

Evidencias de la penetración de brisas de mar en la depresión del río Unare y Llanos de Anzoátegui

Evidences of penetration of sea breezes in the Unare river depression and Anzoátegui Llanos, Venezuela

Sergio Foghin-Pillin

sfoghin@hotmail.com

**Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
Instituto Pedagógico de Caracas, Venezuela**

“The answer is blowin’ in the wind...” Bob Dylan

Artículo recibido en septiembre de 2015 y publicado en enero de 2016

RESUMEN

Los factores astronómicos y geográficos determinan condiciones meteorológicas a mesoescala y producen variaciones de los regímenes diarios del viento, independientes de la circulación primaria. Los sistemas de brisas entre las superficies acuáticas y las tierras contiguas, son flujos gravitacionales producidos por tales condiciones. Estos sistemas presentan componentes como los frentes de brisa de mar y estructuras ondulatorias identificables en las imágenes satelitales. En el territorio venezolano dichos sistemas han sido escasamente estudiados, aunque revisten notable importancia geográfica y ecológica. En este trabajo, con base en imágenes satelitales, se aportan evidencias de la penetración de las brisas de mar en la depresión del río Unare y los Llanos del estado Anzoátegui. Se propone la creación de una red de estaciones meteorológicas automáticas, para investigar las características de dicho sistema meteorológico mesoescalar y su influencia sobre el clima regional.

Palabras clave: *Meteorología; brisas de mar; estado Anzoátegui; Venezuela*

ABSTRACT

Astronomical and geographical factors determine weather mesoscale systems and produce variations of the regional daily pattern of the wind,

independent of the primary circulation. Land and sea breeze systems are gravitational flows produced by such conditions. Some of the components of the sea breeze system are the sea breeze fronts, the sea breeze gravity currents and the undular bores. In Venezuelan territory these regional systems have been poorly studied, although they are of remarkable geographic and ecological importance. This paper, based on satellite images, bring evidence of penetration of sea breezes in the depression of the Unare river and the plains of Anzoátegui State. The creation of a network of automatic weather stations is proposed, in order to investigate the characteristics of the mesoscale meteorological systems and its influence on regional climate.

Keywords: *Meteorology; sea breezes; Anzoátegui state; Venezuela*

INTRODUCCIÓN

El movimiento aparente diario del sol, conjuntamente con la orientación del relieve y la naturaleza de la superficie terrestre, determinan gradientes de temperatura y de presión atmosférica a mesoescala, los cuales afectan la capa límite, condicionando su estratificación térmica, los flujos de energía, la fricción superficial y la advección local. De esta manera se producen variaciones regionales de los regímenes diarios del viento, independientes de las componentes zonales propias de la circulación atmosférica primaria. (Garratt, 1994; Oke, 1981). En la zona intertropical, los sistemas meteorológicos a mesoescala suelen afectar áreas mucho más extensas que en las latitudes medias y pueden constituir factores climatológicos de primer orden (Hastenrath, 1995).

Los sistemas de brisas que se establecen entre el mar, lagos o ríos, y las tierras adyacentes, son flujos gravitacionales producidos por tales variaciones (Simpson, 1994). Según los modelos teóricos, estas circulaciones periódicas de ciclo diario presuponen la activación de la brisa de mar al producirse el calentamiento de la tierra tras la salida del sol y establecerse un gradiente bórico horizontal dirigido desde las superficies acuáticas —de menores temperaturas— hacia tierra. Durante la noche, al mantenerse las superficies acuáticas más calientes, el gradiente se invierte y sopla la bri-

sa de tierra. Las perturbaciones a escala sinóptica impiden el desarrollo de gradientes béricos regionales y por tanto limitan la formación de los sistemas de brisas (Arrit, 1993; Riehl, 1979; Simpson, 1994). En algunas regiones, los vientos de la circulación primaria, como los alisios, pueden interactuar con las circulaciones locales y originar situaciones meteorológicas particulares (Leopold, 1949; Foghin-Pillin, 2014).

Algunos de estos sistemas, como las brisas de mar-tierra y estructuras nubosas asociadas, pueden intervenir en la dispersión de semillas, esporas y polen, así como de plagas de insectos y de agentes patógenos, además de que pueden actuar como agentes de difusión y transporte de contaminantes atmosféricos, tanto gaseosos como particulados. Al mismo tiempo, las brisas de mar pueden constituir un importante factor modificador de los rangos diarios de temperatura y de humedad relativa (Miller, *et. al.*, 2003; Simpson, 1994), a la vez que influir en el desarrollo de nubes convectivas y en la generación de precipitaciones (Leopold, 1949; Azorín-Molina, *et. al.* 2009).

En el territorio venezolano dichos sistemas regionales han sido escasamente estudiados (Foghin-Pillin, 2002; Foghin-Pillin, 2014), aunque Agustín Codazzi ya había señalado que “a corta distancia de las tierras calma de noche la brisa de mar y es reemplazada por el viento terral” (1941, p. 55) y, más de un siglo después, Pablo Vila observara: “como es propio de toda costa, por lo general en las zonas litorales y prelitorales venezolanas alternan diariamente vientos de mar y de tierra, más o menos sensibles según las épocas del año” (1960, p. 176).

Como contribución al conocimiento de dichas circulaciones locales, en este trabajo se describe la penetración de las brisas de mar y de algunas estructuras nubosas derivadas, en la depresión del río Unare y los Llanos del estado Anzoátegui. El estudio se presenta a título preliminar, basado exclusivamente en la interpretación de imágenes satelitales. La carencia de registros climatológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa), tanto de superficie como de altura, en el área, constituye una limitante para la investigación.

Delimitación del área de estudio y generalidades fisiográficas

El área de estudio queda delimitada, aproximadamente, por los paralelos 10° y 08° de latitud septentrional y los meridianos 64° y 66° de longitud occidental. De norte a sur, la región abarca la franja litoral del estado Anzoátegui, sobre el golfo de Barcelona (ver gráfico 1), la depresión del río Unare (ver gráfico 2), los Llanos de Macopai-Mapire y los Llanos de Zuata¹, hasta las riberas del Orinoco, sobre cuyo curso el gran meandro de Las Bonitas (07°55'N – 65°40'W) constituye una conspicua referencia. En el sentido longitudinal los límites son más imprecisos, aunque hacia el este del área el borde occidental de la región de las Mesas, definido por la cota de 250 metros, con una orientación general NNE – SSW, constituye un rasgo geomorfológico que determina límites bastante definidos para el sistema meteorológico en cuestión, como puede observarse recurrentemente en las imágenes satelitales. Hacia el oeste, en cambio, la mayor regularidad del relieve de los Llanos centrales, permite el libre avance de las brisas y fenómenos relacionados, cuya penetración ocasionalmente ha podido observarse hasta los Llanos occidentales.

