

Insolación Terrestre en la Climatología Teórica: De Halley a Milankovitch

Joaquín Pelkowski. Universidad de Frankfurt

De Halley a Lambert

Etimológicamente, la palabra clima significa inclinación y se refiere a la oblicuidad de los rayos solares desde el plano de la eclíptica. De la oblicuidad de incidencia de los rayos depende la irradiación de un área de superficie, y si se trata de los rayos solares, esa irradiación lleva el nombre de insolación. Más exactamente, es la radiación solar que irradia una superficie de 1 m² en la unidad de tiempo. Y si a esto agregamos una definición de la Climatología como "el estudio de los climas en relación con las causas que los determinan, su distribución, tipos existentes y posibles variaciones" (Real Academia etc., 1996), podemos entender a qué me refiero con el término de Climatología teórica: Es el estudio teórico, o sea, fisicomatemático, de esas relaciones entre climas y causas que los determinan. El objeto de estas notas es esbozar a grandes rasgos la evolución de la rama de la Climatología teórica que ha logrado cierta perfección matemática, o sea, la que trata de la insolación de nuestro globo expuesto a los rayos del astro diurno.

La tradición no vacila en nombrar al reformador de la teoría de los Alisios, Edmond Halley (1656-1742), como el fundador de aquella rama de climatología teórica consagrada a la determinación matemática de la distribución del calor solar sobre la Tierra. En un trabajo publicado siete años después de su trabajo sobre la distribución y causas de los vientos regulares en superficie, postula el gran astrónomo (Halley, 1693): "De la tabla y estos corolarios puede concebirse generalmente la idea de la suma de todas estas acciones del Sol durante todo el año, haciendo de esa fracción del calor que resulta simplemente de la presencia del Sol, una certidumbre geométrica."

Halley comienza su ensayo aludiendo a "un debate suscitado recientemente acerca de esa parte del calor del tiempo que es simplemente producido por la acción del sol", debate en el cual, nos informa, él intervino afirmando que si la acción del Sol se consideraba como la única causa del calor del tiempo atmosférico, no veía ninguna razón de por qué bajo el polo el día solsticial no fuese tan cálido como bajo el ecuador el equinoccial, cuando el sol se encuentra allí en el cenit. Explica entonces que ello se debe a que en el polo solsticial iluminado la duración del día es de veinticuatro horas, mientras que en un equinoccio el día ecuatorial es de sólo doce horas de duración, de las cuales durante tres horas y ocho minutos el sol no se eleva tanto como en aquel caso sobre el polo. "Ahora, la simple acción del Sol es, como todos los impulsos o golpes más o menos fuertes, conforme al seno del ángulo de incidencia [hoy diríamos de elevación] o de la caída perpendicular sobre la llanura, de donde se sigue que si al rayo vertical (siendo el que más calor tiene) se define como radio, la fuerza del sol sobre la superficie horizontal de la tierra será como el seno de la altura del Sol en cualquier otro momento. Admitiendo esto como verdadero, se seguirá

que si tomamos el tiempo de brillo solar como base y los senos de la altura del sol como la perpendicular erigida sobre aquélla, y si unimos mediante una curva las extremidades de estas perpendiculares, el área comprendida será proporcional al acopio de calor que todos los haces del Sol aportan en dicho espacio de tiempo. De donde se sigue que bajo el polo el almacenamiento del calor en un día tropical será proporcional a un rectángulo del seno de $23,5^\circ$ por 24 horas, o por la circunferencia del círculo" (Halley, 1693).

