

CRIOLOGIA Y METEOROLOGIA

Manuel Palomares Casado
Doctor en Ciencias Físicas. Meteorólogo

Resumen

Después de exponer diversas influencias de física atmosférica en las formaciones de hielo —que estudia, en general la *Criología*— se centra este trabajo en considerar los intercambios de energía calorífica, por convección, a través de las capas límites atmosféricas alrededor de esas superficies sólidas, tanto con *regímenes laminares* como *turbulentos*. Primeramente, se tienen en cuenta *miniescalas* y después *mesoescalas* o *macorescalas*, recordando los *números adimensionales* más importantes para su empleo, particularmente, en análisis dimensionales y estudios experimentales sobre los influjos de esos intercambios en las extensiones, estructuras y posiciones de distintas formaciones de hielo, sin entrar en escalas atómicas. Por último, se citan conclusiones y posibles aplicaciones demostrativas del interés real que pueden tener los experimentos propuestos, y se mencionan ejemplos de cómo el trabajo tiene importancia no sólo académica sino práctica.

Generalidades

Son indudables las estrechas relaciones entre Física atmosférica, o Meteorología, y las formaciones de agua sólida, que estudia en general la Criología. Ahora bien, estas masas son de escalas muy diferentes, desde los cristales de granizadas y nevadas, pasando por escarchas y cenecñadas, hasta las capas de hielo más o menos grandes que se forman sobre superficies sólidas o líquidas de nuestro planeta, las cuales alcanzan sus máximas extensiones en glaciares montañosos y hielos polares sobre todo.

Se han hecho bastantes estudios criológicos, pero no hay aún series de observaciones suficientemente extensas —tanto espacial como temporalmente— debido a las dificultades para la obtención de datos, sobre todo por altas montañas o regiones árticas y antárticas. Además, son muy complicados los balances energéticos que rigen esas formaciones, como puede verse, por ejemplo, en la obra de Oke que cito en la bibliografía. Efectivamente, no sólo hay que considerar los aumentos o disminuciones de calor por conducción, convección o radiación, sino las variaciones de energías caloríficas ligadas a los cambios de fase del agua, líquida, sólida o en forma de vapor, que coexisten con mucha frecuencia.

Por otro lado, en las precipitaciones atmosféricas de partículas más o menos sólidas, como granizadas, pedriscos y nevadas, hay que considerar las presiones capilares, las tensiones superficiales y las acciones osmóticas, así como los descensos del punto de congelación, por intervención de los núcleos solubles correspondientes, aparte de efectos eléctricos complicados, de que ya hablaba el profesor Morán Samaniego en su «Termodinámica de la atmósfera».

Hace poco tiempo que han empezado a observarse y estudiarse experimentalmente fenómenos nuevos, como la llamada «transición rugosa» en las estructuras superficiales de ciertos cristales como los de hielo. Así, en el artículo de Sebastián Balibar y otros autores —citado en la bibliografía— se describen trabajos experimentales y observaciones de los modos en que superficies lisas se hacen *rugosas* a ciertas *temperaturas de tran-*

sición. También en este artículo se menciona como dirección de investigación interesante el estudiar la influencia de esta rugosidad sobre las inestabilidades dendríticas, diciendo textualmente que «esta inestabilidad morfológica procede de la lentitud con que se difunde el calor o las impurezas cuando se hacen crecer los cristales usuales: en vez de mantener una forma convexa, éstos desarrollan brazos y a veces ramas laterales. La forma de los cristales de nieve deriva de este tipo de fenómenos».

En otro artículo de Jearl Walker, titulado «El misterio de los carámbanos: cómo logran congelar el agua?», se habla de diversas curiosas observaciones y estudios en relación con estas formaciones de hielo tan frecuentes y de como en sus desarrollos y formas pueden influir, además de las temperaturas ambientales, las humedades relativas del aire, a través de los posibles enfriamientos por evaporación del agua líquida, y las velocidades del viento.