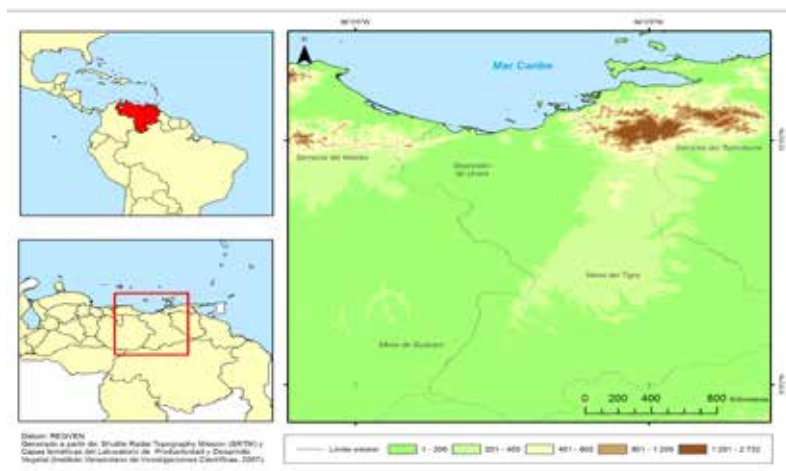


Gráfico 1. Localización relativa del área de estudio

1. Se adopta la grafía Zuata usada en el Mapa Vial de Venezuela (MOP, 1970) y otros documentos cartográficos oficiales, aunque M. A. Vila (1976, p. 250), señala que la grafía más antigua es Suata.



Gráfico 2. Camino de penetración agrícola en la parte septentrional de la depresión del río Unare, estado Anzoátegui, entre Píritu y Onoto. Las nubes en primer plano son cúmulos de buen tiempo (Cumulus humilis)(Vista W-E. Foto SFP).

En toda su extensión, el área se encuentra comprendida en el piso térmico tropical, bajo un régimen pluviométrico controlado por la dinámica anual de la convergencia intertropical, con marcada estacionalidad (Aw_i) exceptuando la franja costera (BS_{hi}) y con montos medios anuales de lluvia que aumentan considerablemente de norte a sur, desde unos 600 - 700 mm hasta unos 1.500 - 1.600 mm. Los vientos dominantes en el área son los alisios, con direcciones variables entre el ENE y ESE, según la época del año. (Golbrunner, 1984). La región es drenada por el sistema hidrográfico Ipire-Unare hacia el mar Caribe y por los ríos Espino, Aracay-Iguana, Claro, Zuata y Mapire, hacia el Orinoco. En la región predominan los aluviones cuaternarios y las rocas sedimentarias pleistocenas de la Formación Mesa.

MÉTODO

En el presente trabajo, con base en imágenes satelitales (GOES-E) se describe un sistema meteorológico mesoescalar caracterizado por la activación de la brisa de mar y su penetración desde las costas del estado Anzoátegui hasta las riberas del río Orinoco. Al avanzar en su ciclo diario, dicho sistema genera ciertas estructuras nubosas ondulatorias, conocidas como *undular bore* (Miller, *et. al*, 2003; Simpson, 1994). Las imágenes se descargan diariamente de las páginas electrónicas (*web-site*) de la NASA (<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/>). La resolución de la mayor parte de las imágenes usadas para la descripción del referido sistema es de un kilómetro (1 km), aunque también se utilizan fotografías con resolución de 4 kilómetros, para visiones más amplias del territorio nacional. Algunas imágenes se amplían por medio de las herramientas que ofrecen los visores disponibles en el sistema operativo *Windows*. El análisis de dichos materiales se hace visualmente, aplicando las técnicas básicas para diferenciar los distintos tipos de nubes (Kidder y Vonder Haar, 1995). Las interpretaciones se fundamentan en los modelos teóricos de los citados sistemas meteorológicos a mesoescala (Miller, *et. al*, 2003; Riehl, 1979; Simpson, 1994). Sobre las imágenes satelitales, las mediciones lineales se efectúan a partir de las coordenadas geográficas, por medio de la herramienta Plug-in Java-SE-7. Hay que resaltar la ausencia de registros anemométricos² en el área de estudio, con la excepción de la estación meteorológica sinóptica de Barcelona (10°07'N – 64°41'W- 7m/nm).

Las observaciones basadas en las imágenes satelitales se iniciaron en 2005. Los materiales se descargan sistemáticamente y se archivan en carpetas diarias, mensuales y finalmente anuales. Las carpetas diarias contienen básicamente imágenes satelitales en los espectros visible (VS), infrarrojo (IR) y vapor de agua (WV), así como mapas sinópticos de superficie y de altura, además de información complementaria como

2. La estación meteorológica sinóptica de Valle de la Pascua (09°13'N – 66°01'W – 125 m/nm) se encuentra localizada hacia el límite occidental del área en estudio por lo que sus datos podrían ser de gran utilidad. Sin embargo, el irregular funcionamiento de la estación no permite disponer de registros adecuados para este tipo de investigaciones.

pronósticos y reportes de precipitaciones (INAMEH), mapas de anomalías térmicas de las superficies oceánicas, etc. La información almacenada en una carpeta diaria suma entre 15 a 20 MB.

Caracterización del ciclo nuboso diario bajo situación anticiclónica

Como se apuntó anteriormente, la ausencia de perturbaciones atmosféricas a escala sinóptica, tales como vaguadas, ondas del este, depresiones y tormentas tropicales, favorece el desarrollo y la observación de los sistemas mesoescalares, como las brisas de mar-tierra y fenómenos asociados. En el territorio venezolano, el desplazamiento de la zona de convergencia intertropical hacia el sur y el emplazamiento de la situación anticiclónica en altura sobre la depresión central llanera y la cordillera costera, frecuente en los meses de sol bajo (diciembre - marzo), generan condiciones propicias para la formación de las brisas de mar y su penetración tierra adentro, particularmente a través de la depresión del río Unare.

En la extensa región de Los Llanos, durante un día típico de la temporada de sequía, bajo influencia de la situación anticiclónica en altura, tras la salida del sol y por los efectos del progresivo aumento de la irradiación, un campo de nubes formado por cúmulos de buen tiempo (*Cumulus humilis*) y estratocúmulos (sc), va extendiéndose de este a oeste³, cubriendo primero las tierras deltaicas y progresivamente los Llanos orientales, la depresión de Unare, los Llanos centrales y los Llanos occidentales (ver gráfico 3). Hacia el mediodía, el campo de nubes a través de toda la depresión llanera se observa más “abierto” y los cúmulos tienden a alinearse en el sentido de la dirección viento en superficie o se ajustan a las líneas de corriente de las topografías de 850 o de 700 milibares (a unos 1.500 metros y 3.000 metros de altitud, respectivamente), según la altura alcanzada por el tope de las nubes, generalmente limitado por la base de la in-

3. La extensa cobertura cumuliforme muestra, sin embargo, conspicuas áreas totalmente descubiertas, en ajustada correspondencia con los grandes espejos de agua del embalse de Guri y del bajo Caroní, así como a lo largo del curso bajo del Orinoco, pudiéndose distinguir, con frecuencia, también las superficies despejadas de los embalses de Camatagua y Calabozo, además del Lago de Valencia (Gráfico 3).

versión de subsidencia, conocida como inversión de los alisios (Nieuwolt, 1982; Riehl, 1979).