Si llamamos Q_0 a la constante solar, o sea, al flujo de energía solar por unidad de tiempo y área orientada perpendicularmente al flujo, y a la densidad de flujo radiativo que atraviesa el tope de la atmósfera por $Q_{\downarrow}(0)$, que representa la insolación instantánea, podemos traducir las palabras de Halley poniendo:

$$Q_{\downarrow}(0)/Q_0 = \theta_0 \equiv \mu_0$$

... donde θ_0 designa el ángulo cenital del Sol (ángulo que forma el centro del disco solar visible y el cenit del lugar considerado). Si se integra este cociente con respecto al ángulo horario (definido convenientemente), desde la salida hasta la puesta del sol, se obtiene el calor acumulado durante un día (en unidades de la constante solar); ahora, si se trata del solsticio estival como en la última cita de Halley, es preciso integrar el ángulo cenital de 0 a 2π para obtener el valor correspondiente al polo septentrional, o sea, $0.39875 \times 2\pi = 2.5$, dos y media veces la constante solar, mientras que en un día equinoccial el ecuador acumula solamente el doble de la constante solar (descartando las pequeñas diferencias de flujo debidas a la elipticidad de la órbita terrestre).

El siguiente trabajo de relieve en Climatología de la insolación se publica en 1719. Su autor, Jean Jacques d'Ortous de Mairan (1678-1771), uno de los numerosos cartesianos de la Academia real francesa en el primer tercio del siglo XVIII, se pregunta por las causas del frío en invierno y del calor en verano. Considerando insolaciones solsticiales y comparando sus respectivas intensidades, aborda la importante problemática del debilitamiento de la radiación solar, sobre todo en un trabajo matemático de 1721, cuyo mérito histórico es el de haber inspirado al precoz genio Pierre Bouguer (1698-1758), acuciándolo a realizar sus investigaciones sobre los grados cambiantes de la luz, publicadas en 1729, en lo que se considera la obra fundadora de la fotometría moderna. Después de un largo lapso de tiempo, De Mairan vuelve a presentar en 1765 un amplio trabajo de Climatología (publicado en 1767), apoyándose en múltiples observaciones empíricas de temperaturas correspondientes a varios lugares y fechas, trabajo del cual Alexander von Humboldt (1769-1859) juzgaría medio siglo después: "Desgraciadamente, se confunden incesantemente las temperaturas extremas con las medias; pero se hizo en esta obra, anterior a las de Cotte y Kirwan, por vez primera el ensayo de compilar los hechos y de comparar los climas más remotos entre sí." (Humboldt, 1817) Parece que en esta obra el precursor de la climatología comparativa define lo que se conoce, impropriamente, como Climatología solar (que sólo depende de la posición estacional del sol). Define también lo que llama el clima racional, esto es, el clima que resulta del calor solar y de una fuente de calor interna, la "emanación central", que no hizo mella en la evolución de la climatología. La obra de Bouguer, en cambio, contiene un valioso avance por cuanto permitía medir la insolación en el fondo de la Atmósfera, pero por alguna razón no se combinó este aspecto de la fotometría atmosférica con las apreciaciones teóricas sobre la insolación terrestre

durante el siglo XVIII. Su primer tratado había sido redactado para que, a partir de las medidas de la intensidad de la luz, se pudiera demostrar "el uso que se puede hacer de ellas para llegar a todos los otros conocimientos necesarios" en fotometría (Bouguer, 1729). Para tal fin se había propuesto determinar las intensidades de la luz del sol cuando éste se encuentra a una gran elevación sobre el horizonte y cuando su elevación es pequeña: "Nos dio pie para esto una memoria de De Mairan de 1721, en la cual éste supone conocido, en los solsticios de verano e invierno, el cociente entre dos intensidades de la luz solar meridiana. Tras haber leído con la atención que reclaman todas las obras de este ilustre académico, no pude resistir al deseo de buscar algunos medios de realizar las observaciones que él indica" (Bouguer, 1729). Bouguer se impuso la tarea de medir la "fuerza" de la luz de la Luna en dos elevaciones distintas, publicando sus resultados en las memorias de la Academia en 1726. Pero aún hacía falta examinar la disminución que sufre la luz cuando se divide en varios colores, y comparar mediante el cálculo los diversos grados de fuerza o vivacidad de los rayos a partir de un espesor dado del material en cuestión, mediante un método que permitiera inferir los resultados para distintos espesores del mismo medio. Es así que propone la ley de extinción que hoy conocemos bajo tres nombres, entre ellos el suyo. El método empleado por Bouguer es geométrico, como el que Newton aplicó en sus inmortales "Principia"; por contraste, el método que Johann Heinrich Lambert (1728-1777) utiliza, en otra obra fundadora de la fotometría (1760), en la que propone la misma ley exponencial de extinción, es analítico, lo cual explica que la ley del debilitamiento exponencial de la radiación suele atribuirse a Lambert en primer lugar, puesto que por entonces, ése era el método prevaleciente en las investigaciones teóricas. El tercer autor que se suele honrar en este contexto, en algunos casos excluyendo a los otros dos (especialmente en la literatura en castellano), es el malogrado físico alemán August Beer (1825-1863), quien al final de una obra sistemática (Beer, 1854) presenta la misma ley en forma sucinta y clara.

