoral, debido al efecto reflectivo y refractivo de las aguas, lo cual aumenta o disminuye la cantidad de luz que reciben en el año.

Hasta un 10 % de la intensidad media de la luz ultravioleta solar en la superficie puede penetrar hasta 15 m en aguas claras (Calkins y Thordardottir, 1980) y puede inactivar bacterias a una profundidad de 4 m (Acra *et al.*, 1989). Muchos seres vivos presentan cambios relacionados con los períodos de luz y, aún las especies tropicales pueden no sustraerse a dicha influencia, muy evidente en la mayoría de especies de la zona templada. Por otra parte, muchos de los fenómenos físicos de la atmósfera y del océano están ligados al aporte diferencial de energía

solar durante el año en el globo y este suministro cambia según el movimiento de traslación de la tierra (Pisias e Imbrie, 1987).

Dado el interés que tienen tales variaciones en el sector de Santa Marta, caracterizado por una topografía costera accidentada y la carencia de esta información para esta latitud (11° 15' N), el análisis de dichos cambios locales reviste especial significado para el estudio de sus comunidades vivas, principalmente vegetales, sean terrestres o acuáticas. Los resultados expuestos en este estudio pueden ser de gran valor para el planeamiento de actividades que requieran el aprovechamiento de la energía solar, tales como arquitectura, acuicultura (orientación de estanques), ingeniería, construcción, entre otras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se asume como marco de referencia a la esfera celeste, con la tierra situada en el centro y se hace uso de los dos principales sistemas de coordenadas, el sistema del ecuador celeste y el sistema del horizonte. El primero es una extensión del sistema geográfico terrestre a la esfera celeste y el segundo es un sistema similar, en el que el horizonte reemplaza al ecuador celeste como el gran círculo primario.

Probablemente los factores que expresan mejor la variación del sol con respecto a esta posición son, entre otros, la duración del día a lo largo del año, y los ángulos de declinación, de altitud, de azimut y el azimut. A continuación algunas definiciones:

Azimut: Es el rumbo aparente de un cuerpo celeste medido desde el punto norte o sur del horizonte, según el hemisferio (Fowler, 1989). Es un arco del horizonte (o paralelo de altitud) medido en sentido del reloj por 360°, comenzando por el punto norte sobre el horizonte (Bowditch, 1977). Se utilizó en este trabajo.

Ángulo de azimut: En otro sistema de medidas, es también un arco del horizonte si se mide ya sea en el sentido del reloj o al revés por 180°, comenzando por el punto norte del horizonte en latitudes del hemisferio norte, y por el punto sur en las latitudes del sur (Bowditch, 1977). No fue usado en este caso.

Altitud: Es la distancia angular por encima del horizonte. Se mide a lo largo de un círculo vertical, de 0° en el horizonte hasta 90° en el cenit.

Declinación: En el sistema de medidas del ecuador celeste, la localización de un cuerpo a lo largo de su círculo horario está definida por la distancia angular del cuerpo con el ecuador celeste. Esta distancia llamada declinación se mide en grados al norte o al sur del ecuador celeste, desde 0° hasta 90° en los polos celestes y se nombra N(+) o S(-) para indicar la dirección de la medida de modo similar a la latitud sobre la



tierra (Bowditch,1977). Esta medida angular indica la posición vertical aparente del sol en el cielo, durante el año y por lo tanto está relacionada con la duración del día en un punto de la tierra según su latitud.

Duración del día: Es un complemento de la información anterior, que mide la duración del tiempo de luz solar diaria en horas o en minutos y varía de acuerdo con la declinación del sol.

Con los datos de azimut o el ángulo de azimut y la altitud dentro del sistema horizontal de medidas, sería suficiente para determinar la posición relativa del sol en la esfera celeste, en cualquier día del año desde un punto de latitud dada; sin embargo, la duración del tiempo de luz disponible para los seres vivos es un complemento de la información sobre su dirección de incidencia, para estimar su probable influencia sobre ellos, por esto se incluyen en este trabajo. Se comenzó realizando mediciones diarias del azimut del sol durante el año de 1989, excepto en algunos días festivos y cuando las condiciones de observación no fueron adecuadas, por nubosidad o lluvia, entre otras. Las mediciones se realizaron a las 9:00 AM (9 h ó 14 h GMT) y a las 4:00 PM (16 h ó 21 h GMT), cuando las condiciones locales de observación eran óptimas y sin obstáculos.

El sitio de observación fue siempre el mismo y se localizó en el extremo sur de la terraza superior del INVEMAR, en Punta Betón ($11^{\circ}15'13.9''N - 74^{\circ}13'26.4''W$) posicionada con GPS, Bahía de Santa Marta. Debido a que el punto debía ser fijo y permanecer a la intemperie, para realizar las mediciones se construyó un aparato que se denominó heliogoniómetro, según su función. Su principio es parecido al de un péloro, de los que usan los marinos para tomar posiciones. Constaba de una base plana horizontal de dos láminas de acrílico, en medio de las que se colocó una rosa de vientos graduada (360°), con marcas de 0.5° , pero con direcciones rotadas 180° .

Por el centro de la rosa de vientos se pasó un hilo de nylon perfectamente vertical, sostenido y tensado por un arco de aluminio orientado en sentido norte-sur. De este modo la sombra misma proyectada por el hilo de nylon indicaba directamente el ángulo del sol en cada medición, haciendo más rápido el registro. La orientación de la rosa de vientos se realizó utilizando un compás portátil, un péloro y cartas náuticas del sector costero: así se logró la orientación con el norte verdadero, que en 1989 presentó una diferencia de -6° con el norte magnético. Para cada registro el observador debía estar listo en el sitio minutos antes de realizar la medición y fue necesario ajustar frecuentemente los relojes con las transmisiones radiales de la hora internacional. En los años siguientes, se llevaron a cabo mediciones de comprobación en fechas precisas, en los equinoccios y en los solsticios del hemisferio norte.