Luego, debo mencionar el artículo de Gordon y Comiso: «*Polynyas* en el océano glacial Antártico». Estas *Polynyas* son grandes extensiones limpias de hielos, estudiadas, lo mismo que las grietas de éstos durante los últimos años por medio de observaciones desde satélites, y que deben intervenir estrechamente en el funcionamiento de la máquina térmica constituida por nuestro planeta, afectando de modo particular a las concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera, con sus correspondientes «efectos de invernadero» e importantes influencias climatológicas.

Después, Joost W. M. Frenken ha publicado un artículo titulado «Fusión en superficie», donde resume resultados de sus investigaciones demostrativas de cómo cuando se calientan sólidos, sus capas atómicas superficiales empiezan a «fundirse» mucho antes de que lo haga el resto del material. En este trabajo se exponen aplicaciones a fusiones de hielos que pueden explicar propiedades como lo resbaladizo de sus superficies o la fácil soldadura de sus pedazos cuando se ponen en contacto. Pero ahora nosotros no nos detendremos en estos fenómenos de fusión, a es-

calas atómicas, aunque pueden ayudar a explicar diversos congelamientos o cambios en partículas de granizadas, pedriscos y cristales de nieve, particularmente.

Hielos en miniescalas

En este trabajo me voy a limitar a considerar los intercambios de energía calorífica, por convección, a través de las *capas límites* formadas sobre las superficies de agua congelada, las cuales son de órdenes diferentes según que los regímenes de circulación del aire sean *laminares* o *turbulentos*. Pero existen diversas clases de turbulencias —como puede verse, por ejemplo, en mi publicación «El análisis dimensional en aerodinámica subsónica»— y conviene hacer destacar dos *números adimensionales* básicos con valores críticos que pueden caracterizar los tránsitos entre unos y otros regímenes.

Uno de ellos es el clásico *número de Reynolds*:

$$Re = \frac{l u \zeta}{\mu}, \quad (1)$$

donde l es una longitud típica del cuerpo sólido considerado —en este trabajo la masa de hielo—, u la velocidad media del aire en contacto con su superficie, ζ la densidad de dicho fluido y μ su coeficiente de viscosidad dinámica.

Otro es el *número de Richardson*, cuya expresión más general es:

$$Ri = \frac{-g \left(\frac{\partial z}{\partial z} \right)}{\zeta \left(\frac{\partial \mu}{\partial z} \right)}, \quad (2)$$

en que g representa la aceleración gravitatoria, ζ y μ las mismas variables citadas anteriormente y los térmicos entre paréntesis las variaciones infinitesimales de ellas normalmente a las superficies sólidas consideradas.

En la atmósfera predominan los movimientos turbulentos, pero, precisamente junto a superfi-

cies lisas de hielo y con pequeñas velocidades del aire, se suelen formar *capas límites laminares*, las cuales pasan a ser *turbulentas* cuando surgen rugosidades en estas superficies que hagan crecer el *número de Reynolds* () por encima de sus valores críticos, si tenemos en cuenta que la longitud l , particularmente dentro de miniescalas, puede representar la distancia media entre esas rugosidades. Ello también ocurre, naturalmente, si la velocidad del aire aumenta suficientemente, aún con hielo totalmente liso, para valores dados tanto de la densidad como de la viscosidad dinámica de dicho fluido.

Por otro lado, cuando existe régimen turbulento plenamente desarrollado, la expresión del *número de Reynolds* debe ser:

$$(Re)_\tau = \frac{lu\zeta}{A_r}, \quad (3)$$

donde A_r es la correspondiente componente del *tensor de rozamiento turbulento*, en lugar de la componente ν del *tensor de viscosidad dinámica*.

También, en mi publicación citada, dentro del capítulo dedicado a «Convección térmica», se hace resaltar primeramente el *número de Prandtl*, que para régimen laminar tiene la forma:

$$P = \frac{\mu c_p}{k}, \quad (4)$$

donde c_p es el *calor específico del aire a presión constante* y k su *coeficiente de conductividad térmica*.