Antes de pasar a considerar brevemente otra obra magna de Lambert, en la que la teoría de la insolación da un brinco en su evolución, hemos de considerar un esfuerzo prematuro de Leonhard Euler (1707-1783), príncipe de las matemáticas de la Ilustración. Euler plantea en 1739 el problema de las temperaturas atmosféricas debidas al calentamiento solar según la estación del año en términos de una ecuación diferencial, quizá la primera en la historia de la climatología teórica y que prefigura los modelos modernos conocidos como de Budyko-Sellers.

Al estar redactado en latín, quizá sea de interés resumir el trabajo de Euler, apoyándonos en los comentarios introductorios (algunos pocos no enteramente exactos) de David Speiser en los *Opera Omnia III/X* (Euler, 2004). El planteamiento del problema se puede entender a partir de las hipótesis básicas del modelo de Euler: 1º) El Sol es la única fuente del calor atmosférico; 2º) la superficie terrestre y la atmósfera, en reposo, se suponen uniformes; 3º) cuando calienta el sol, la temperatura máxima del aire se alcanza asintóticamente; 4º) supone la ley de Kepler, según la cual la "intensidad de la radiación" disminuye inversamente a la distancia cuadrada; supone que el efecto de calentamiento es proporcional al coseno del ángulo cenital del sol (como ya lo había expuesto claramente Halley) y supone también que de noche la intensidad es nula; 5) como la Tierra gira diariamente, μ_0 depende del tiempo t , $\mu_0(t)$, y por lo tanto se precisa de una ecuación para $d\mu_0/dt$. Euler supone que la acción calorífica del sol es proporcional a la diferencia de "la"

temperatura del Sol y "la" de la atmósfera (hipótesis que corresponde a la ley de Newton en el caso de la conducción del calor, aunque Euler esté investigando una transferencia por radiación). En base a estas suposiciones, Euler establece la siguiente ecuación diferencial:

$$dT_a/dt + \alpha T_a = \alpha (T_{sol}/D^2)\mu_0$$

... donde α es una constante de proporcionalidad, D la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas (distancia adimensional), T_a y T_{sol} "las" temperaturas del aire y del Sol, respectivamente. La ecuación se parece a la moderna ecuación de transferencia radiativa, si en lugar de la temperatura usamos la radiancia, y si a la variable independiente t (tiempo) se sustituye la profundidad óptica. El término libre, claro está, tiene un significado físico diferente en ambas ecuaciones: para Euler, la fuente de energía atmosférica es el Sol, mientras que en la ecuación de transferencia radiativa (sin esparcimiento), la fuente principal es el calor interno de la atmósfera (además de un pequeño aporte por absorción de radiación solar). Pero precisamente este aspecto del calentamiento atmosférico, mal entendido cuando Euler redactó su memoria, no fue desentrañado sino hasta finales del siglo XVIII. (La radiación infrarroja o "calor oscuro", no fue puesta en evidencia sino hasta 1777, por el químico sueco Carl Wilhelm Scheele (1742-1786), primer descubridor del oxígeno atmosférico.) Euler, según Speiser, se vio obligado, más como un artificio para simplificar las dificultades analíticas que como un hecho de observación, introducir una "radiación negativa" nocturna, que de alguna forma representara la pérdida de energía calorífica, evitando así un recalentamiento perpetuo de la Tierra. Euler despliega en esta obra de manera virtuosa su portentosa capacidad analítica, sin llegar a "grandes resultados", según Speiser, pero logrando deducir de su teoría que el calor máximo diario tiene lugar en horas de la tarde, y el máximo calentamiento en verano después del solsticio estival, resultados teóricos de relieve. Euler, sin embargo, reconoce que esos atrasos no cuadraban con las observaciones, y parece que ello lo llevó a abandonar su brillante tentativa, que poco influyó en desarrollos posteriores.