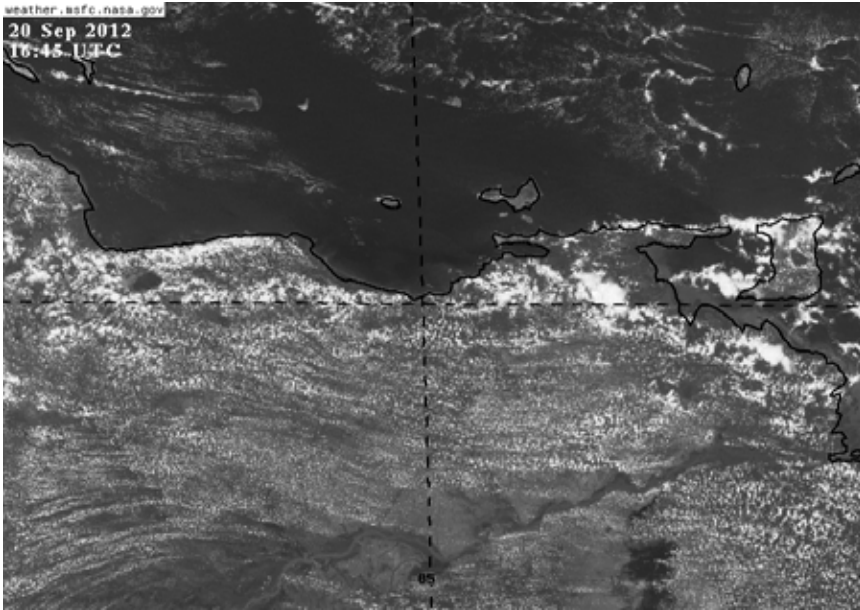


Gráfico 3. Imagen satelital VS con resolución de 1 km, del día 20/09/2012 a las 16:45 UTC. Se aprecia el extenso campo de cúmulos de buen tiempo sobre los Llanos orientales y centrales. Las alineaciones de cúmulos reflejan el flujo de los vientos primarios en la baja troposfera. (Fuente: NASA)

Al avanzar el día, como consecuencia de la intensa subsidencia y de la acusada disminución de la humedad relativa, la cual en superficie puede alcanzar valores inferiores a 40% a primera hora de la tarde, como ha podido comprobarse con instrumental portátil, las nubes se disipan rápidamente y sólo se mantienen formaciones de estratos y estratocúmulos adosadas a las vertientes altas y a las cumbres de los diferentes tramos y ramales de la cordillera de la Costa.

A lo largo del extenso litoral de los estados Anzoátegui y Miranda, el proceso diario de disipación del campo de cúmulos de buen tiempo presenta un patrón particular. Pasado el mediodía, al establecerse la brisa

de mar procedente del golfo de Barcelona (Foghin-Pillin, 2002; González, Foghin-Pillin y Reyes, 1998), a lo largo del borde costero comienza a formarse una franja completamente libre de nubes (ver gráfico 4).

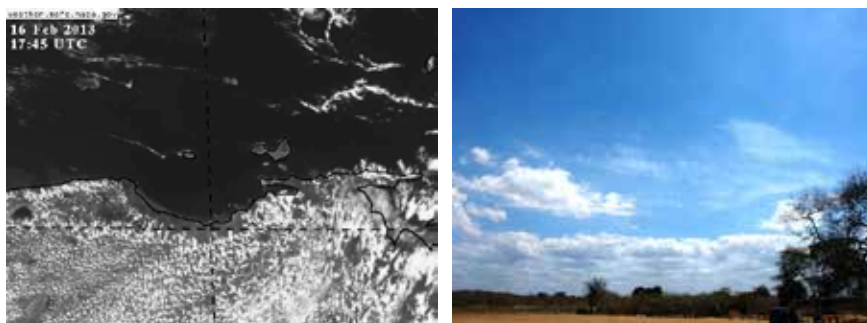


Gráfico 4. Imagen satelital VS con resolución de 1 km (izquierda), del día 16/02/2013 a las 17:45 UTC. Se observa la incipiente franja despejada de nubosidad, paralela a las costas de los estados Anzoátegui y Miranda, evidencia de la activación de la brisa de mar. (Fuente: NASA) A la derecha, aspecto del campo de cúmulos de buen tiempo, en retroceso hacia el sur ante la penetración de la brisa de mar. (Vista N-S desde Taquecito, estado Anzoátegui, a 09°57'N – 65°03'W. Foto: SFP)

Avanzando la tarde, por efecto de la penetración de la cuña de aire marino, de menor temperatura (corriente gravitacional), dicha franja despejada se va ampliando progresivamente hacia el interior de la depresión del río Unare, a través de la cual comienza a formarse el frente de brisa de mar, visible como un extenso cordón de cúmulos de poco desarrollo vertical (*Cumulus mediocris*) que bordea el campo de nubes. Posteriormente, el cordón queda aislado de la circulación principal y forma un arco muy amplio, el cual suele alcanzar la fase de mayor desarrollo cerca de la hora de puesta del sol, observándosele entonces destacadamente, en medio de la llanura despejada, desde las estribaciones occidentales del macizo de Bergantín-Turimiquire hasta el piedemonte de la serranía del Interior (ver gráfico 5).

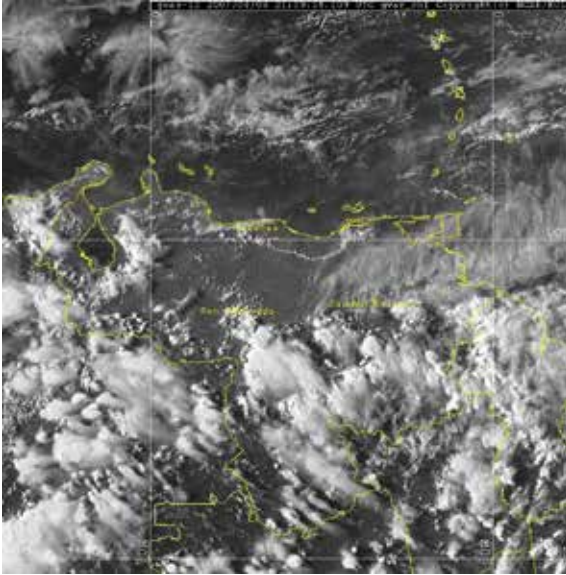


Gráfico 5. Imagen del satélite meteorológico GOES-E VS, correspondiente al día 04 de abril de 2007, a las 21:08 UTC. A través de la depresión del río Unare se distingue el cordón nuboso asociado al sistema de brisas de mar. (Fuente: National Center for Atmospheric Research).

En el gráfico 5, el cual abarca la totalidad del territorio venezolano, se distinguen la nubosidad producida por situaciones a escala sinóptica, como los extensos núcleos convectivos asociados a la actividad de la convergencia intertropical, sobre los estados Amazonas y Bolívar; las nubes medias-altas (as/ac/cs), de tono grisáceo y en forma de banda, sobre los estados Anzoátegui, Monagas y Delta Amacuro, prolongándose hacia el Atlántico, originadas por sistemas de vientos en la troposfera media y alta, además del cordón de cúmulos de poco desarrollo asociado al sistema mesoescalar de las brisas de mar, visible a través de la depresión del río Unare, al sur del paralelo 10° N, desde las estribaciones occidentales del macizo de Bergantín-Turimiquire hasta el piedemonte de la serranía del Interior. Nótese el área completamente despejada de nubes entre la línea de la costa y el cordón nuboso, que representa el límite frontal de la corriente gravitacional en avance.