Para régimen turbulento su expresión es

$$(P)_\tau = \frac{A_r}{A_t}, \quad (5)$$

donde A_t es la correspondiente componente del *tensor de intercambio de calor por turbulencia*.

Después figura el mencionado *número de Reynolds*.

En tercer lugar aparece el *número de Froude*:

$$Fr = \frac{u^2}{gl}, \quad (6)$$

A continuación está el *número de Grashof*:

$$Gr = \frac{ga(\Delta T)l^2\zeta^2}{\mu^2}, \quad (7)$$

donde a es el *coeficiente de dilatación térmica* y (ΔT) la *diferencia de temperaturas* entre los extremos de la capa límite correspondiente alrededor de la superficie de hielo.

Naturalmente, para régimen turbulento su expresión será:

$$(Gr)_\tau = \frac{ga(\Delta T)l^2\zeta^2}{A_r^2}. \quad (8)$$

Luego, aparece el *número de Eckert*:

$$Ec = \frac{u^2}{c_p(\Delta T)}. \quad (9)$$

Después se citan, particularmente, otros *números adimensionales* —combinaciones de los anteriores— y diversos *factores de forma* o de *posición*.

Finalmente, se incluye el *número de Weber*:

$$We = \frac{\zeta u^2 l}{\sigma}, \quad (10)$$

donde σ es el *coeficiente de tensión superficial*.

En el capítulo siguiente —titulado «Intercambio convectivo de calor entre sólido y fluido»— se hacen resaltar para casos estacionarios, varias expresiones generales del *número de Nusselt*:

$$Nu = \frac{\tau l}{k}, \quad (11)$$

donde τ es el correspondiente *coeficiente de transmisión del calor por convección*, haciendo ver que, lo mismo en plan local que en plan medio, es función de los cuatro *números básicos* considerados antes.

Lógicamente, con régimen turbulento tendrá la forma:

$$(Nu)_T = \frac{\tau l}{c_p A_c}, \quad (12)$$

En casos no estacionarios introducía el *número temporal de Fourier*:

$$Fo_t = \frac{\mu t}{Cl^2}, \quad (13)$$

representando t el tiempo transcurrido desde el comienzo del cambio de temperatura, haciendo ver que para estos casos el *número de Nusselt*, tanto en su aspecto local como medio es, naturalmente, función también de Fo_t .

Y para régimen turbulento debe escribirse:

$$(Fo_t)_T = \frac{A_T t}{Cl^2}, \quad (14)$$

A través de un capítulo posterior consideraba por separado la *convección natural* y la *forzada*, con las consiguientes simplificaciones en las expresiones de los *números de Nusselt*.

Hielos en meoescalas y macroescalas

A escalas medias y grandes suele convenir hacer discriminaciones espaciales, con lo cual aparecen nuevos *números adimensionales* que pueden verse, por ejemplo, en mis publicaciones: «La discriminación espacial en el análisis fisicodimensional de problemas de mecánica atmosférica» y «La semejanza física en el estudio bidimensional de fenómenos meteorológicos en escala media».

Así, en este último trabajo hay un capítulo dedicado a «Fenómenos en planos horizontales», que puede abarcar a placas, tempanitos y témpanos de hielo con extensiones correspondientes a esas escalas. Entonces, hacía resaltar primeramente al nuevo *número de Prandtl*:

$$P_{xy} = \frac{\mu_{xy} k}{c_p \zeta} \quad (15)$$

con régimen laminar, o bien:

$$(P_{xy})_T = \frac{A_{rxy}}{A_{cxy}} \quad (16)$$

con régimen turbulento, donde los subíndices xy son las correspondientes componentes de los *tensores* antes citados en esos planos.

También aparecían *números de Reynolds* con las formas:

$$Re_{xyx} = \frac{x \bar{u} \zeta}{\mu_{xy}} \quad (17)$$

y

$$Re_{xyy} = \frac{y \bar{v} \zeta}{\mu_{xy}} \quad (18)$$

para *regímenes laminares*, siendo \bar{u} la componente de la velocidad del aire a lo largo del eje x y \bar{v} a lo largo del eje y .