Por otra parte, se llevó a cabo el cálculo del azimut diario a las mismas horas, con la ayuda de los datos tabulados en el Almanaque Náutico Reed's de 1989

(Fowler, 1989) y la siguiente fórmula, útil cuando no se tienen datos observados de la altitud del sol, más difícil de medir:

$$\text{Cotangente Az} = \frac{\text{Coseno LAT} \times \text{Tangente DEC}}{\text{Seno AHL}} \pm \frac{\text{Seno LAT}}{\text{Tangente AHL}}$$

Donde,

Az: el azimut

LAT: Latitud local, (11° 15' 13.9" N)

DEC: Declinación

AHL: Ángulo de hora local

El cálculo del AHL se realizó a partir del ángulo de la hora del sol en Greenwich (GHA) que se encuentra para cada día del año en las tablas mensuales del Almanaque Náutico Reed's (Fowler, 1989), lo mismo que la declinación solar y las tablas de corrección según la latitud. Los cálculos de la altitud solar y duración del día en minutos fueron hechos con el programa Sun Position 1.0, de la Seattle Energy Works (Gronbeck, 1995).

Los resultados del azimut, tanto observados como calculados, fueron luego ajustados a un modelo sinusoidal del tipo siguiente:

$$\text{Az} = a + b \cdot \text{seno}(2\pi \cdot x/d + c)$$

Donde:

Az: el azimut (°)

x: el número del día en un año de 365 días.

a, b, c y d: parámetros de la ecuación.

Como criterios de la bondad del ajuste se tuvo en cuenta el valor del coeficiente de determinación, el error típico del ajuste y los intervalos de confianza para cada caso. De coincidir el azimut calculado para esta latitud con el observado, se puede utilizar como referencia del cambio de posición del sol en el sistema del ecuador celeste a la declinación del sol calculada para esta latitud.

De existir mucha discrepancia entre los azimuts calculados y los observados, habría que pensar en otra solución que permitiera conocer la posición relativa del sol durante el año en función del tiempo, para estimar la variación en la oferta anual de luz solar sobre los ecosistemas de acuerdo con la localización geográfica de éstos. Usando como criterio los valores angulares del sol producidos por los modelos para la latitud de Santa Marta a las 9 h y 16 h, se definen las condiciones



astronómicas atribuidas a solsticios y equinoccios, así como los tiempos en que se presentan localmente, independientemente de las fechas críticas establecidas para el hemisferio norte.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados, tanto de los azimuts observados como de los calculados, se representan en la figura 1. Los valores obtenidos para un año (365 días) fueron graficados obteniéndose trazos de tendencia sinusoidal. Se observa que la correspondencia de valores es evidente en la semejanza de las curvas modelo obtenidas para las 14 h y las 21 h GMT (9 h y 16 h locales, respectivamente). Las pocas discrepancias encontradas entre los datos observados y los calculados, son muy seguramente debidas a errores de tiempo (retardos o adelantos) en el momento en que debía hacerse la medición del azimut. El modelo sinusoidal ($Az = a+b*\text{seno}(2\pi*x/d + c)$), se prefirió por su sencillez, menor número de parámetros y mejor bondad de ajuste a los datos, como se presenta en la tablas 1 y 2.

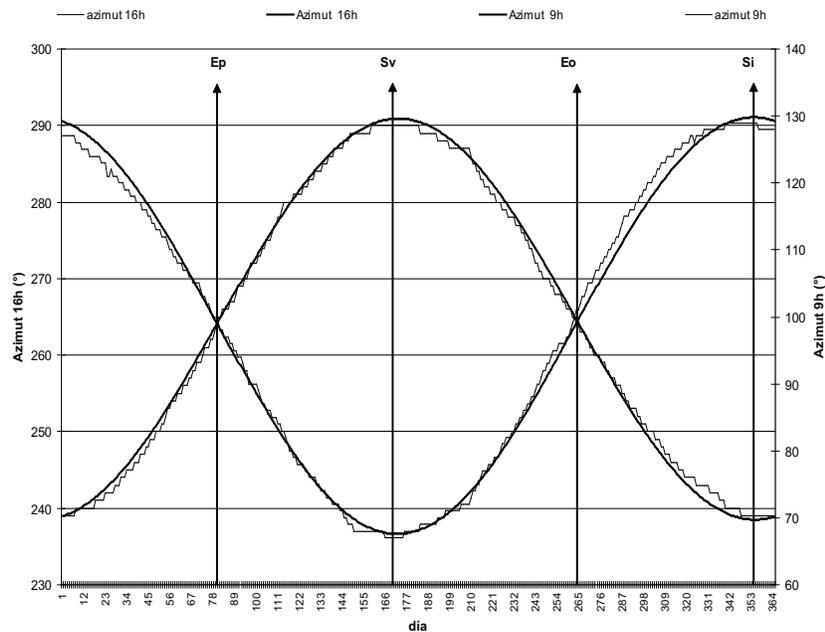


Figura 1. Azimuts medidos en Santa Marta: trazo irregular; azimuts calculados: trazo continuo. Puntos críticos establecidos para el hemisferio norte: Ep y Eo: equinoccios de primavera y de otoño; Sv y Si: solsticios de verano y de invierno respectivamente. Los tiempos corresponden al número del día en un año de 365 días.

Tabla.1. Parámetros del modelo para la variación anual del azimut observado (arriba) y del calculado (debajo) a las 9 h locales.

Parámetros del ajuste	Error estándar	I.C.al 95 %	r ²	Error
a: 97.41	0.08	97.24 - 97.57	0.99	1.88
b: 31.63	0.11	31.40 - 31.85		
c: 1.80	0.007	1.78 - 1.82		
d: 364.9	0.50	363.89 - 365.87		
a: 98.70	1.7e-13	98.70 - 98.70	1.0	1.6e-12
b: 31.10	1.4e-13	31.10 - 31.10		
c: 1.75	1.5e-14	1.75 - 1.75		
d: 364.9	1.8e-12	364.90 - 364.90		

Tabla 2. Parámetros del modelo para la variación anual del azimut observado (arriba) y del calculado (debajo) a las 16 h locales.