Entre las características distintivas, cabe también destacar la conservación del paralelismo del cordón nuboso respecto del borde litoral, aun cuando el frente del sistema ha penetrado tierra adentro por decenas de kilómetros, en concordancia con los modelos teóricos (Simpson, 1994). En el área comprendida en este estudio se han observado desplazamientos de más de 200 kilómetros en dirección meridional, como se verá en el siguiente punto. Este cuerpo nuboso ondulatorio, ya separado del flujo principal de la brisa de mar, se designa en inglés con el nombre de *undular bore* y responde a la dinámica del fenómeno conocido como salto hidráulico (Clarke, 1972). A nivel mundial, su ejemplo más conocido es la formación nubosa denominada *morning glory*, llamativo meteoro frecuente en el golfo de Carpentaria, al norte de Australia (Goler y Reader, 2003).

En trabajos de campo, al atravesar el mencionado cordón de nubes por la carretera que va de Barcelona a Anaco, se han reportado precipitaciones vespertinas de carácter ligero (comunicación personal con Orlando González, febrero de 2010). No obstante, ocasionalmente las imágenes satelitales muestran, a lo largo del frente de brisa de mar, la formación de nubes convectivas que podrían producir precipitaciones de mayor intensidad. Queda claro, en todo caso, que la dinámica de este sistema puede generar el impulso ascendente inicial del aire, indispensable para el posterior desarrollo de nubes convectivas, como se aprecia en algunos de los casos documentados (ver gráfico 6).

El sistema de brisa de mar del día 19 de marzo de 2008: descripción de un caso representativo

El caso que se describe en este punto ha sido seleccionado entre centenares de situaciones archivadas, por considerarse uno de los más característicos y por las circunstancias –no siempre óptimas para la recopilación del material– que en esa fecha permitieron descargar suficiente documentación para respaldar la descripción de la evolución diaria del sistema de brisa de mar y su penetración a través de la depresión del río Unare y de los Llanos de Anzoátegui, hasta alcanzar las riberas del río Orinoco.

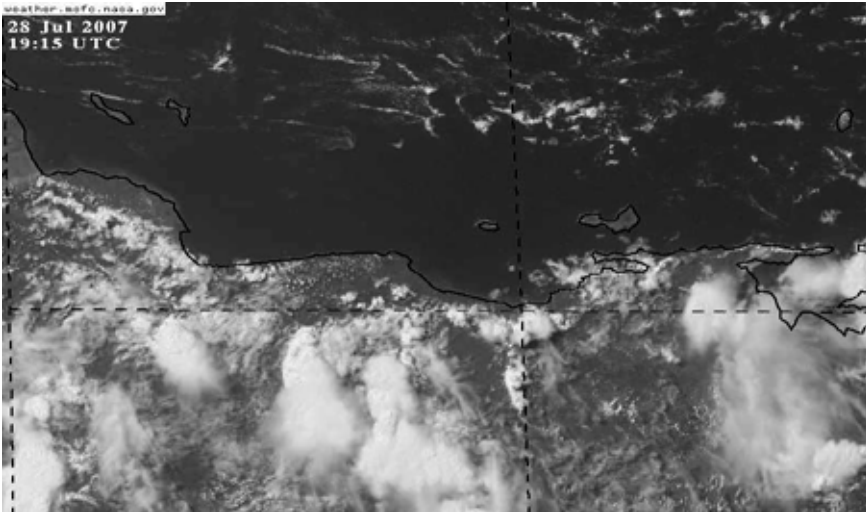


Gráfico 6. Imagen satelital VS con resolución de 1 km, del día 28/06/2007 a las 19:15 UTC. Sobre la depresión del Unare, a lo largo del frente de brisas de mar se observan nubes convectivas en evolución. Nótese la franja despejada de nubosidad paralela a las costas de los estados Anzoátegui y Miranda, por efecto de la brisa de mar. (Las líneas segmentadas representan el paralelo 10°N y el meridiano 65°W. Fuente: NASA)

Para la época, la estación seca (verano) estaba completamente establecida en toda la región de los Llanos. El diagrama termodinámico de la estación de Maracay-Boca de Río (ver gráfico 7) muestra varias capas de inversión térmica, inducidas por el proceso de subsidencia bajo la situación anticiclónica dominante, la cual se observa en las cartas de altura (mapas de isotacas) de 850 hPa y 500 hPa (ver gráfico 8) correspondientes a las 12 UTC⁴, condiciones termodinámicas que pueden definirse como de estabilidad absoluta y, consecuentemente, ausencia de sistemas convectivos profundos.

Esta secuencia de imágenes GOES-E se inicia con la correspondiente a las 16:15 UTC (ver gráfico 9), en espectro visible, en la cual puede verse la cobertura de cúmulos de buen tiempo a través de toda la región de los Llanos orientales y centrales. Dos horas más tarde (ver gráfico 9) se

4. La Hora Legal Venezolana: HLV = UTC – 4:30.

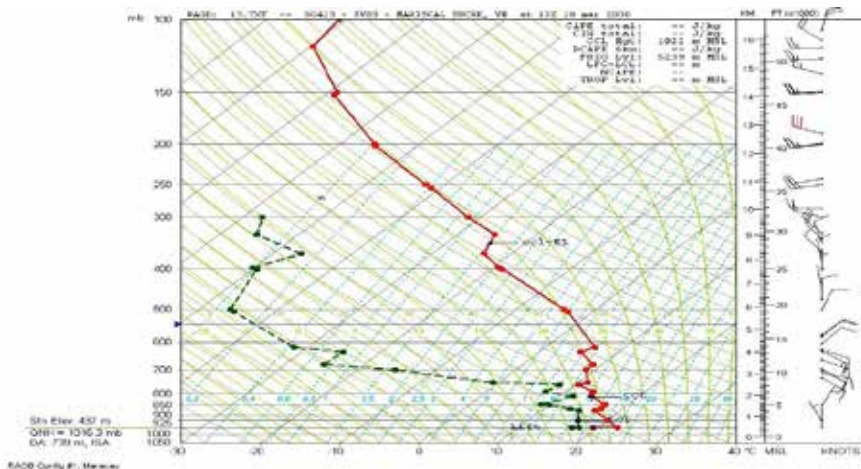


Gráfico 7. Diagrama termodinámico de la estación Maracay-Boca de Río (estado Aragua), del día 19/03/2008, a las 12 UTC. Los registros del radiosondeo indican condiciones de estabilidad atmosférica. (Fuente: Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana).

observa la expansión del área despejada de nubosidad, situada hacia el norte de la depresión del Unare, por efecto de la brisa de mar.