Para *regímenes turbulentos* escribíamos, lógicamente, las expresiones:

$$(Re_{xyx})_T = \frac{x \bar{u} \zeta}{A_{rxy}} \quad (19)$$

y

$$(Re_{xyy})_T = \frac{x \bar{u} \zeta}{A_{rxy}} \quad (20)$$

También se ponían se relieve, por ejemplo para casos no estacionarios, *números temporales de Fourier*, con dimensiones referidas al eje y :

$$Fo_y = \frac{\mu_{xy} t}{\zeta y^2} \quad (21)$$

con régimen laminar, o bien:

$$(Fo_y)_T = \frac{A_{rxy} t}{\zeta y^2} \quad (22)$$

en régimen turbulento, análogos a los *números temporales de Fourier* antes citados.

Ahora bien, para macroescalas suficientemente amplias, como pueden ser extensiones gran-

des de hielos polares, convendría tener en cuenta las influencias de la rotación terrestre a través de la *fuerza de Coriolis*. Así, en el primero de mis trabajos mencionados hablábamos de un *número de Rossby*:

$$Ro = \frac{u}{2 \omega \text{ sen } \varphi}, \quad (23)$$

donde ω es la velocidad angular de rotación terrestre y π la latitud geográfica.

Pero en el último de estos trabajos aparecía como factor del noveno, y último de los *monomios pi* fundamentales, el *número de Taylor* con la forma:

$$T_{xy} = \frac{4 \omega^2 z^4 \zeta^2}{\mu^2} \quad (24)$$

para régimen laminar, o bien:

$$(T_{xy})_T = \frac{4 \omega^2 z^4 \zeta^2}{A_{xy}^2} \quad (25)$$

para régimen turbulento. En estas expresiones z representaría el espesor de la *capa límite* y ω la velocidad de rotación, por ejemplo, de un fluido experimental. Decía también que este último *número*, que puede relacionar los efectos de la rotación terrestre con los del rozamiento turbulento, tiene verdadera importancia al permitir aplicar a la atmósfera algunas consecuencias obtenidas en los laboratorios sobre las influencias estabilizadoras de las rotaciones en los movimientos de advección y convección.

Después, dividiendo el cuarto de esos citados *monomios pi* por el noveno y último, resultaba el *número de Rossby*, con la forma:

$$Ro = \frac{u}{f} \quad (26)$$

equivalente a la anterior (23), ya que la *fuerza de Coriolis* es

$$f = 2 \omega \cdot \text{sen} \quad (27)$$

En fin, exponía la combinación de los *monomios pi* sexto, octavo y noveno:

$$\frac{\Pi_6 \cdot \Pi_8}{\Pi_9^2} = \left(\frac{gza \cdot \left(\frac{\delta T}{\delta y} \right)}{f^2 y} \right) \left(\frac{y}{z} \right)^2, \quad (28)$$

donde aparece un nuevo *número adimensional* llamado *número térmico de Rossby*:

$$Ro_t = \frac{gza \frac{\delta T}{\delta y}}{f^2 y}, \quad (29)$$

multiplicado por un *factor de forma* relacionando dimensiones horizontales y verticales.

En su expresión, si el eje y se toma tangente a un meridiano terrestre, como es lo habitual, se ponen de relieve las influencias de los gradientes térmicos meridionales, en relación con los efectos de la rotación terrestre. Por tanto, puede tener interés en estudios experimentales de dichas influencias y efectos sobre los movimientos, extensiones y formas de grandes masas heladas desplazadas desde ambos polos hacia latitudes menos elevadas y naturalmente por aires y mares progresivamente menos fríos.