Después del temprano esfuerzo de Euler, y antes de Lambert, mencionémoslo de paso, se publica en San Petersburgo la obra *Cogitationes de distributione caloris per tellurem*, de Franz Ulrich Theodosius Aepinus (1724-1802), en 1761 (obra que no he consultado y que no sabría leer): no parece haber representado un adelanto decisivo, según las citas y los comentarios que aparecen en una obra de Pierre Prevost (1751- 1839), publicada en el siglo siguiente. También cabría llamar la atención sobre una obra que contribuyó a la historia que nos ocupa, pero que parece haber estar sumida en el olvido: *Meditationes physico mathematicas*, publicadas en 1780, por Gregorio Fontana (1730-1805). De esta obra no se habla nunca en este contexto de la insolación, pero el astrónomo Bernhard August von Lindenau (1779-1854) la cita, en una de sus investigaciones sobre la causa de los vientos, publicada en 1807, como una obra en la que la insolación terrestre aparece tratada a un nivel teórico superior.

También merece la pena considerar uno que otro trabajo empírico que podía servir de base para juzgar mejor los trabajos teóricos sobre la insolación. En este sentido, un aporte que no podemos pasar por alto es una simple "fórmula de interpolación", propuesta en 1755, pero publicada póstumamente en 1775, por el "reformador de las tablas lunares", malgrado pionero de la ciencia alemana en la Ilustración, Tobias Mayer el Viejo (1723-1762). La

fórmula cobró importancia en los estudios climatológicos de la distribución de temperaturas con la latitud, y hoy puede decirse que resulta de un desarrollo en serie, según polinomios de Legendre, de la distribución de insolación anual. Mayer la propuso originalmente bajo la forma:

$$T(\varphi) = m - n \sin^2 \varphi$$

... donde φ representa la latitud geográfica del lugar cuya temperatura (en superficie) es $T(\varphi)$. Se trata más de un método de interpolación que de una teoría. Humboldt y otros investigadores de la distribución de temperaturas según las latitudes, se apoyaron en ese método, y acaso sea apropiado citar lo que aquél pensaba sobre la fugaz incursión de Mayer en el campo de la climatología térmica (Humboldt, 1817): "Las determinaciones de Mayer, según las cuales las temperaturas disminuyen desde el ecuador hasta el polo como los cuadrados de los senos de la latitudes, dan bastante buenos resultados, si uno no se aparta en longitud de aquellas regiones que suministraron los coeficientes empíricos."

La fórmula de Mayer tuvo un éxito inusitado. Richard Kirwan (1735-1812), en su obra sobre la distribución de temperaturas con la latitud, publicada en inglés en 1787 y traducida al francés dos años más tarde, afirma que "el descubrimiento que me parece más importante es el de la ecuación, mediante la cual, si se conoce la temperatura media del año en dos latitudes, se puede determinar la temperatura de toda otra latitud, incluyendo la del polo" (Kirwan, 1789). En el prólogo de su obra justifica su afirmación: "El conocimiento de la temperatura del globo, bajo cada grado de latitud, es el primer paso que hay que dar en el amplio campo que ofrecen las investigaciones meteorológicas. El cambio de temperatura ocasiona las vicisitudes de los vientos; los vientos, a su vez, influyen en la temperatura, y es de esta acción recíproca que resulta el estado de la atmósfera." No obstante, critica los defectos del método de Mayer y, percatándose también de la importancia meteorológica de la distribución de temperaturas con la altura, da una regla para calcularlas: "Considero muy importante en meteorología determinar la altura del punto de congelación bajo un grado de latitud. La temperatura disminuye en progresión aritmética hasta el punto de congelación en cada latitud..." (Kirwan, 1789).