Parámetros	Error estándar	I.C.al 95 %	r ²	Error del ajuste
a: 264.98	0.064	264.86 - 265.10	0.99	1.42
b: 26.57	0.087	26.40 - 26.75		
c: 4.86	0.007	4.85 - 4.88		
d: 364.63	0.45	363.73 - 365.54		
a: 264.70	1.2e-15	264.70 - 264.70	1.00	1.1e-14
b: 26.20	9.5e-16	26.20 - 26.20		
c: 4.88	1.2e-16	4.88 - 4.88		
d: 364.90	1.4e-14	364.90 - 364.90		

Los valores altos de r², no inferiores a 0.99, y de error típico inferiores a 1.42 son indicativos de la bondad del ajuste del modelo utilizado para los azimuts durante el año, así como de la estrecha correspondencia entre los valores observados y los calculados al ser ajustados al mismo modelo; los intervalos de confianza son muy similares y en la mayoría de los casos incluyen los valores paramétricos obtenidos con los datos observados. Ni la prueba de homogeneidad de las varianzas, ni la prueba de t (0.01) indicaron diferencias significativas entre el grupo de valores de azimut observados y los calculados.

Con esta premisa se calcularon entonces los valores diarios correspondientes a la altitud del sol a las 9 y a las 16 h para esta latitud; dichos valores fueron luego ajustados al mismo modelo sinusoidal, para mayor consistencia en el análisis. Los parámetros del ajuste se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros del modelo para la variación anual de la Altitud solar a las 9 h (arriba) y las 16 h (debajo) locales.

Parámetros del ajuste	Error estándar	I.C. al 95 %	r ²	Error
a: 26.02	5.027	16.14 - 35.51	0.96	0.87
b: 20.68	4.98	10.89 - 30.48		
c: 0.38	0.16	0.06 - 0.69		
d: 917.41	124.70	672.19 - 1162.62		
a: 24.43	0.368	23.70 - 25.15	0.98	0.50
b: 7.97	0.344	7.30 - 8.65		
c: 5.93	0.059	5.81 - 6.04		
d: 566.1	17.32	531.84 - 600.37		

Con la altitud, el coeficiente de determinación r^2 no fue tan alto como en los casos anteriores; el error estándar de los parámetros fue mayor, especialmente para las 9 h. Esto se debe probablemente a que en el modelo ajustado el valor máximo de altitud (46.71°) se alcanza para el día 173 (junio 22: solsticio de verano); mientras que en los datos calculados sin ajustar se tiene para ese día una altitud de 45.4° y los puntos máximos (46°) se encuentran a 53 días antes y después del solsticio. El modelo no asume estos dos picos idénticos de altitud y por esto la discrepancia con los cálculos de origen.

Estas diferencias son más acentuadas en los valores calculados para el mediodía local (sol cenital), cuando los máximos (90°) se alcanzan 63 días antes y después del solsticio de verano. Por tal razón no fue posible ajustar los datos de altitud a mediodía al modelo sinusoidal definido. Como se verá adelante es preferible utilizar la declinación a las 12 h locales para seguir un modelo de variación anual más consistente. Con los datos de altitud a las 16 h locales, la determinación (r^2) fue mayor porque en los datos calculados el mayor valor (31.7°) se mantiene desde el día 134 al 211 (mayo 14-julio 30) (Figura 3), mientras que el modelo asume un aumento progresivo del ángulo de altitud solar, que logra su máximo (32.4°) para el día 173 (junio 22).

Las figuras 2 y 3 muestran cómo los valores de altitud y del azimut solar varían durante el año. En la Figura 2 los datos para las 9 h locales muestran tendencias opuestas debido a las escalas diferentes utilizadas, así los valores de mayor altitud a esa hora coinciden con los de menor azimut y viceversa en los días de solsticios; mientras que en los equinoccios los valores, tanto de altitud como de azimut, son en ambos casos prácticamente invariables.

Las fechas aproximadas establecidas mundialmente para los equinoccios y los solsticios (Concilio de Nicea: 325 d.C.) (Marcolin, 2008) suponen unas

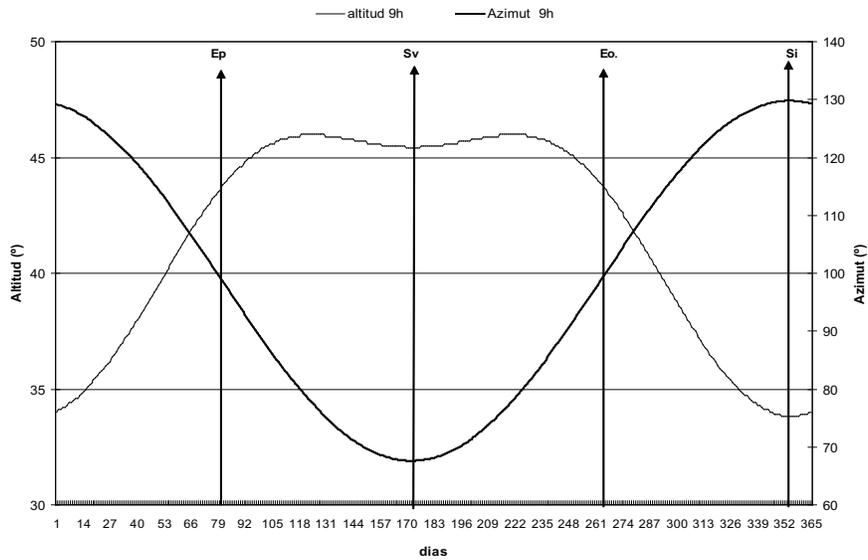


Figura 2. Variación anual de la altitud relativa del sol y su azimut a las 9 h locales en Santa Marta. Azimut calculado: trazo grueso. Puntos críticos establecidos para el hemisferio norte: Ep, Eo y Sv, Si.