Finalmente, decía que cuando se consideran importantes circulaciones atmosféricas zonales, más o menos onduladas, en vez de contemplar simplemente al *parámetro de Coriolis*, hay que tener en cuenta también la *vorticidad relativa* ζ , por lo cual diversos autores incluyen en los correspondientes *números adimensionales* la *vorticidad absoluta* $f + \zeta$.

Conclusiones y aplicaciones

En la obra, publicada por la UNESCO *World water balance and water resources of the Earth* —citada en la bibliografía—, se incluyen datos fidedignos sobre las enormes proporciones de hielo que constituyen nuestra *criosfera*, principalmente en

las regiones polares y glaciares montañosos. Sin embargo, son escasos los trabajos que conocemos sobre influencias mutuas entre aires y hielos, seguramente por dos razones principales. La primera, puede deberse a las dificultades para realizar observaciones continuadas por esas regiones y zonas de montaña. La segunda, quizá sea debida a las complicaciones que suponen las distintas formaciones de hielo, desde los cristales de granizadas y nevadas, pasando por escarchas, carámbanos o cenceñadas, hasta las placas o capas de hielo más o menos grandes que se forman sobre superficies sólidas y líquidas de nuestro planeta.

Estas últimas, particularmente, obedecen a mecanismos termodinámicos complejos, aún limitándonos a los de convección, ya que los correspondientes tempanitos o témpanos están envueltos por distintas capas fluidas, límites o fronterizas, con los aires superiores de una parte y frecuentemente con las aguas líquidas inferiores de otra.

Por consiguiente, considero que puede tener interés realizar estudios experimentales, con modelos a escala, utilizando algunos de los *números adimensionales* básicos antes expuestos, los cuales deben ser sensiblemente iguales en el laboratorio y en la realidad para que tengan sentido físico las aplicaciones correspondientes del análisis dimensional. Ello no debe ofrecer dificultades insuperables si tenemos en cuenta que la *semejanza dinámica* puede ser admisible utilizando cuando haga falta la *viscosidad molecular* , en el experimento, en lugar de la *viscosidad turbulenta* , mucho mayor, de la atmósfera, estableciendo análogas diferencias de escalas longitudinales entre el laboratorio y la naturaleza.

Además, el haber considerado en este trabajo únicamente procesos convectivos puede conducir en estudios experimentales a resultados bastante aproximados a los naturales. Efectivamente, en las regiones polares durante medio año deben suponerse nulos o despreciables los influjos de las radiaciones solares. En muchos otros lu-

gares, con nevadas duraderas, dichas radiaciones son reflejadas en grandes proporciones a través de sus blancos mantos nivosos.

Por otra parte, con situaciones anticiclónicas, acompañadas de calmas y marcadas estabilidades verticales, muchas superficies de hielo son excelentes ejemplos de *capas límites* con regímenes laminares, precisamente los que se pueden representar más fielmente en los laboratorios. Y dentro de estas situaciones los aumentos diurnos de temperatura por radiación suelen ser compensados ampliamente a través de los enfriamientos nocturnos por irradiación, sobre todo durante más o menos la mitad del año, desde las latitudes medias hasta las altas.

En fin, las superficies heladas suponen corrientemente inversiones o al menos estabilidades térmicas verticales con *gradientes subadiabáticos* y, por tanto, ausencias de turbulencias convectivas. E incluso muchas nevadas se producen con estabilidades verticales que acompañan a nimbostratos de frentes cálidos, por todo lo cual en numerosos estudios criológicos debe contarse con regímenes laminares y no turbulentos.

Resumiendo, debo decir que las investigaciones propuestas no tienen interés simplemente académico sino también práctico. Así, dentro de las miniescalas que hemos considerado pueden aplicarse, por una parte, a evoluciones en los esferocristales de granizadas basándose, por ejemplo, en fórmulas que incluyo dentro de mis trabajos acerca de estos hidrometeoros, los cuales figuran en las bibliografías de mis dos últimas publicaciones citadas al final de este trabajo.

