

REGISTRO DE UN ESPEJISMO SUPERIOR EN LA BAHÍA DE TODOS SANTOS, B.C., MÉXICO, BAJO LA CONDICIÓN DE VIENTOS SANTA ANA

Rafael Hernández-Walls¹, Rubén Castro¹, René Pinet-Placencia¹,
Eduardo Gil-Silva², Raúl Yepiz¹

¹Facultad de Ciencias Marinas, ²Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Universidad Autónoma de Baja California.
Apartado Postal 453, CP 22800, Ensenada, Baja California, México.

RESUMEN

Se documenta la presencia de un espejismo superior en la Bahía de Todos Santos, Baja California, registrado el 18 de noviembre de 2005. Se emplean las observaciones de dos estaciones meteorológicas ubicadas en la bahía, así como los resultados del modelo atmosférico MM5, para ilustrar cómo la superposición de la parcela de aire cálida y de poca humedad transportada por los vientos Santa Ana, sobre la parcela de aire frío y húmedo que caracteriza a la capa marina de la región, propiciaron la formación de una inversión térmica con un gradiente vertical muy bien formado, que a su vez permitió el avistamiento del espejismo superior en la bahía. Las inversiones térmicas y el avistamiento de espejismos ocurren con frecuencia en la zona costera de esta región durante el otoño y el invierno, sin embargo el avistamiento de estos espejismos ha sido escasamente documentado. El espejismo del 18 de noviembre se ilustra con un par de fotografías de la Isla de Todos Santos tomadas bajo condiciones atmosféricas de inversión térmica y bajo condiciones normales, respectivamente.

Palabras clave: vientos Santa Ana, inversión térmica, espejismo superior

ABSTRACT

The presence of a superior mirage is documented in the Todos Santos Bay, Baja California, which was recorded on November 18, 2005. The observations of two meteorological stations located in the bay, and the results of the MM5 atmospheric model are used to illustrate how the parcel of warm air and low humidity transported by Santa Ana winds is overlapped on the cool air parcel, characterizes moist marine layer of the region, led to the formation of an inversion with a vertical gradient very well defined, which in turn allowed the a superior mirage sighting in the bay. Temperature inversions and formation of mirages occur frequently in the coastal area of this region during the fall and winter, but the sighting of these mirages has been poorly documented. The mirage of November 18 is illustrated with a couple of pictures of the island of Todos Santos made under temperature inversion conditions and under normal conditions, respectively.

Key words: Santa Ana winds, thermal inversion, superior mirage.

INTRODUCCIÓN

Los espejismos no son mitos, son fenómenos naturales fascinantes que ocurren en muchos lugares bajo condiciones atmosféricas propicias (Jain y Rothe, 2005). Los espejismos superiores en particular, se manifiestan como la imagen invertida de un objeto que aparece por arriba de la posición real del objeto. En general, los espejismos se definen como fenómenos de óptica atmosférica causados por la refracción de la luz o curvatura del rayo de luz al pasar por una región atmosférica con un pronunciado gradiente térmico. El gradiente térmico se presenta al superponerse una parcela de aire cálida y seca sobre una parcela de aire fría y húmeda, dando lugar a dos capas estratificadas por temperatura y, consecuentemente, por densidad. Siendo la densidad del aire el factor principal que determina la refracción de la luz (Bruton, 1996). Se sabe que el índice de refracción de la luz en la atmósfera decrece cuando se incrementa la temperatura. En la atmósfera baja, en condiciones normales, la temperatura decrece con la altura porque la atmósfera se calienta por contacto con el suelo, sin embargo, en condiciones anómalas o de “inversión térmica”, la temperatura aumenta con la altura, y es cuando se dan las condiciones apropiadas para la generación de espejismos superiores (Bruton, 1996). De hecho, la presencia de espejismos superiores proporciona información sobre la estructura vertical de la temperatura del aire (Lehn, 1983).

Los espejismos superiores se presentan en muchos lugares del mundo, pero la mayor parte ellos se han documentado en latitudes altas, donde hay hielo. Por ejemplo, las condiciones para espejismos superiores son particularmente favorables en Finlandia, en primavera, cuando se funde el hielo sobre la superficie del mar. En estas condiciones, el aire cálido que se posa sobre la superficie del mar se enfría rápidamente, produciendo pronunciados gradientes térmicos que a su vez originan imágenes de espejismos superiores (<http://mintaka.sdsu.edu/GF/mirages/mirintro.html>).