Los núcleos cumuliformes adosados al borde occidental de la región de las Mesas comienzan a mostrar mayor desarrollo, lo que sugiere la acción de un moderado ascenso orográfico (*efecto stau*), producido por la interacción de la brisa de mar con el zócalo de los Llanos altos orientales. A esta hora, el frente de costa, aún no bien estructurado, presenta su vértice en las coordenadas 09,60°N - 65°20'W, a una distancia aproximada de 53 km de la línea de costa. Media hora más tarde dicho vértice se había desplazado a los 09,48°N - 65,30'W y se encontraba a unos 69 km del borde costero, registrándose una penetración de 16 km en 30 minutos. La franja de núcleos cumuliformes que se observa hacia el este de la depresión del Unare, refleja la orientación NE - SW del borde de las Mesas, al igual que en los gráficos 9 y 10.

Seguidamente, en la imagen de las 19:45 UTC (ver gráfico 10) puede apreciarse, ya más expandida, el área libre de nubosidad y el vértice del frente de brisas de mar, localizado a 09,38°N - 65,30'W, distante unos

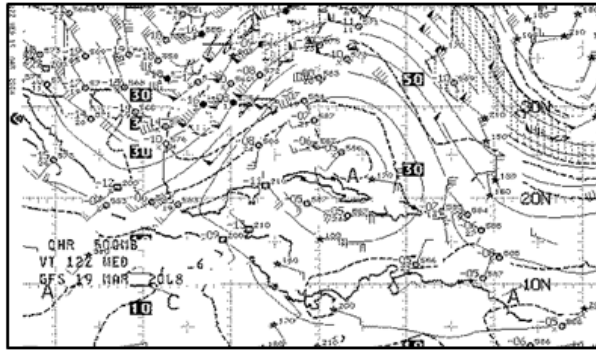
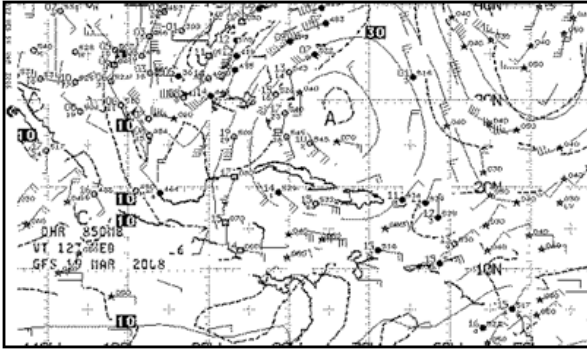


Gráfico 8. Mapa de isotacas de 850 hPa (izquierda) y de 500 hPa, del día 19/03/2008, a las 12 UTC. En ambas cartas destaca el vórtice anticiclónico situado al NW del territorio venezolano, sobre el Atlántico tropical. (Fuente: NOAA).

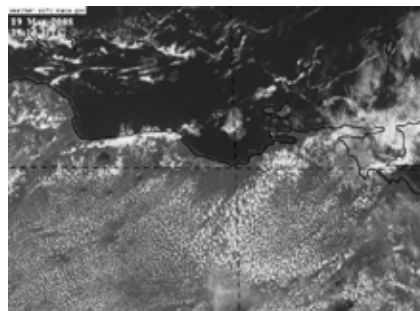
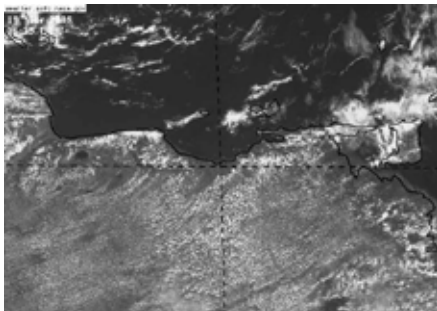


Gráfico 9. Imágenes satelitales del día 19/03/2008, a las 16:15 UTC (izquierda) y 18:15 UTC. Se observa el amplio campo de cúmulos de buen tiempo sobre los Llanos y el área despejada de nubosidad que comienza a expandirse por la depresión del Unare, por efecto de la penetración de la brisa de mar. (Fuente: NASA).

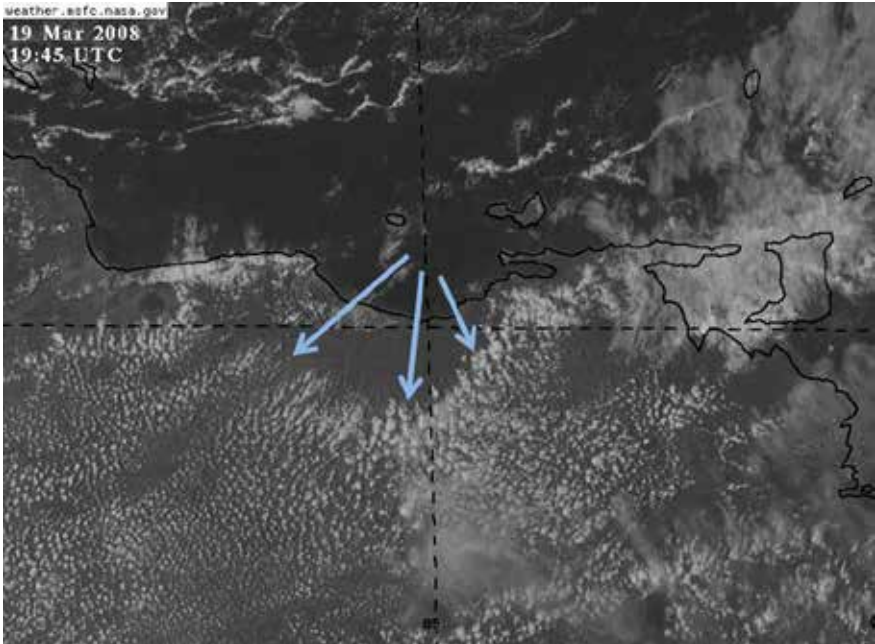


Gráfico 10. Imagen satelital (VS) del día 19/03/2008, a las 19:45 UTC. Se observa el área despejada de nubosidad, de mayor superficie respecto de las imágenes anteriores, así como el frente de brisa de mar, claramente estructurado. Las flechas divergentes representan las líneas de flujo de la corriente gravitacional (aire marino de menor temperatura). La flecha central también indica el vértice del frente. (Fuente: NASA)

80 kilómetros de la línea de costa. El frente nuboso se aprecia mejor organizado y destaca la diferente orientación de las filas de núcleos cumuliiformes, las cuales se disponen NW – SE en la rama oriental del frente, N – S en las proximidades del vértice y NE – SW en la rama occidental del frente, rasgos que reflejan la divergencia de las líneas de flujo de la brisa de mar, en correspondencia con la forma cóncava del borde costero (Simpson, 1994). Dicho flujo divergente se representa por medio de vectores sobre la imagen satelital.

A las 20:15 (ver gráfico 11) el frente de brisa de mar presenta su vértice localizado a $09,18^{\circ}\text{N} - 65,40^{\circ}\text{W}$, a una distancia de 104 km de la línea de costa, con un avance de unos 24 km en media hora. Se aprecia que la

alineación de los cúmulos que conforman el frente es similar a la descrita para la imagen anterior. El efecto *stau* que ejerce el borde de las Mesas sobre el desarrollo de los cúmulos resulta evidente por el mayor desarrollo que mantiene la rama oriental del frente nuboso. Una hora más tarde (Gráfico 11) el vértice se localiza a $08,87^{\circ}\text{N} - 65,58^{\circ}\text{W}$, a 143 km de la costa y en la siguiente imagen, reproducida tanto en espectro visible como en infrarrojo (ver gráfico 12), el vértice del frente se encuentra en $08,76^{\circ}\text{N} - 65,81^{\circ}\text{W}$ y ha penetrado 159 km desde la línea de costa.