También, en estas bibliografías se citan otras publicaciones mías sobre «aspectos meteorológicos de los deportes y el turismo invernales, o de montaña», en las que se consideran diversos englamientos como los peligrosos «manguitos de hielo» sobre cables muy diversos. Y en el libro de la *Asociación Meteorológica Española (AME) sobre Meteorología de alta montaña* —que menciono en la bibliografía— se incluyen otras comunicaciones acerca de estos temas.

Por otra parte, a diferentes escalas, las formaciones de hielo tienen particular interés para los transportes por tierra, agua y aire. Respecto a los primeros pueden consultarse, por ejemplo, mis trabajos «Meteorología y seguridad en la carretera» e «Influencias climatológicas sobre los transportes terrestres» que aparecen en la bibliografía de la publicación *Meteorología en el turismo de alta montaña*, incluida en el libro de la AME mencionado.

Con relación a los transportes acuáticos, los hielos afectan profundamente a las posibilidades y seguridades de la navegación por elevadas latitudes, o con extremismos invernales, muy especialmente los grandes «icebergs» marinos en las regiones ártica y antártica.

En cuanto a la navegación aérea existen, por un lado, los riesgos de hielos en pistas de aeropuertos, y de engelamientos que pueden afectar a sus medios de seguridad y comunicaciones. Por otro lado, siempre hay que contar con los peligros debidos a formaciones de hielo sobre toda clase de aeronaves, con tipos, efectos y métodos para combatirlos, muy bien descritos en la reciente publicación de *Briones* que cito en la bibliografía.

Asimismo, merece la pena hacer resaltar un reciente artículo de Admirat y otros autores sobre la «nieve adhesiva» considerándola como «un problema de termodinámica» que afecta, particularmente, a diversos cables aéreos. En él se describe como característica de las nevadas a temperaturas ligeramente positivas (entre 0 y 3 °C), sobre todo con vientos que aglutinan las partículas de nieve, formando temibles «manguitos» alrededor de dichos cables y haciéndolos girar peligrosamente. Se dice que es un fenómeno observado sobre todo en Francia, Gran Bretaña, norte de España, Italia y Japón, y cómo en el primero de estos países, por medio de un programa informático se pueden predecir las apariciones de «nieve adhesiva», y partiendo de previsiones meteorológicas, calcular los valores de las correspondientes sobrecargas de hora en hora y zona por zona.

También, se menciona que la formación de estos «manguitos» se está estudiando en un túnel aerodinámico experimental instalado en Ishiuchi (Japón), con distintas fijaduras de cables y velocidades del aire provocadas por medio de un ventilador apropiado.

En otro sentido, consultando mi publicación acerca de «Anomalías climáticas y circulaciones atmosféricas zonales», se puede comprender cómo investigaciones y observaciones sobre extensiones y desplazamiento de los hielos polares invernales, y de las rutas que siguen los «icebergs» desprendidos de ellos, pueden utilizarse para prever algunas de dichas anomalías con suficientes anticipaciones.

Otro ejemplo puede referirse a los estudios, tan de actualidad, acerca de los «efectos de invernadero» creados particularmente por las proporciones crecientes de dióxido de carbono, que se lanzan artificialmente a la atmósfera, con consiguientes aumentos de sus temperaturas, más acusados por las regiones polares donde predominan las descendencias aéreas, y que podrían provocar fusiones masivas de sus hielos con crecimientos de los niveles oceánicos y peligrosas inundaciones de muchas regiones costeras.

Además, hay que recordar los posibles influjos climatológicos de las *Polynias* del Océano Glacial Antártico, unas costeras o de calor latente y otras oceánicas o de calor sensible, estudiadas sobre todo por medio de satélites pero también a través de observaciones desde buques apropiados, y que pueden arrojar bastante luz sobre esos incrementos del dióxido de carbono en la atmósfera y los mencionados «efectos de invernadero» que están siendo realmente preocupantes.