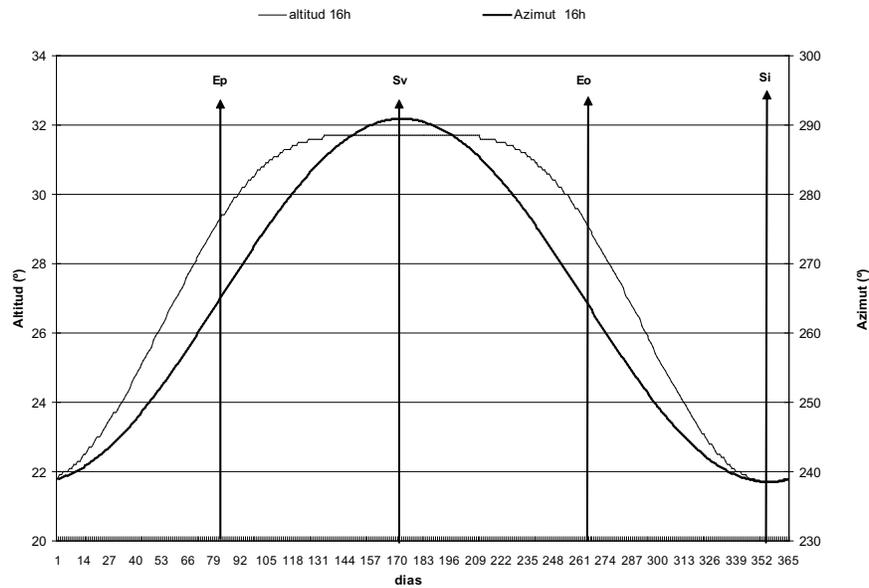


Figura 3. Variación anual de la altitud relativa del sol y su azimut a las 16 h locales en Santa Marta. Azimut calculado: trazo grueso. Puntos críticos establecidos para el hemisferio norte: Ep, Eo y Sv, Si.



condiciones angulares y de radiación asociadas, para latitudes de la zona templada (azimut, altitud) o en el ecuador (declinación). Así, en la Figura 3, a las 16 h locales, la variación tiene un sentido similar en ambos ángulos, aumentando el valor azimutal al aumentar la altitud. Con respecto a las fechas establecidas para los equinoccios, los valores de azimut para esta latitud a las 9 h y 16 h no se ajustan a la condición esperada, esto es, rumbos de 90° y 270° , sino de 100° y 264° , respectivamente. Esta discrepancia se debe a varios factores: las fechas de los equinoccios son aproximadas y cambiantes; se estableció el 21 de marzo como fecha del equinoccio de primavera, pero debido a los ajustes de fechas por las duraciones distintas de los años (a lo cual se debe la inserción de años bisiestos), la hora exacta del equinoccio varía cada año.

Los equinoccios realmente son un momento particular en el calendario, un instante de tiempo que ocurre a una hora determinada; en vez de todo un día entero (aunque se acostumbra llamar equinoccio al día en que ocurre este instante). Este momento depende de la latitud y la longitud del observador, así como de la hora en que se hace la observación y la zona horaria. Otros factores que afectan también la fecha de los equinoccios son la precesión y la nutación.

Observar el sol en el cenit en dos fechas al año es un fenómeno exclusivo de las regiones tropicales. Las fechas en que esto sucede dependen de la latitud exacta del observador y a la latitud del ecuador, los días de sol cenital corresponden con los equinoccios, pero a la latitud de Santa Marta esta posición se observa alrededor del 19 de abril y del 23 de agosto. La palabra equinoccio, significa “noches iguales” (a la duración del día), porque ocurre cuando la duración de la noche y el día es supuestamente igual en todo el mundo. Aunque esto no es del todo cierto, a mayor distancia del ecuador, mayor es la duración del día. Además, por diferencias de zonas de tiempo habrá diferencias horarias entre localidades a la misma latitud. La palabra se usa para referirse no sólo a las posiciones sobre la eclíptica, sino también las fechas cuando el sol las alcanza en el hemisferio norte.

La palabra solsticio se aplica para indicar “sol detenido”, porque el sol se detiene aparentemente en su movimiento hacia el norte o hacia el sur (Bowditch, 1977). Esto último tiene más significación durante el solsticio de verano, cuando en la región de Santa Marta la duración del día se hace mayor y aumenta la temperatura ambiente por el efecto combinado de la radiación y la inercia térmica asociada a la atmósfera y el océano.

Los solsticios son los días en que el sol sale más lejos del este y se pone más lejos del oeste. Es difícil decir las fechas exactas de solsticio con esta figura de movimiento del sol, porque el sol demora varios días saliendo y poniéndose con el mismo azimut.

La declinación del sol (Tabla 4) referida al ecuador celeste indica, como era de esperar, un valor de 0° en los equinoccios (días 80 y 265: marzo 21 y septiembre 22); un máximo de 23.45° en el solsticio de verano (día 173: junio 22) y un mínimo de -23.45° para el solsticio de invierno (día 355: diciembre 21). Esta variación corresponde con la duración del tiempo de luz solar diaria (Figura 4), que presenta valores de 719.2 (11 h 59 min) en los equinoccios; un valor mínimo de 680.2 min (11 h 20 min) en el solsticio de invierno (diciembre 22) y el máximo de 759.8 min (12 h 40 min) para el solsticio de verano (junio 22) con una diferencia anual de 1 h 19 min entre los valores diarios máximo y mínimo (Tabla 5). Sin embargo, para cuando en Santa Marta se presentan los valores de azimut de 90° y 270° a las 9h y 16 h (abril 3-8) respectivamente, los valores de declinación correspondientes son 5.7° y 5.8° (Tabla 6) y en los días en que dura esta condición los días duran 730-731 min (12 h 10 min).

Tabla 4. Parámetros del modelo para la variación anual de la declinación solar a las 12 h locales.