Pero antes de esbozar el programa empírico de este climatólogo, hemos de considerar una obra importante en la evolución de la termodinámica clásica y de las investigaciones sobre la radiación del "calor oscuro". Se trata de la última obra de Lambert, *Pyrometrie* (una calorimetría de la época), cuya publicación es posterior a la adelantada muerte de su autor, que desconfiaba del arte de los médicos. La última parte de la obra, que contiene amplios desarrollos matemáticos, está dedicada al "calor solar": "Hemos de considerar la Tierra como una esfera, invariablemente expuesta a la luz del Sol y por ello a su calor, ya que sólo rara vez la Luna le sustrae ese calor.

Pero como el Sol siempre ilumina cerca de la mitad de esa esfera, mitad que no deja de cambiar debido al movimiento diurno y anual de la Tierra, se producen variaciones diarias y anuales, las cuales son la fuente principal de las estaciones del año." (Lambert, 1779.) Más adelante enuncia Lambert lo que podemos considerar como la ley fundamental de la Climatología: "La acción igual y suficientemente constante del calor subterráneo, junto con

la irradiación solar y otras consideraciones, nos permite imaginar un estado persistente, en el cual se encuentra la Tierra desde hace mucho tiempo, y el cual se ubica dentro de límites muy estrechos. La ley básica de tal estado de persistencia se refiere a que el calor del Sol recibido por la Tierra a lo largo de un año, es igual al calor abandonado por ella en el mismo lapso de tiempo, de modo que la suma total de calor, al menos de año en año, y descontando pequeñas irregularidades, se mantiene siempre igual."

La obra de Lambert no es de fácil lectura, y para un juicio de conjunto acudiré nuevamente a la autoridad de Humboldt (1817): "Poco satisfecho con los derroteros usados por sus predecesores, Lambert orientó, en su *Pyrometrie*, sus trabajos según dos metas distintas: buscó expresiones analíticas para las curvas que indicaban los cambios de temperatura que él había observado en un lugar; y volvió al "teorema" de la actividad solar, para darle la máxima generalidad [posible].

Suministra fórmulas con las que es posible calcular el calor de un día bajo una latitud dada; pero temerosamente preocupado por determinar la disipación nocturna del calor obtenido o la subtangente [tasa] del enfriamiento nocturno, da tablas de la distribución del calor con la latitud y para diferentes estaciones del año, que se apartan tanto de los resultados de las observaciones que parece difícil atribuir estas desviaciones al influjo del calor radiante del cuerpo terrestre u a otras causas.

Asómbrase uno de la pequeña diferencia que la teoría indica entre las temperaturas medias anuales de los lugares situados bajo el Ecuador y bajo los círculos polares, y entre los veranos de las zonas cálidas y las zonas frías. No se exige del análisis la determinación de la distribución del calor como [se observa que] tiene lugar en la realidad. Sabemos que la teoría, sin aplicar leyes empíricas, sin nutrirse de datos que provengan de las observaciones, sólo puede someter al cálculo una parte del efecto total: la que se refiere a la inmediata acción de los rayos solares. Pero desde las afortunadas y nuevas aplicaciones del análisis a los fenómenos de una superficie radiante, a la penetración del calórico en el interior de los cuerpos sólidos, al enfriamiento de estos cuerpos en medios cuyas temperaturas no son uniformes, podemos esperar que al fin se pueda lograr perfeccionar la teoría del influjo solar, y se pueda calcular la distribución del calor que se encuentra en la atmósfera de nuestro planeta." Humboldt se refiere en la última frase sin duda a las famosas investigaciones de Jean-Joseph Fourier (1768-1830), quien investigó de manera matemática y sistemática los procesos de conducción del calor, ya sea radiativa o molecular.

Como contribución teórica al problema de la insolación terrestre, la obra de Lambert conserva su interés, que sólo un estudio profundizado podría revelar en toda su dimensión histórica.