En fin, como aplicación a la Paleoclimatología y quizá a la predicción de climas futuros, a largo plazo, creemos oportuno mencionar el reciente artículo de Broecker y Denton: «¿Qué mecanismo gobierna los ciclos glaciales?» En él se habla sobre análisis de hielos en Groenlandia y en la Antártida, demostrativos de que durante la última glaciación eran mucho más bajas que aho-

ra las proporciones de dióxido de carbono y de metano, gases que sabemos son básicos para producir los calentamientos por el «efecto de invernadero». Y se dice también que, según dichos análisis, en este período glacial la atmósfera era extremadamente polvorienta y por consiguiente llegaban muchas menos radiaciones solares hasta el suelo.

Ahora bien, como incluso sumados ambos efectos parecen insuficientes para explicar las diferencias térmicas entre dicho período glacial y el interglacial actual, podría suponerse una vasta reorganización del sistema océano-atmósfera, con cambios en las características de las nubes que las hiciese más reflectores para esas radiaciones durante el primero de estos períodos. Y, por último, se afirma que dicha reorganización podría ligar los cambios cíclicos de la órbita terrestre con los avances o retrocesos de las capas de hielo lo mismo en el pasado que en un futuro más o menos remoto.

Bibliografía

- ADMIRAT, P. y otros autores: «La nieve adhesiva: no más daños», *Mundo Científico*, vol. 10, núm. 100 (Ed. Fontalba). Barcelona, marzo, 1990.
- ASOCIACIÓN METEOROLÓGICA ESPAÑOLA (AME): *XIII Jornadas y I Simposio Nacional de Meteorología de Alta Montaña*, Librería General. Zaragoza, 1983.
- BALIBAR, S. y otros autores: «La transición rugosa», *Mundo Científico*, vol. 8, núm. 77 (Ed. Fontalba). Barcelona, febrero, 1988.
- BRIONES, J. L.: «El engelamiento de los aviones. Sus causas, peligros y modos de evitarlo», *Revista de Aeronáutica y Astronáutica*. Madrid, abril, 1990.
- BROECKER, W. S. y otro autor: «¿Qué mecanismo gobierna los ciclos glaciales?», *Investigaciones y Ciencia*, núm. 62 (Prensa Científica). Barcelona, marzo, 1990.
- FRENKEN, J. W. M.: «Fusión de superficie», *Mundo Científico*, vol. 9, núm. 93 (Ed. Fontalba). Barcelona, julio-agosto, 1989.
- GORDON, A. L. y otro autor: «*Polynias en el Océano Glacial Antártico*», *Investigación y Ciencia*, núm. 143 (Prensa Científica), Barcelona, agosto, 1988.
- OKE, T. R.: «Boundary layer climates». Methuen, Londres, 1978.
- PALOMARES, M.: «El análisis dimensional en aerodinámica subsónica», *Las Ciencias*, año XXIV, núm. 2. Madrid.
- : «La discriminación espacial en el análisis físico-dimensional de problemas de mecánica atmosférica», *Revista de Geofísica*, núm. 73. Madrid, 1960.
- : «La semejanza física y el estudio bidimensional de fenómenos meteorológicos en escala media», *Revista de Geofísica*, núm. 80. Madrid, 1961.
- : «Anomalías climáticas y circulaciones atmosféricas zonales», *Revista de Geofísica* (2.ª época), núm. 39. Madrid, 1983.
- : «Meteorología en el turismo de alta montaña», en la publicación de la *Asociación Meteorológica Española (AME)*, antes citada. 1983.
- : «Investigaciones y enseñanzas en física atmosférica y meteorología», publicación A-101 del *Instituto Nacional de Meteorología*. Madrid, 1984.
- : «Aspectos humanos y sociales en Meteorología y Climatología», *Instituto Nacional de Meteorología*. Madrid, 1988.
- UNESCO (U.S.S. R. National Committee for the International Hydrological Decade): *World water balance and water resources of the Earth*. París, 1978.
- WALKER, J.: «El misterio de los carámbanos. ¿Cómo logran congelar el agua?», *Investigación y Ciencia*, núm. 42 (Prensa Científica). Barcelona, julio, 1988.