Parámetros del ajuste	Error estándar	I.C. al 95 %	r^2	Error
a: 0.00028	0.0029	-0.0055 - 0.0006	0.99	0.03
b: 23.44	0.0023	23.44 - 23.45		
c: 4.88	0.0003	4.884 - 4.885		
d: 365.35	0.040	365.27 - 365.43		

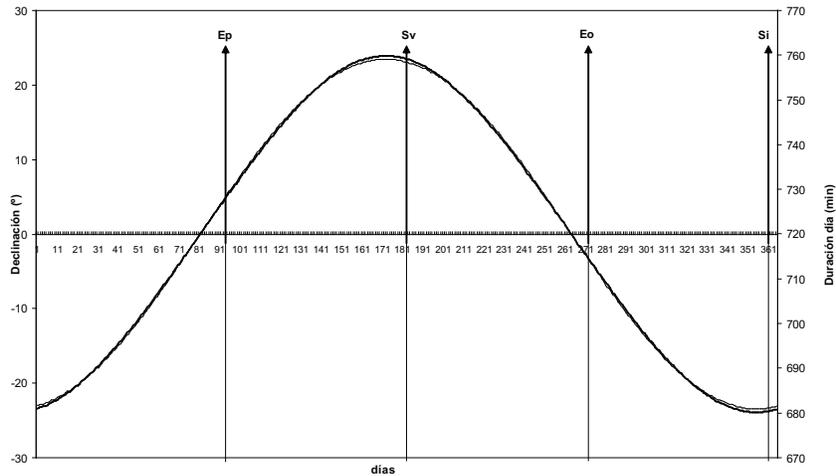


Figura 4. Variación anual de la declinación solar (trazo fino) y de la duración del día en minutos (trazo grueso) a mediodía. Puntos críticos cuando para la latitud de Santa Marta se presentan las condiciones de equinoccios (Ep, Eo) y de solsticios (Sv, Si).

Tabla 5. Parámetros del modelo para la variación anual de la duración del día, como minutos de luz solar diaria.

Parámetros del ajuste	Error estándar	I.C. al 95 %	r ²	Error
a: -84.86	0.018	-84.89 - -84.83	0.99	0.18
b: 25.77	0.015	25.74 - 25.79		
c: 1.66	0.002	1.66 - 1.67		
d: 355.89	0.219	355.46 - 356.32		

Tabla 6. Resumen de las condiciones equinocciales y solsticiales en Santa Marta. Los valores de los ángulos solares críticos producidos por los modelos corresponden a las fechas en que se presentan localmente, con su duración en días. Los valores de declinación a las 12 h y duración del día local son promedios correspondientes a los intervalos fechados abajo.

VARIABLES	EQUINOCCIALES		SOLSTICIALES	
	Primavera	Otoño	Verano	Invierno
Altitud (°) 9h	45.2	45.3	45.5	33.9
16h	30.5	30.5	31.7	21.7
Azmut (°) 9h	90.0	90.0	68.0	130.0
16h	270.0	270.0	291.0	239.0
Declinación (°)	5.7	5.8	23.21	-23.22
Duración del día (min.)	730.0	731.0	759.2	680.2
Nº del día (de - a)	(93 - 98)	(246 - 253)	(159 - 186)	(340 - 362)
Fechas días	(abril 3 - 8)	(sept. 3 -10)	(junio 8 - julio 5)	(dic.6 - 28)
Duración (días)	5	7	27	22

El modelo sinusoidal se ajusta bastante bien a los valores calculados de declinación solar. Sin importar si se trata de las 9, las 12 o las 16 h, el modelo es consistente al expresar el ángulo de declinación según el día. Su ámbito de variación anual es de 46.9° debido a la inclinación del eje terrestre con respecto a su órbita y al movimiento de traslación del globo. El ajuste al modelo de los datos calculados de duración del día también mostró un coeficiente de determinación alto y un error estándar de ajuste bajo (Tabla 5).

Dada su órbita elíptica, para finales y comienzos del año la Tierra se encuentra en su perihelio o menor distancia del sol y seis meses después, en junio, se encuentra en afelio o a la mayor distancia del sol. Aproximadamente para junio 22 (día 173), cerca de 10 días antes de alcanzar el afelio (Bowditch, 1977), la parte norte del eje terrestre se encuentra inclinada hacia el sol. El hemisferio norte tiene su verano, con días mas largos, cálidos y noches cortas; efecto notorio aún en la parte tropical del hemisferio, como en Santa Marta (12 h 40 min.), donde la declinación aumenta hasta alcanzar 23.21° al norte del ecuador celeste. En el solsticio de verano, el azimut del sol a las 9 h locales es mínimo (68°) al NE; mientras el azimut de las 16 h es máximo (291°) al NO. Sin embargo, en Santa Marta esta condición se prolonga con “sol detenido” durante 27 días, de junio 8 a julio 5 (Tabla 6).

Tres meses después, en septiembre 22 (día 265), la tierra se ha desplazado un cuarto de su paso alrededor del sol, pero su eje de rotación todavía apunta hacia la misma dirección en el espacio. Se asume que en esta fecha equinoccial el sol se levanta justo por el este (azimut: 90°) y se pone por el punto oeste (azimut: 270°). Debe brillar igual en ambos hemisferios, pero esto no ocurre estrictamente debido a la refracción, semidiámetro del sol y altura del sitio de observación; aparentemente dura más encima que debajo del horizonte (Bowditch, 1977) y la duración del día y la noche es casi la misma (11 h 59 min para el día en Santa Marta). El hemisferio norte tiene su equinoccio de otoño, pero en Santa Marta a $11^\circ 15'N$, el azimut para esta fecha a las 9 h es ya de 100° al sur del este al amanecer y a las 16 h de 264° , al sur del oeste al tardecer. Debido a su latitud ($11^\circ 15'N$), las condiciones de azimut de 90° a las 9 h y 270° a las 16 h se cumplen en Santa Marta con 18 días de anticipación a la fecha establecida, para el día 247 (septiembre 4) cuando el sol aparentemente comienza a dirigirse hacia el sur. Dichas condiciones duran no uno, sino siete días (septiembre 3 al 10) aproximadamente, cuando el valor promedio de la declinación es de 5.8° (Tabla 6).