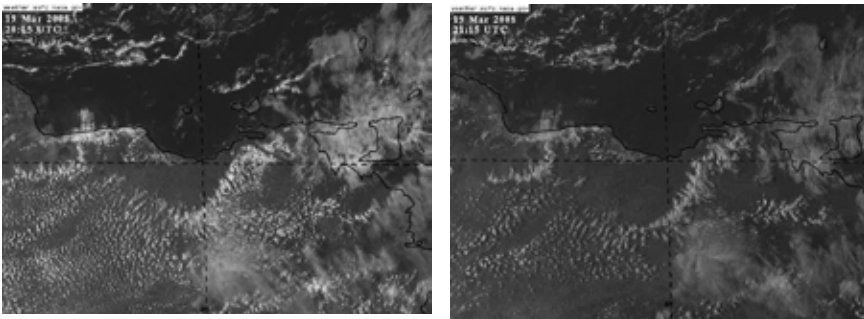


Gráfico 11. Imágenes satelitales en VS del día 19/03/2008, a las 20:15 UTC (izquierda) y 21:15 UTC. (Fuente: NASA)

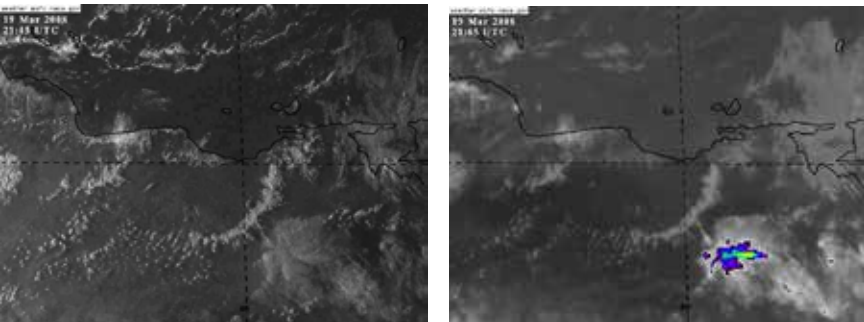


Gráfico 12. Imágenes satelitales del día 19/03/2008, a las 21:45 UTC, en VS (izquierda) e IR. (Fuente: NASA).

Más tarde, en las imágenes en infrarrojo de las 22:15 y 22:45 UTC (ver gráfico 13), se observa la rama oriental del cordón nuboso aún bien estructurada y la rama meridional extendiéndose hacia el oeste, con una disposición subparalela, cuyo borde sur, en la imagen de las 22:45, se

encuentra a 08,46°N, a unos 170 km de la línea costera. En ambas imágenes, el cuerpo nuboso (cu/sc/cu congestus) situado al sureste del arco (*undular bore*) responde a condiciones de la escala sinóptica y muestra incipiente desarrollo vertical. Hay que destacar que los elementos nubosos disgregados, observables en el extremo distal de la rama meridional, representa nubosidad en desarrollo y no en extinción, por lo cual dicha rama continúa avanzando en dirección oeste, como puede observarse en las imágenes de las 00:15 UTC y 00:45 UTC (ver gráfico14).

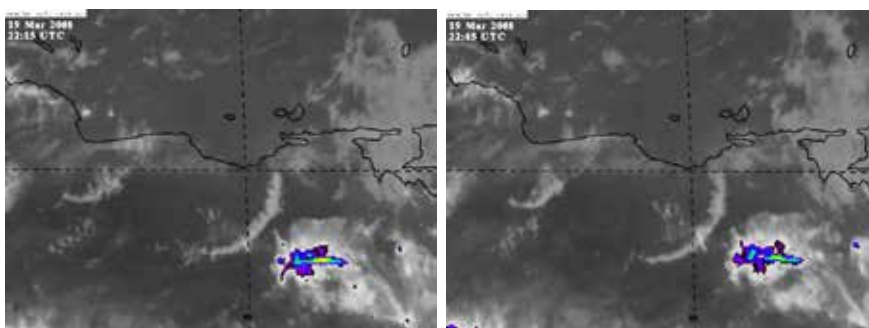


Gráfico 13. Imágenes satelitales en IR correspondientes a las horas 22:15 (izquierda) y 22:45 UTC del día 19 de marzo de 2008. Se observa en su fase avanzada el cordón nuboso asociado al sistema de brisa de mar. (Fuente: NASA).

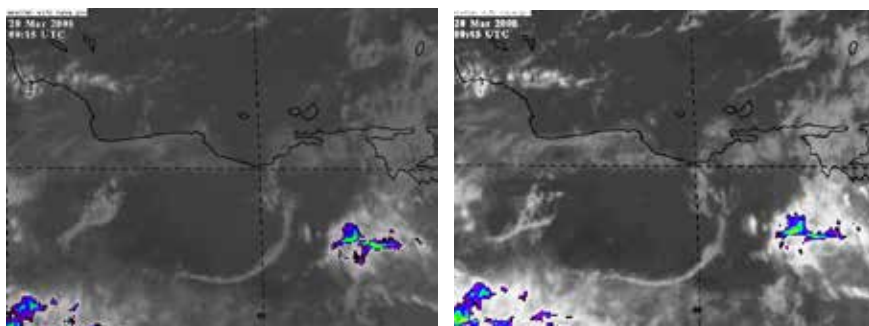


Gráfico 14. Imágenes satelitales en IR correspondientes a las horas 00:15 (izquierda) y 00:45 UTC del día 20 de marzo de 2008. Se observa el cordón nuboso asociado al sistema de brisa de mar, emplazado cerca de los límites de los estados Guárico y Apure, avanzando en su desarrollo hacia los Llanos occidentales. (Fuente: NASA)

Posteriormente, en las imágenes IR de las 00:15 UTC y 00:45 UTC (20 de marzo) se observa la rama oriental del cordón nuboso en fase de extinción, al tiempo que se aprecia cierto desplazamiento hacia la región de las Mesas. A las 00:15 UTC la base de la rama meridional (segmento rectilíneo) se encuentra a $08,15^{\circ}\text{N}$, a una distancia de 216 km de la costa. A las 00:45 UTC la base del cordón se ubica en $07,92^{\circ}\text{N}/65,81^{\circ}\text{W}$, a 230 km de la línea costera, aproximadamente, en un punto situado al oeste del meandro de Las Bonitas; es decir, la estructura *undular bore* ha alcanzado las riberas del río Orinoco.

Finalmente, en las imágenes IR de las 01:15 UTC y 01:45 UTC (20 marzo, ver gráfico 15), la rama meridional del sistema nuboso ondulatorio se aprecia bajo un velo de nubosidad alta (cirroestratos), mientras de la rama oriental subsiste sólo un corto segmento. La base de la rama meridional se encuentra a $07,88^{\circ}\text{N}/65,81^{\circ}\text{W}$, tras una penetración de unos 246 km desde la línea de costa. Este punto se localiza en las cercanías del poblado de Parmana (estado Guárico), cuyas coordenadas son $07^{\circ}50'36''\text{N}/65^{\circ}45'28''\text{W}$ (Dirección de Cartografía Nacional, 1978).