En este trabajo se documenta la presencia de un espejismo superior en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México, que se presentó bajo la condición de un evento Santa Ana en la región. Se muestran fotografías de la isla de Todos Santos antes y durante el espejismo superior, así como el comportamiento de las variables atmosféricas para respaldar la hipótesis de que este tipo de espejismos se presentan en la región cuando hay una yuxtaposición entre una parcela de aire cálida típica de un evento Santa Ana débil, y una parcela de aire marino frío, fenómeno que da origen a condiciones atmosféricas estables o de inversión térmica necesarias para crear espejismos superiores.

Condición Santa Ana

En la región oceánica frente a California y Baja California, los vientos fluyen aproximadamente paralelos la costa (del noroeste al sureste) la mayor parte del año, debido a la presencia del Centro de Alta Presión semipermanente del Pacífico Norte (Strub y Allen, 1987; Pérez-Brunius et al., 2007; Castro y Martínez, 2010). Sin embargo, durante la época de otoño-invierno, ocurren eventos de unos cuantos días denominados “vientos Santa Ana” que fluyen de tierra a mar, principalmente del noreste hacia el suroeste. Los vientos Santa Ana se originan por el incremento de la presión atmosférica en la región llamada como la “Gran Cuenca” entre la Sierra Nevada y las Montañas Rocallosas. Este incremento de la presión, genera una circulación anticiclónica, lo que propicia vientos hacia el oeste-suroeste, de tierra a mar, forzados a descender de la “Gran Cuenca”, pasar por las montañas y cañones (Sommers, 1978; Rapahel, 2003; Westerling et al., 2004). El aire forzado a elevarse (o a descender) por la presencia de una montaña (Figura 1), se enfría (calienta) adiabáticamente, es decir, sin pérdida de calor, debido a que su ascenso (descenso) es relativamente rápido. En un diagrama Presión-Temperatura, la parcela de aire sigue una línea adiabática (Figura 2; caso

1). Al llegar al nivel de condensación, la parcela de aire pierde humedad y continúa elevándose, pero ahora se enfría mediante un proceso pseudo-adiabático (Figura 2; caso 2), hasta llegar al punto más alto de la montaña. Al descender del otro lado de la montaña, la parcela de aire aumentará su temperatura adiabáticamente, sin ganancia de calor (Figura 2; caso 3), y por consiguiente, al llegar a nivel del mar, esta parcela de aire se comprime adiabáticamente y se calienta, terminando con una temperatura mayor y menor humedad que la que tenía originalmente del otro lado de la montaña, ocasionando la sensación típica de una condición Santa Ana —aire caliente y seco en la región costera de California y Baja California— (Svejkovsky, 1985; Trasviña et al., 2003; Castro et al., 2006).

La intensidad de los vientos Santa Ana puede variar en la región costera dependiendo de la intensidad del Centro de Alta Presión atmosférica en la región continental y de la distribución de la baja presión atmosférica en la zona oceánica (Hughes y Hall, 2009). Por ejemplo, durante el evento Santa Ana que ocurrió del 10 al 12 de febrero del 2002 (Castro et al., 2006), los

vientos superficiales provenientes del noreste que alcanzaron la Bahía de Todos Santos, Baja California, tuvieron una humedad relativa por debajo del 10%, temperatura de $\sim 27^{\circ}\text{C}$, y velocidades de ~ 21 m/s. En contraste, durante el evento Santa Ana, del 15 al 16 de noviembre del 2002, la intensidad del viento fue muy débil (~ 4.5 m/s), incluso poco notable comparado con la variabilidad diurna del viento, pero la disminución de la humedad relativa ($\sim 20\%$) y el incremento de la temperatura ($\sim 27^{\circ}\text{C}$) se manifestaron con cambios notables respecto a la temperatura y humedad de los días anteriores (Castro et al., 2006).

Una parcela de aire transportada desde la zona continental hacia la región costera y oceánica, como ocurre durante los eventos Santa Ana, puede desplazar mar adentro la capa de aire marino. En algunas ocasiones, el efecto de los vientos Santa Ana se ha detectado hasta a cientos de kilómetros mar adentro, aunque en otras, solo alcanza la región costera (Svejkovsky, 1985; Castro et al., 2003, 2006), como ocurrió durante el evento Santa Ana que nos ocupa, del 18 de noviembre del 2005.