De Kirwan a Zenker

Volviendo al tratado de Kirwan (1789), apuntemos primero que el éxito práctico de todo trabajo teórico depende, conforme al método llamado científico, de las confirmaciones empíricas. Kirwan, a quien ya mencionamos, es consciente de la importancia de los esfuerzos en ese sentido, procurando información valiosa al teórico de la insolación. Relata que "los filósofos griegos y latinos (los únicos cuyas obras nos han llegado), habiendo observado que durante el verano, bajo su latitud, cuando el sol de mediodía se hallaba casi perpendicularmente sobre sus cabezas, sentían un calor considerable, y que al contrario, durante el invierno, el sol estando menos elevado sobre el horizonte, experimentaban un frío muy grande", y añade, no sin sorna, que "de esas observaciones se precipitaron a concluir que el calor era insoportable entre los trópicos, donde el sol lanza sus rayos perpendicularmente durante una gran parte del año, y que por razones totalmente opuestas, las comarcas vecinas a los círculos polares eran inhabitables." No podemos menos de pensar en las chuscas observaciones del Padre Joseph de Acosta (1540-1600) en su famosa obra de 1690: "Diré lo que pasó a mí cuando fuí a las Indias. Como había leído lo que los filósofos y poetas encarecen de la Tórridazona, estaba persuadido que cuando llegase a la Equinoccial, no había de poder sufrir el calor terrible; fué tan al revés que al mismo tiempo que la pasé sentí tal frío, que algunas veces me salía al sol por abrigarme, y era en tiempo que andaba el sol sobre las cabezas derechamente, que es en el signo de Aries, por marzo. Aquí yo confieso que me reí e hice donaire de los meteoros de Aristóteles y de su filosofía, viendo que en el lugar y en el tiempo que conforme a sus reglas había de arder todo y ser un fuego, yo y todos mis compañeros teníamos frío; porque en efecto es así que no hay en el mundo región más templada ni más apacible, que debajo de la Equinoccial."

Al igual que Acosta refuta al imperecedero estagirita a costa de sus propias experiencias, Kirwan desvirtúa los esfuerzos teóricos de su siglo: "El tiempo ha disipado éstos y una multitud de otros errores, pero como ocurre de ordinario, nos presenta otros fenómenos no menos difíciles de explicar. ... Se han observado bajo las mismas latitudes diferencias bien marcadas en la temperatura, no sólo en los hemisferios, sino aun en uno mismo. ... Estos fenómenos, y una multitud de otros de la misma naturaleza... nos hacen ver claramente que para dar una explicación de las diferencias que se observan en las temperaturas, hay que buscar otra causa que la acción inmediata o la ausencia de los rayos solares." Es éste un golpe duro contra la Climatología teórica. Y pese a que lo asesta en buen empírico, no parece ser letal para las investigaciones de la insolación teórica: "El célebre Halley ha demostrado verídicamente que si se hace abstracción de la influencia de nieblas [nubes], vapores y montañas de hielo, durante el verano uno puede experimentar en las regiones polares un calor muy grande, porque la oblicuidad de los rayos del sol se encuentra más que compensada por la constancia de su acción. Pues es evidente que una pequeña fuerza actuando durante mucho tiempo, puede producir un efecto tan grande, y aun más grande, que una fuerza considerable que no actúa sino durante un tiempo bastante corto. Pero como tales abstracciones no pueden realmente tener lugar, y como una infinidad de causas físicas contribuyen a disminuir en éstas y otras comarcas la actividad de los rayos solares, ha sido necesario recurrir a otras causas, hasta el momento en que el Sr. De Mairan nos arrancó la venda de los ojos. Pues fue él quien descubrió que el frío riguroso de los inviernos se ve temperado por el calor que la tierra comunica a la atmósfera, dándole a este calor el nombre