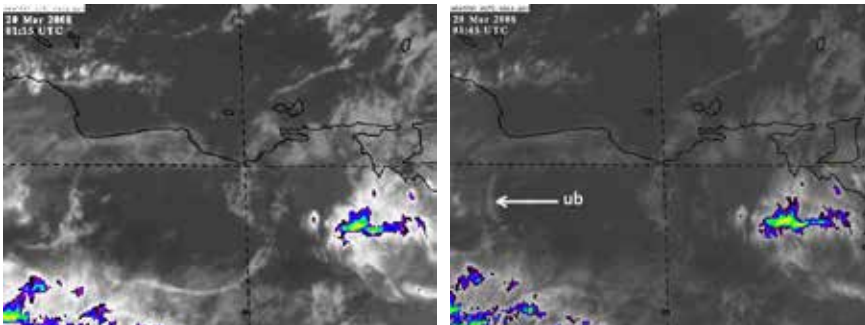


Gráfico 15. Imágenes satelitales en IR, correspondientes a las horas 01:15 UTC (izquierda) y 01:45 UTC del día 20 de marzo de 2008. Se aprecia el cordón nuboso parcialmente oculto por nubosidad alta (cs). En la imagen de las 01:15 UTC (señalado con flecha: ub), se observa un segmento del amplio arco del undular bore, el cual, bajo el efecto Coriolis, ha alcanzado los Llanos occidentales. (Fuente: NASA).

CONCLUSIONES

En el caso descrito en el punto anterior se comprobó la evolución del sistema de brisas de mar desde su inicio en la tierras prelitorales del estado Anzoátegui, pasando por la estructuración del frente y el posterior desprendimiento del cordón nuboso conocido como *undular bore*. En la etapa más avanzada de la evolución del cordón, pudo evidenciarse su avance hasta las riberas del Orinoco, a casi 250 kilómetros de las costas caribeñas y el desplazamiento de un segmento hasta los Llanos occidentales, presumiblemente por influencia del efecto de Coriolis, componente que actuaría desviando hacia la derecha las masas de aire involucradas en estos procesos atmosféricos de ciclo diario. La presencia de una capa de cirroestratos (cs) finalmente ocultó la troposfera baja e impidió continuar la observación en el caso expuesto.

Las observaciones efectuadas hasta el presente, permiten afirmar que en el ciclo diario del sistema de brisas de mar que se establece entre el golfo de Barcelona y las tierras de la depresión de Unare y Llanos orientales, intervienen no sólo factores oceanográficos y atmosféricos, sino también geomorfológicos, representados por el relieve de los Llanos altos orientales, el cual parece inducir un moderado efecto *stau*, rasgos todos estos que evidencian la considerable complejidad de estos fenómenos atmosféricos en el área de estudio.

Resulta de interés destacar que durante el lapso diciembre 2010-enero 2011, el frente de brisas de mar presentó muy baja frecuencia. La casi supresión del sistema podría haber estado asociada a las anomalías térmicas positivas registradas durante aquellos meses (ver gráfico 16) ya que en investigaciones llevadas a cabo en otras regiones del mundo (Franchito, *et. al.*, 1998) se ha demostrado la influencia de los procesos de surgencia (*up-welling*) sobre los sistemas de brisas. Las elevadas temperaturas de las aguas superficiales del Caribe meridional, evidencian que durante aquellos meses se encontraba inactiva o debilitada la surgencia que es característica a lo largo de extensos tramos de las costas venezolanas. Dichas anomalías térmicas podrían haber tenido alguna relación

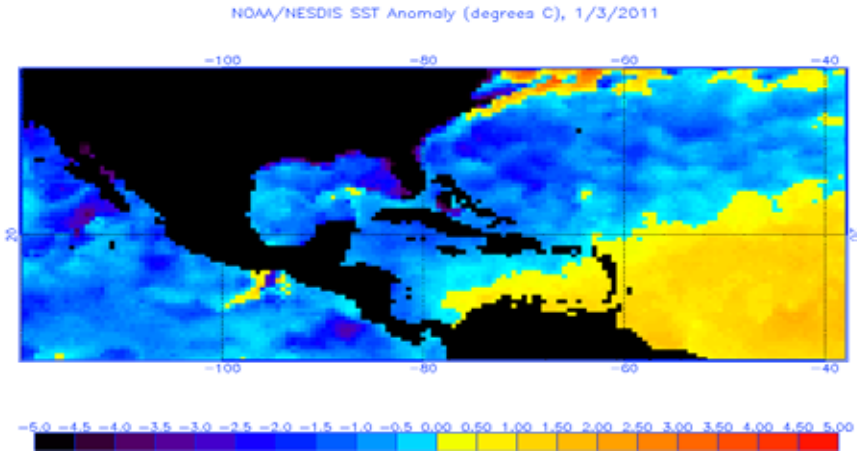


Gráfico 16. Mapa de anomalías térmicas de la superficie marina, correspondiente al día tres de enero de 2011. A lo largo de las costas venezolanas se observan temperaturas entre 1C y 1,5C mayores que la media, situación que afecta el Caribe meridional y central. (Fuente: NOAA)

con el episodio frío (ENOS-La Niña) que se encontraba activo en el Pacífico ecuatorial. En lo tocante a los aspectos oceanográficos, también podría ser de interés investigar las posibles relaciones de estos sistemas de brisas con la circulación superficial del mar en el área de la fosa de Cariaco, accidente próximo a las costas de los estados Anzoátegui y Miranda.

Por lo que se refiere a la influencia de la estratificación térmica de la baja troposfera sobre la evolución del sistema mesoescalar descrito, resulta de la mayor importancia investigar el régimen térmico diario y anual en estas capas de aire cercanas a la superficie, particularmente para conocer el comportamiento de las inversiones térmicas (Simpson, 1994), tanto de las que tienen su origen en la subsidencia bajo condiciones anticiclónicas (inversión de los alisios) como aquellas a escala regional, producidas por irradiación nocturna (inversión del suelo). A tales efectos, los instrumentos de observación más recomendables son los globos cautivos (*tethersonde*). Por lo que se refiere a las condiciones meteorológicas en superficie, sería conveniente la instalación de una red regional de estaciones meteorológicas automáticas, equipadas con sensores para registros de dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa y precipitación,

además de colectores de partículas contaminantes. Idealmente, dicha red podría estar integrada por las estaciones de Píritu, Onoto, Aragua de Barcelona, Cantaura, Valle de la Pascua, Santa María de Ipire, Pariaguán y Parmana (ver gráfico 17).



Gráfico 17. El río Orinoco en las proximidades del poblado de Parmana, estado Guárico. En las imágenes satelitales (IR) ha podido observarse que fragmentos del sistema nuboso (*undular bore*) derivado del sistema de brisas de mar, pueden alcanzar estas latitudes. Al fondo, elevaciones de escasa altitud del borde septentrional del escudo guayanés. (Vista N-S. Foto SFP).