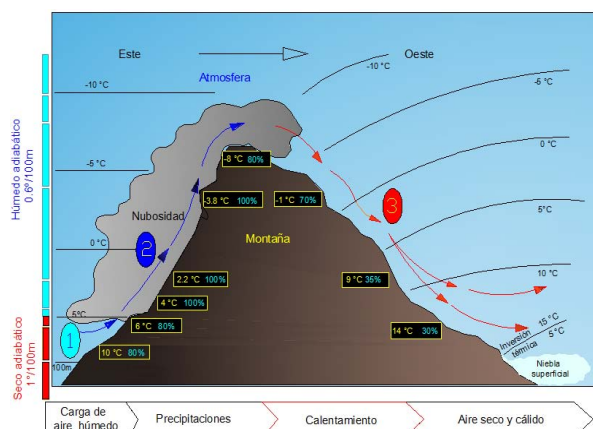


Figura 1. Esquema representativo del proceso por el cual la parcela de aire transportada por un viento Santa Ana llega caliente y con poca humedad a la región costera. La zona costera está del lado derecho de la montaña y la parte continental del lado izquierdo. Modificada de Coperías (2001).

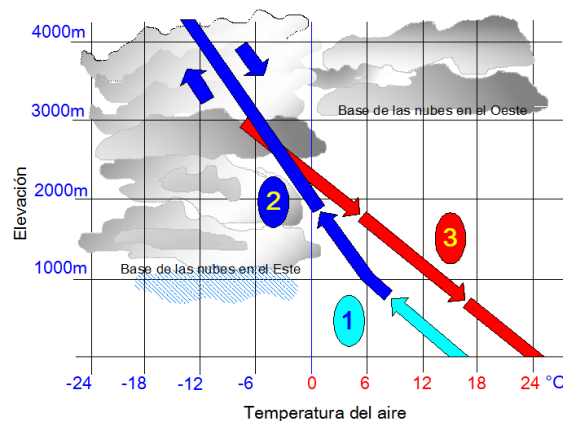


Figura 2. Los puntos 1, 2 y 3 representan los casos para condiciones adiabáticas, pseudo-adiabáticas y adiabáticas respectivamente (modificado de <http://www.lsze.ch/index.php?page=439>).

El evento Santa Ana del 18 de noviembre del 2005.

Finley y M. Raphael (2007), mostraron una imagen de escala sinóptica de la presión atmosférica al nivel del mar el 15 de noviembre de 2005. En la imagen se observan las características de una baja presión atmosférica fuera de la costa frente a la parte central y sur de California, así como un anticiclón ubicado en la zona de la “Gran Cuenca”. Este patrón de isóbaras indica la presencia de una condición Santa Ana en la región.

En particular, en la Bahía de Todos Santos (Figura 3), los registros de temperatura y humedad en dos estaciones meteorológicas (Figura 4), una en la costa (El Sauzal) y otra en la Isla Todos Santos (ITS), indicaron que la temperatura aumentó, de 15°C (12.5 °C) en promedio (2-14 de noviembre) en el Sauzal (ITS), hasta ~25°C el 16 de noviembre y rebasó los 28°C el 18 de noviembre. En tanto, las fluctuaciones de humedad fueron muy marcadas con una tendencia a disminuir; de ~80% de humedad promedio (2-14 de noviembre), las fluctuaciones en la humedad relativa alcanzaron valores menores al 20% los días 15-16 y 18-19 de noviembre. En ambas estaciones meteorológicas se observa en general la variabilidad diurna de la temperatura asociada al calentamiento solar, aunque se puede apreciar una diferencia debido al efecto oceánico en la isla, con un mayor el rango de variación en la estación costera de El Sauzal debido al efecto continental. Es importante mencionar que el patrón de vientos del 18 de noviembre (no mostrado), no presentó el patrón típico de viento intenso de la condición Santa Ana. Entre el 15 y el 22 de noviembre, el viento alcanzó una velocidad máxima 5 m/s y un promedio de 2.3 m/s. Sin embargo, aún en condiciones de viento débil, la humedad relativa es una variable que tiene una respuesta muy sensible a la condición Santa Ana en la región (Castro et al., 2006). Este hecho indica que en este periodo se presentaron condiciones débiles de la condición Santa Ana. Bajo estas condiciones de viento Santa Ana, el flujo de aire no es suficiente para desplazar por completo a la capa marina.