En diciembre 22 (día 355) el sol se ha retirado gradualmente hacia el sur, es el solsticio de diciembre o de invierno del hemisferio norte, la parte sur del eje terrestre apunta hacia el sol, la Tierra se encuentra a la mínima distancia del sol, en perihelio y se asume como el día más corto del año. En Santa Marta las condiciones solsticiales son de azimut solar máximo a las 9 h (130°) al sur del este y, mínimo a las 16 h (239°) al sur del oeste, de diciembre 6 hasta el 28. La declinación promedio entonces es también mínima (-23.22°) al sur del ecuador celeste, así como la duración del día (11 h 20 min.) y estas condiciones duran 22 días, cinco días menos que en el solsticio de verano.

Transcurridos unos tres meses, en el equinoccio vernal o de primavera en marzo 21 (día 80), el sol se encuentra directamente sobre el ecuador celeste,



cruzando del hemisferio sur al norte, su declinación es 0° , por lo que se asume que se mantiene en el cielo la mitad del tiempo (720 min. ó 12 h). El azimut calculado para la fecha secular del equinoccio (día 80) en Santa Marta es de 100° a las 9h y de 264° a las 16 h, presentándose localmente los rumbos equinocciales de 90° y 270° durante cinco días, de 93 (abril 3) al 98 (abril 8), respectivamente, o sea con 13 a 18 días de retraso con la fecha tradicional del equinoccio del 21 de marzo. Sin embargo, localmente para estas fechas el valor de la declinación es de 5.7° (Tabla 6) y no de 0° . Las discrepancias tienen las mismas razones antes mencionadas.

De acuerdo con la segunda ley de Kepler, la Tierra se traslada más rápidamente cuando está más cerca del sol (perihelio), por lo que en el hemisferio norte el invierno es más corto que el verano, con una diferencia de unos siete días (Bowditch, 1977). Sin embargo, no es la cercanía del sol la responsable de efectos como la temperatura, sino la altitud del sol en el cielo y el tiempo que se mantiene por encima del horizonte; por ello se producen retardos entre estaciones o las condiciones pueden prolongarse, como se nota en el trópico. En general, las condiciones de menor altitud del sol y la declinación sur que adopta a partir del equinoccio de otoño local (septiembre 3-10) hacen que los días sean más cortos, que las noches; pero desde el equinoccio de primavera (abril 3-8) la situación cambia y con más tiempo de luz los días se hacen más largos.

Por estas consideraciones, se supone que independientemente de las fechas críticas aceptadas para el hemisferio norte, en el trópico las condiciones de posición relativa del sol pueden diferir incluso en duración; razón por la cual se estima más apropiado referirse a condiciones equinocciales y condiciones solsticiales, en vez de las mismas fechas de equinoccios y solsticios, teniendo en cuenta que en la latitud de Santa Marta pueden durar varios días y que para los seres vivos tropicales la duración del tiempo de cambio puede ser tanto o más importante que la variación misma.

Esto es de tener en cuenta especialmente si se piensa en relaciones entre los cambios relativos al sol y los referentes al clima local. Astronómicamente las estaciones comienzan en los equinoccios y en los solsticios; pero meteorológicamente difieren de un sitio al otro, por lo que no se puede generalizar, además en los trópicos no hay estaciones. Las características de las condiciones astronómicas para Santa Marta se resumen en la Tabla 6. Como criterio para definir los eventos se usaron los valores angulares calculados por los modelos para las posiciones equinocciales y solsticiales del sol, relativas a Santa Marta, las fechas locales correspondientes y el tiempo en días en que se mantuvieron con mínima variación.

Como se observa, la duración de los períodos de transición equinoccial y solsticial es diferente. De cinco días para el equinoccio de primavera local, pero

de 27 para la condición de solsticio de verano, de modo que la temporada de días largos, con el sol hacia el norte y a mayor altitud, se prolonga en el año, más que la condición opuesta del solsticio de invierno. Ésta parece transcurrir más rápidamente: sólo 22 días (Tabla 6). Estas diferencias en duración estarían de acuerdo con lo enunciado en la segunda ley de Kepler, como se dijo arriba, al aumentar un poco la velocidad de traslación de la Tierra en perihelio para diciembre.

En la Figura 5, se ilustra esquemáticamente la situación con un sitio de observación sometido a los cambios tropicales de ángulos solares pero referidos a un entorno montañoso y costero, como la región de Santa Marta, en el cual la sombra proyectada por un obstáculo topográfico contribuye a disminuir la luz disponible en el día y esto es válido sobre o bajo el mar. Es así como, por ejemplo, por efecto combinado de la segunda ley de Kepler, la mayor altitud solar y la duración del día, las comunidades que se localizan en el lado norte y noroeste de la montaña tendrán probablemente más abundancia de luz solar en todo el año, que las situadas al sur, para las que ‘anochece’ más temprano por la sombra proyectada por el promontorio, cuando el sol se encuentre hacia el norte de marzo a septiembre. Sin embargo, en un balance de la cantidad real de luz disponible hay que tener en cuenta otros aspectos importantes, como son el albedo, la refracción de la luz y la nubosidad, no tratados aquí.