La mayor importancia de este sistema de circulación mesoescalar, probablemente estriben en su profundo avance hacia el sur, tierra adentro, por la influencia que pueda tener sobre diferentes aspectos de la ecología regional. Un problema particular, que sin lugar a dudas justificaría la continuación y profundización de estas investigaciones, se relaciona con las inmisiones contaminantes, de gases y partículas, que se generan en el complejo criogénico de Jose y en las plantas de cemento de Pertigalete, localizadas en la región costera del estado Anzoátegui, corriente arriba de los flujos inducidos por los sistemas de brisas de mar. Al respecto, una de las más recientes denuncias llevadas a los medios de comunicación, sintetizaba:

Gases y polvo que resultan de la explotación, refinación y manufactura petrolífera y cementera, respectivamente, forman parte de la cotidianidad en municipios del oeste y norte de Anzoátegui. Habitantes dicen que no se aplican soluciones a este problema que afecta la salud pública. Especialistas en materia ambiental coincidieron en la necesidad de implementar nociones sobre ecología en la educación formal de las nuevas generaciones, para evitar que estas fallas persistan en el tiempo (Carbonell, 2015, p. 4).

En el citado artículo de prensa se recogían las inquietudes de los habitantes de los poblados de Urucual, Puerto Píritu, Caigua y Guanta. Sobre la incidencia de factores meteorológicos en dicha problemática, quizá resulte un válido indicador una de las quejas recogidas por la prensa: “Después de las dos de la tarde, huele a huevo podrido” (Idem). Preocupaciones como la citada se habían hecho públicas en otras oportunidades (Salas, 2011).

Respecto a la relación de las circulaciones mesoescalares aquí discutidas, con los problemas de contaminación atmosférica, otro aspecto a considerar estriba en la posibilidad de que las inmisiones contaminantes puedan ser transportadas nuevamente hacia la costa, por las componentes superiores de retorno, del sistema de brisas, las cuales, según evidencias que proporcionan las imágenes satelitales, soplan hacia el norte y generan marcada subsidencia sobre una amplia franja del Caribe meridional. Por las mismas razones, resultaría de interés el estudio de las brisas de tierra o terrales, los cuales, de acuerdo a los modelos teóricos, se activan durante las horas nocturnas.

Para finalizar, puede concluirse que es importante emprender la investigación sistemática de los fenómenos atmosféricos descritos aquí preliminarmente, con el fin de establecer tanto las condiciones sinópticas y oceanográficas que favorecen o inhiben su desarrollo, como sus características físicas detalladas, además de su climatología, a la vez que iniciar el estudio de sus posibles efectos sobre las condiciones ambientales, a escala regional y local, en sus áreas de influencia.

Agradecimiento: el autor expresa su agradecimiento a la doctora Marlene Arteaga Quintero, por su valiosa colaboración en la preparación de este trabajo. También a los doctores Maximiliano Bezada Vierma y Maximiliano Bezada Díaz, por su estimable ayuda, la cual permitió la consulta de importantes artículos científicos. De igual modo al profesor Loan José Landaeta por la elaboración del gráfico 01.

SE DEDICA ESTE TRABAJO AL PROFESOR ALBERTO CONTRAMAESTRE TORRES (1927 – 2014). IN MEMORIAM

REFERENCIAS

- Arritt, R. W. (1993). Effects of the Large-Scale Flow on Characteristic Features of the Sea Breeze. *Journal of Applied Meteorology*. 32(1): 116-125
- Azorin-Molina, C., Connell, B. H. y Baena-Calatrava, R. (2009). Sea-Breeze Convergence Zones from AVHRR over the Iberian Mediterranean Area and the Isle of Mallorca, Spain. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* . 48 (10): 2069-2085
- Carbonell S., M. (2015). “Acá, en el pueblo, seguimos respirando gases y polvo”. *El Tiempo* (Puerto La Cruz). 03 de abril de 2015, pp. 4-5
- Clarke, R. H. (1972). The Morning Glory: An Atmospheric Hydraulic Jump. *Journal of Applied Meteorology*. 11(2): 304-311
- Codazzi, A. (1940). *Resumen de la Geografía de Venezuela* (Tomo I). Caracas: Ediciones del Ministerio de Educación Nacional
- Dirección de Cartografía Nacional. (1978). *Gacetilla de Nombres Geográficos*. Caracas: Autor
- Foghin-Pillin, S. (2002). *Tiempo y Clima en Venezuela*. Caracas: Universidad Pedagógica Experimental Libertador
- Foghin-Pillin, S. (2014). Evidencias de dos sistemas de circulación a meso-escala en la península de Paraguaná, Venezuela. *Revista Catalana de Geografía* No. 48. <http://www.rcg.cat/articles.php?id=282>
- Franchito, S. H., Rao, V. B., Stech, J. L. & Lorenzetti J. A. (1998). The effect of coastal upwelling on the sea-breeze circulation at Cabo Frio, Brazil: a numerical experiment. *Annales Geophysicae* . 16: 866-881
- Garratt, R. (1994). *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge: Cambridge University Press
- Goler, R. A. and M. J. Reeder. (2003). The Generation of the Morning Glory. *Journal of the Atmospheric Sciences*. 61(12): 1360-1376

- Goldbrunner, A. W. (1984). *Atlas climatológico de Venezuela 1951-1970*. Maracay: Servicio de Meteorología de la Fuerza Aérea Venezolana
- González Y., Foghin-Pillin, S. y Reyes, V. (1998). *Caracterización del régimen diario del viento en la estación FAV de Barcelona (Anzoátegui)*, para el lapso 1981-1990. Ponencia presentada en la VI Jornada Anual de Investigación. Caracas: Universidad Pedagógica Experimental Libertador-Instituto Pedagógico de Caracas
- Hastenrath, S. (1995). *Climate Dynamics of the Tropics*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers
- Kidder, S. and Vonder Haar T. H. (1995). *Satellite Meteorology. An Introduction*. Boston: Academic Press
- Leopold, L. B. (1949). The interaction of trade wind and sea breeze, Hawaii. *Journal of Meteorology* . 6(5):312-320
- Miller, S. T. K., Keim, B. D., Talbot, R. W., & Mao, H. (2003). Sea breeze: structure, forecasting, and impacts. *Reviews of geophysics*, 41(3): 1-31
- Nieuwolt, S. (1982). *Tropical climatology*. New York: John Wiley & Sons.
- Oke, T. R. (1981). *Boundary Layer Climates*. London: Methuen & Co. Ltd.
- Riehl, H. (1979). *Climate and Weather in the Tropics*. New York: Academic Press
- Salas, A. (2011). Polvo de coque enferma a habitantes de Falcón y Anzoátegui. *El Nacional*, 31 de julio de 2011, Cuerpo Ciudadanos, p. 8
- Simpson, J. E. (1994). *Sea breeze and local winds*. Cambridge: Cambridge University Press
- Vila, M. A. (1976). *Diccionario de Tierras y Aguas de Venezuela*. Caracas: Ministerio de Obras Públicas
- Vila, P. (1960). *Geografía de Venezuela*. 1 El Territorio Nacional y su Ambiente Físico. Caracas: Ministerio de Educación