La parcela de aire cálido y seco se posa por encima de la capa marina de aire frío y húmedo típica de la región (Lewis et al., 2004), lo que permite que al menos por tiempos relativamente cortos (horas), se origine una inversión térmica entre esas dos capas de aire, es decir, aire frío en la parte de abajo y aire caliente en la capa de arriba, propiciando a su vez las condiciones

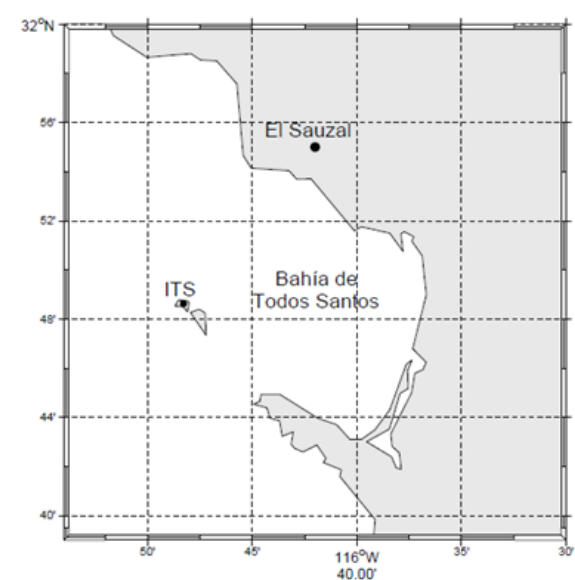


Figura 3. Localización de la Bahía Todos Santos, Baja California, México. Se indica la localización de las estaciones meteorológicas: (ITS) Isla de Todos Santos y El Sauzal

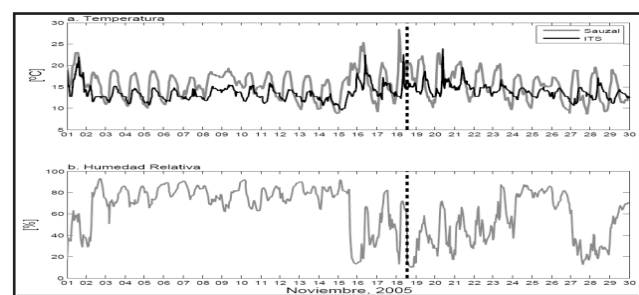


Figura 4. Registros de temperatura del aire (a) y humedad relativa (b) en las estaciones meteorológicas de la Isla de Todos Santos (negro) y El Sauzal (gris) durante el mes de noviembre del 2005

atmosféricas idóneas para el avistamiento de espejismos del tipo superior en la Bahía de Todos Santos, Baja California. La frecuencia de eventos Santa Ana en la Bahía de Todos Santos ha sido de hasta 50 días al año y se identifica con facilidad en los registros de humedad relativa del aire donde la humedad disminuye abruptamente de 90% hasta 10% durante el otoño y el invierno (ver e. g., Ortiz, 2009).

Con la finalidad de ilustrar la distribución de la temperatura en una columna de aire en la Bahía Todos Santos durante la condición Santa Ana del 18 de noviembre, se utilizó el modelo atmosférico MM5 (versión 5), con sus opciones estándar —que aparecen en el listado TERRAIN del programa distribuido por UCAR (<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/>)— usando una malla con luz de 16.28 km y un anidamiento de mallas que incluyó a la bahía y a la ciudad y de Ensenada B. C., con luz de 5.43 km. La topografía fue tomada del banco de datos de USGS (ver, e. g., [http://rockyweb.](http://rockyweb.cr.usgs.gov/outreach/terraserwer.html)

[cr.usgs.gov/outreach/terraserwer.html](http://rockyweb.cr.usgs.gov/outreach/terraserwer.html)), con resolución de 18.5 Km. Las condiciones iniciales y los datos de frontera aérea fueron tomados de los datos de re-análisis de NCEP/NCAR con una resolución de 2.5 grados. En los resultados del modelo (Figura 5), se muestra la evolución temporal de la distribución vertical de temperatura para el día 18 de noviembre del 2005, donde se puede apreciar, entre las 12:00 y las 15:00 horas, la presencia de una inversión térmica muy bien desarrollada. La inversión térmica solo se observa por debajo de los 900 mbar (figura 5), lo cual sugiere una inversión térmica del tipo de capa marina baja. Por arriba de este nivel desaparece la inversión térmica y la temperatura disminuye con la altura.

Estos resultados respaldan la hipótesis de que un evento Santa Ana débil puede generar condiciones atmosféricas de inversión térmica que a su vez generan las condiciones propicias para avistar espejismos superiores en la bahía, como el que se ilustra en la Figura 6a.