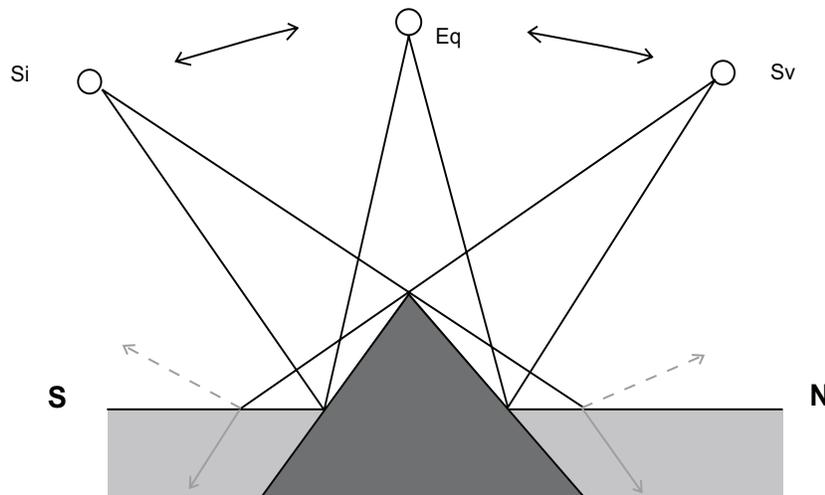


Figura 5. En un terreno quebrado, como en la región de Santa Marta, se presenta un mínimo de tres escenarios marcados por los solsticios de verano (Sv) con el sol aparentemente hacia el norte y luego en el de invierno (Si), con el sol aparentemente hacia el sur. La distribución de la luz solar diaria puede ser mayor en uno u otro lado de un promontorio típico, según su posición relativa. En los equinoccios (Eq) la localización perpendicular del sol distribuye equitativamente la luz solar a ambos lados (norte y sur). Para el medio acuático hay que considerar los aspectos de reflexión y refracción de la luz.

Por otra parte, la distribución y el establecimiento de comunidades vegetales terrestres o marinas (Santas *et al.*, 1998), incluso coralinas localizadas, puede estar determinado, al menos en parte, por el ángulo de azimut que les facilite mayor disponibilidad de luz solar durante el año, según las condiciones topográficas presentes. La distribución espacial de las comunidades coralinas de las bahías del Parque Nacional Natural Tayrona, que, aunque dan hacia el norte, están rodeadas de cerros, pudiera, por ejemplo, tener relación con una mayor o menor disponibilidad de luz solar durante el año. Así, las comunidades, como praderas de fanerógamas y corales, situadas al sur, sureste y suroeste de las bahías, dispondrían relativamente de más cantidad de luz durante el año, que las situadas al norte, noreste y noroeste.

En la Sierra Nevada de Santa Marta, como en los cerros locales, la arquitectura vegetal (Valladares y Percy, 2000) y los mismos ensamblajes de especies de plantas pueden ser afectados según su tolerancia o necesidad de luz solar (Chambers y Kalff, 1978). No se descarta que las especies vegetales y animales locales tengan su distribución y sus ciclos vitales vinculados a cambios en la disponibilidad de luz solar y que determinen el inicio o el final de procesos biológicos. De todos modos, a mayor radiación se espera mayor productividad incluso en sistemas tropicales donde se considera que la luz solar no es limitante (Monteith, 1972).

La localización y orientación de estanques de cultivo de especies acuáticas pudiera considerar la conveniencia de una disposición tal que le provea más o menos intensidad de luz solar para sus propósitos. La productividad primaria en aguas de los estanques se vería afectada (Santas *et al.*, 1998; Jamu *et al.*, 1999), lo mismo que la disolución del oxígeno, que disminuye con mayor temperatura y con mayor radiación solar disponible. Sin embargo, por su acción bactericida (Acra *et al.*, 1989), suficiente luz solar puede ser una ventaja, disminuyendo el riesgo de zoonosis en los estanques.

Los arquitectos e ingenieros pueden utilizar esta información de los ángulos solares para el diseño de sus estructuras locales, orientándolas de manera que se evite demasiada radiación solar sobre la construcción y con ello un mayor consumo de energía por concepto de aire acondicionado. El lado norte de las construcciones locales recibe relativamente mayor iluminación solar que el lado sur durante todo el año. Aparentemente estos detalles si fueron tenidos en cuenta por constructores españoles siglos atrás, como se deduce de la orientación de las ciudades y calles que trazaron, buscando una distribución de luz solar y viento que favoreciera las condiciones de vida de los habitantes.

Reichel-Dolmatoff (1977) describe la construcción por los indígenas Kogui de la Sierra Nevada de templos orientados para recibir dentro los rayos del sol en fechas críticas correspondientes con las condiciones locales de equinoccios

y solsticios y que les indicaban acciones relacionadas con su vida cotidiana, como sembrar o recolectar. Aparentemente eran tradiciones heredadas de pueblos anteriores, como los Tayrona, pero que fueron relegadas por los conceptos europeos establecidos secularmente.

No hay registros locales de observaciones astronómicas y ante la compleja situación que plantea el cambio climático global (Maskell *et al.*, 1993), los ángulos solares son puntos de referencia confiables por su estabilidad para entender mejor las alteraciones, si las hubiera. Por ello, también pueden funcionar como variables independientes contra las que se refieran o comparen otros factores medibles o estimados dentro de un contexto anual de variación local o bien asociada con cambios a mayor escala, como los que afectan la salud humana y la de los ecosistemas naturales mencionados por Haines *et al.* (1993). Es indiscutible la importancia de la radiación solar en los cambios del clima terrestre y sobre la variabilidad climática global (El Niño), el conocimiento de sus variaciones permitirá enfrentarlos mejor. En tiempos de la producción de energía limpia, la luz solar es una opción para las áreas tropicales donde abunda; sin embargo, la adecuada orientación de los colectores solares teniendo en cuenta los ángulos solares en la latitud de Santa Marta y su variación anual, aumentará sin duda la eficiencia de su producción de energía eléctrica o de otro tipo.

CONCLUSIONES

Los datos observados del azimut solar en Santa Marta no se diferencian significativamente de los calculados para los 365 días del año. Tanto la altitud y la declinación solares, como la duración del día calculadas presentan una variación anual acorde con el cambio diario del azimut a las 9 h y 16 h locales. Los modelos sinusoidales en función del número del día en un año de 365 días, describen bastante bien los cambios y permiten su predicción. En la mayoría de los casos será suficiente con tener el valor del ángulo, sin decimales, por lo que los resultados pueden redondearse.