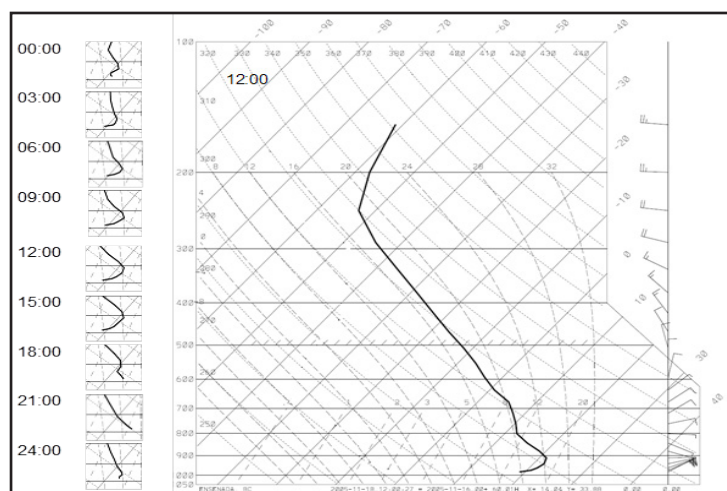


Figura 5. Evolución temporal del perfil de temperatura durante el 18 de noviembre del 2005 resultante del modelo MM5. En la parte derecha se presenta el perfil vertical de la temperatura del aire para las 12:00 horas. Los recuadros a la izquierda indican la evolución temporal del perfil de temperatura (solo de la parte de 800 a 1000 mb) para el día 18 de noviembre, en intervalos de tres horas, donde se aprecia la formación de la inversión térmica debido a la presencia de aire frío de la región y el aire caliente transportado por el viento Santa Ana.

En la Figura 6a se muestra una fotografía de la Isla de Todos Santos bajo condiciones de un espejismo superior, y en la Figura 6b se muestra la fotografía de la Isla de Todos Santos bajo condiciones normales. Estas fotografías fueron tomadas desde la costa de la Bahía de Todos Santos, en dirección perpendicular al flanco noreste de la isla. El tiempo de exposición en ambas fotografías es de 1/180 s, velocidad ISO de ISO-64 y una lente focal de 5 mm. La imagen de la Figura 6a se tomó después del mediodía del 18 de noviembre del 2005 a las 13:40 horas, en la posición 31.862° N, 116.669° W, y la imagen en la Figura 6b se tomó en la misma posición bajo condiciones atmosféricas de un día normal y despejado, es decir, sin condición de viento Santa Ana. En el espejismo superior (Figura 6a), la isla aparece amplificada, deformada en la vertical, y la línea de la base de la isla que en condiciones normales es muy difícil de observar, se observa en lo que aparentemente es la parte superior de la isla. Esto se debe a que el espejismo superior se manifiesta como una imagen invertida del objeto. En la misma figura se aprecia de manera difusa el límite entre las dos parcelas de aire a tres tantos de la altura de la isla.



Figura 6. Fotografías de la Isla de Todos Santos, B.C., México. 6a) Fotografía tomada durante el avistamiento del espejismo superior durante el 18 de noviembre de 2005, bajo la condición Santa Ana. 6b) Fotografía tomada en condiciones atmosféricas normales.

CONCLUSIONES

El 18 de noviembre del 2005 se avistó un espejismo superior en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México, a consecuencia de la presencia de un viento Santa Ana débil en la región costera que propició las condiciones atmosféricas para la generación de una inversión térmica con un gradiente alto tanto en temperatura como en humedad, condiciones que permitieron un alto contraste del índice de refracción de la luz entre las dos parcelas de aire, necesaria para la creación de espejismos superiores. Aunque el avistamiento de espejismos superiores en la Bahía de Todos Santos ha sido poco documentado, es posible que se presente frecuentemente durante la época de otoño-invierno en condiciones de viento Santa Ana débil. El avistamiento de espejismos superiores en la bahía, la explicación científica de su génesis, y la divulgación apropiada de este fenómeno natural, constituyen uno más de los atractivos turísticos de la región.

AGRADECIMIENTOS

A la UABC por su apoyo bajo los proyectos de convocatoria interna (325,352) y a la SEP-CONACYT (proyectos: SEP-2004-CO1-47285/3231; 2005-01-51712). Agradecemos al IIO-UABC, al DOF-CICESE y a Servicios Portuarios SA de CV, por los datos proporcionados de las estaciones meteorológicas en el Sauzal y en la Isla de Todos Santos. Se agradece al Dr. Modesto Ortiz y a la Dra. Tereza Cavazos por sus acertados comentarios a este documento.

REFERENCIAS

- Bruton, D. 1996. Optical determination of atmospheric temperature profiles. PhD. Thesis, Texas A&M University, 98 pp.
- Castro, R., A. Parés-Sierra, S.G. Marinone. 2003. Evolution and extension of the Santa Ana winds of February 2002 over the ocean, off California and the Baja California Peninsula. *Ciencias Marinas* 29(3): 275-281.
- Castro, R., A. Mascarenhas, Á. Martínez-Díaz-De-León, R. Durazo y E. Gil-Silva. 2006. Spatial influence and oceanic thermal response to Santa Ana events along the Baja California Peninsula. *Atmósfera* 19(3):195-211.
- Castro R. y JA Martínez (2010). Variabilidad espacial y temporal del campo de viento frente a la península de Baja California. Libro: *Dinámica del Ecosistema Pelágico frente a Baja California, 1997-2007: Diez Años de Investigaciones Mexicanas de la Corriente de California*. Durazo R. y Gaxiola, G. (Eds.). Instituto Nacional de Ecología (INE) Centro de Investigación Científica y de Educación Superior (CICESE), México. ISBN: 978-607-7908-30-2.
- Coperias, E. M. 2001. Psicometeorología. *Revista Muy Interesante*, 18(8):18-28
- Finley, J. and M. Raphael. 2007. The relationship between El Niño and the duration and frequency of the Santa Ana winds of Southern California. *The Professional Geographer*, 59(2):184-192.
- Hughes M., Hall A. 2009. Local and synoptic mechanisms causing Southern California's Santa Ana winds. *Climate Dynamics*. DOI 10.1007/s00382-009-0650-4. 2009.
- Jain, P.J. and E.W. Rothe. 2005. Superior mirage effect in supercritical CO₂: experiment and model. *J. of Supercritical fluids*, 35:260-264.
- Lehn, W. 1983. Inversion of superior mirage data to compute temperature profiles. *J. Opt. Soc. Am.* 73(12):1622-1625.
- Lewis J. M., Kora D, Redmon K. T. 2004. Sea Fog Research in the United Kingdom and United States. A Historical Essay including Outlook. *Bulletin of American Meteorological Society*. DOI: 10.1175/BAMS-85-3-395
- Ortiz-Figueroa Modesto, 2009. "Condición Santa Ana"... no todo es viento seco, Alergias e incendios forestales. *GEOS*, Vol. 9, No 2, pp 250-251.
- Pérez-Brunius P, López M, Parés-Sierra A, Pineda J. 2007. Comparison of upwelling indices off Baja California derived from three different wind data sources. *Calif. Coop. Oceanic Fish. Invest. Rep.* 48: 204-214.
- Raphael, M.N. 2003. The Santa Ana winds of California. *Earth Interactions*, 7:1-13.
- Singh, R.N., S.S. Negi, A.K. Sahay, A. Singh, K.O.G. Varughese and A.K. Walia. 1994. Mirage formation in the thermal region. *Applied Optics*, 33(15):3279-3280.
- Sommers, W.T. 1978. LFM forecast variables related to Santa Ana wind occurrences. *Monthly Weather Rev.*, 106: 1307-1316.
- Strub PT, Allen JS, Huyer A, Smith RL, Beardsley RC. 1987. Seasonal Cycles of Currents, Temperatures, Winds, and Sea Level Over the Northeast Pacific Continental Shelf: 35°N to 48°N. *J. Geophysical Res.* 92(C2): 1507-1526.

Svejkovsky, J., 1985. Santa Ana airflow observed from wildfire smoke patterns in satellite imagery. *Monthly Weather Review*, 113, 902-906.

Transviña, A., M. Ortiz-Figueroa. Herrera, M.A. Cosío y E. González. 2003. 'Santa Ana' winds and upwelling filaments off Northern Baja California. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 37:113-129.

Westerling A.L., Cayan D.R., Brown T.J., Hall B.L. and Laurence G.R., 2004. Climate, Santa Ana Winds and Autumn Wildfires in Southern California. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 85(31).

Manuscrito recibido: 26 de julio, 2011

Recepción del manuscrito corregido: 12 de octubre, 2011

Manuscrito aceptado: 13 de diciembre, 2011