Si bien en áreas de topografía plana estas variaciones pudieran no tener mucha importancia en lo que respecta a la luz solar disponible o su ángulo de incidencia durante el año, la topografía montañosa o quebrada puede actuar como limitante de tal disponibilidad en alguna época del año, de acuerdo con su localización al norte o al sur del promontorio y con respecto al sol. Las fechas establecidas secularmente para los cambios de estaciones en el hemisferio norte, no cambian mucho. Pero lo que si cambia en Santa Marta son las condiciones astronómicas y de radiación



locales asociadas generalmente con esas variaciones, que es lo que más importa a las comunidades vivas.

Debido a la latitud y longitud diferente de Santa Marta, con respecto al paso aparente del sol, las fechas de solsticios y equinoccios establecidos para la zona templada del hemisferio norte, no corresponden estrictamente con las condiciones astronómicas observadas localmente, ni con la duración misma de dichos eventos. Razón por la cual se describen las condiciones solsticiales (junio/julio y diciembre) y equinociales (abril y septiembre) correspondientes a lo observado en Santa Marta, en vez de equinoccios y solsticios de un día de duración.

A causa de la capacidad calórica de la atmósfera y del océano, es de esperar que no haya una correspondencia precisa entre los ciclos astronómicos y meteorológicos, apreciándose como desfasados; pero sirven de referencia para analizar aspectos del cambio climático, como las temperaturas anuales en el trópico. La radiación solar incidente está íntimamente asociada con el cambio global y el conocimiento de sus relaciones nos permite una mejor comprensión y preparación ante el cambio y sus manifestaciones locales y regionales. Sería deseable que estos aspectos fueran relacionados con la distribución y con los ciclos de vida de las especies vegetales y animales de la región, así como con los cambios observados en sus poblaciones y comunidades, para determinar las implicaciones biológicas reales de estas variaciones.

Los diseños arquitectónicos, de ingeniería civil y urbana pueden aprovechar esta información para reducir gastos de energía y mejorar las condiciones de vida de los habitantes de ciudades y edificios de la región. Invariablemente el lado norte de un edificio recibirá más radiación solar por unidad de tiempo que el lado sur, que será más fresco la mayor parte del año.

El aprovechamiento de la energía solar con colectores se favorece contando con la variación de los ángulos solares, lo que permitiría su mejor disposición y una mayor eficiencia en su producción. Extraña que aspectos como éstos, considerados claves por los antiguos indígenas Tayrona y por los Kogui actuales (Reichel-Dolmatoff, 1977), para su adecuada relación con el medio, hayan caído en el olvido sin conocerlos, pero presumiéndolos como de poca importancia.

AGRADECIMIENTOS

Al INVEMAR, en cabeza de su exdirector Dr. Hernando Sánchez Moreno, que facilitó los materiales, la ubicación y la seguridad para las mediciones. A los Ingenieros Emperatriz Zapata y Eira R. Madera, quienes colaboraron en el

procesamiento de los datos. A la Universidad del Magdalena por facilitar computador e impresiones para los análisis. Al Dr. C. Gronbeck, de Seattle Energy Works (EE UU) por el suministro de su programa Sun Position 1.0. Al Sr. Juan C. Narváez, por su colaboración con la elaboración de los gráficos. Al editor anónimo que con su cuestionamiento enriqueció el artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acra, A., Jurdi, M., Mu'alleem, H., Karahagopian, Y. y Z. Raffoul. 1989. Water disinfection by solar radiation. Assessment and Application. IDRC Techn. Stud., (66e): 1-19.
- Bowditch, N. 1977. American practical navigator I (9). Defense Mapping Agency, Hydrographical Center, Washington. 1386 p.
- Calkins, J. y T. Thordardottir. 1980. The ecological significance of solar UV radiation on aquatic organisms. *Nature*, (283): 563-566.
- Chambers, P. y J. Kalf. 1987. Light and nutrients in the control of aquatic plant community structure. I. In situ experiments. *J. Ecol.*, 75: 611-619.
- Fowler, J. 1989. Reed's Nautical Almanac. 58th Year of Publication. Thomas Reed Pub. Ltd. Surrey, Sections 2-6. 542 p.
- Gronbeck, C. 1995. Sun Position 1.0. Software Development. Seattle Energy Works. 800K.
- Haines, A., Epstein, P. R. y A. J. McMichael. 1993. Global health watch: monitoring impacts of environmental change. *Health and climate change. Lancet*, 342: 1464-1469.
- Jamu, D. M., Z. Lu y R. H. Piedrahita. 1999. Relationship between Secchi disk visibility and chlorophyll a in aquaculture ponds. *Aquaculture*, 170: 205-214.
- Marcolin, N. 2008. Na terra como no céu: Calendario e datas religiosas cristãs são calculados com base na astronomia. *Rev. Pesq. FAPESP*, 143: 8-9.
- Maskell, K., Mintzer, I. y B. A. Callander. 1993. Basic science of climate change. *Health and climate change. Lancet*, 342: 1027-1031.
- Monteith, J. 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.*, 9 (3): 747-766.
- Pisias, N. G. y J. Imbrie. 1987. Orbital geometry, CO₂, and Pleistocene climate. *Oceanus*, 29 (4): 43-49.
- Reichel-Dolmatoff, G. 1977. Templos Kogui: introducción al simbolismo y a la astronomía del espacio sagrado. *Rev. Col. Antropol.*, 19: 199-245.
- Santas, R., P. Santas, C. Lianou y A. Korda. 1998. Community responses to UV radiation. II effects of solar UVB on field grown diatom assemblages of the Caribbean. *Mar. Biol.*, 131: 163-171.
- Valladares, F. y R. W. Pearcy. 2000. The role of crown architecture for light harvesting and carbon gain in extreme light environments assessed with a structurally realistic 3-D model. *An. Jardín Botánico Madrid*, 58 (1): 3-16.

FECHA DE RECEPCIÓN: 16/09/08

FECHA DE ACEPTACIÓN: 14/04/09