de emanación central...Esta suposición me parece a la vez gratuita e infundada. ... Este calor se hubiese disipado desde hace tiempos, si no hubiese sido conservado y renovado por la acción continua del sol, que baña siempre con sus rayos la mitad de la Tierra. Como no hay observaciones que demuestren que el calor de la tierra aumenta proporcionalmente a la profundidad...parece evidente que es el calor del sol que perpetúa el de la Tierra." (Kirwan, 1789.) Después de esta concesión al programa de los teóricos de la insolación, nos recuerda que nada ha sido resuelto (Kirwan, 1789): "El descubrimiento del Sr. Mairan eliminó en gran parte las dificultades que se presentaban a la hora de explicar cómo los rigores resultaban suficientemente atemperados para tornar habitables los climas más fríos. Pero no fue de gran alcance; seguimos ignorando cuál es la temperatura media de cada año o de cada mes bajo cada grado de latitud. Digo la temperatura media; de hecho, a ella sola se han de limitar nuestras observaciones, puesto que dos años que se suceden, escasamente tienen relación exacta entre ellos en cuanto a la temperatura. El mismo De Mairan calculó con gran sagacidad el máximo y el mínimo de calor que se hace sentir en los solsticios de verano e invierno bajo cada latitud; pero hay tantas causas que influyen sobre las operaciones de la naturaleza, que los acontecimientos no concuerdan sino rara vez o jamás con su cálculo, tal como lo confiesa el mismo autor con franqueza."

En el siglo XIX podemos observar una dicotomía de los esfuerzos teóricos y empíricos por entender la distribución de temperaturas en superficie (y en altura). Es el siglo de la investigación de las isothermas anuales, y, como desarrollo inevitable, de las isothermas mensuales. En climatología hay gran acopio de datos sobre las temperaturas en distintas partes del mundo. Se examina con buen criterio la calidad de los instrumentos y datos y se dibujan y confeccionan cuidadosos mapas, en una carrera por la mejor representación de las isothermas anuales (a la Humboldt, véase la figura 1). Al mismo tiempo, pero en terrenos físicos y matemáticos, se desarrollan las teorías de radiación solar e infrarroja, siendo ésta última objeto de extensas investigaciones empíricas y teóricas. En fisico-química se descubre el efecto invernadero del dióxido de carbono y el vapor de agua. En geología, se proponen y discuten teorías de las glaciaciones, y todos estos desarrollos influirán en la teoría de la insolación terrestre.

HUMBOLDT (1817)

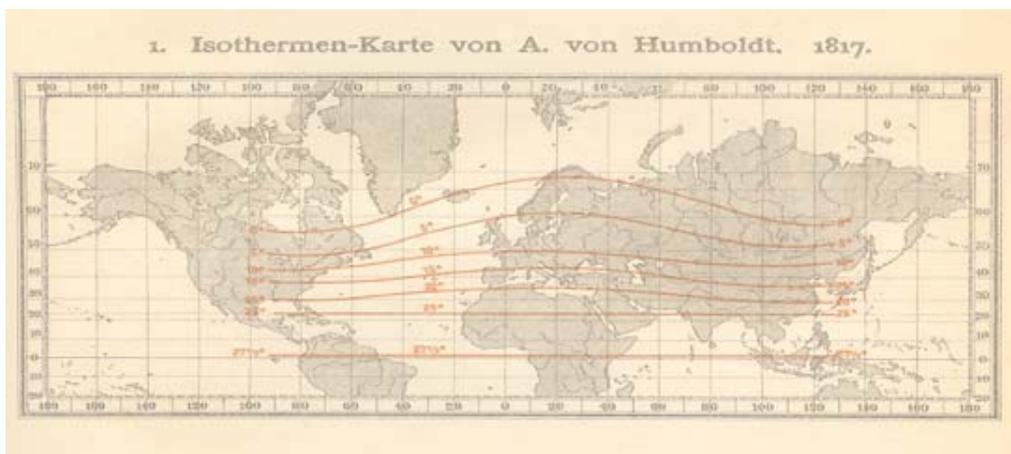


Figura 1.- Nítida representación de las isothermas de Humboldt (Meinardus, 1899)

De las obras que se ocupan de la insolación terrestre, mencionemos en orden cronológico: La obra de Prevost, especialmente su monografía de 1809; aunque carece de aparato teórico, inspira los importantes trabajos teóricos (entre aproximadamente 1807 y 1830) de Fourier, quien a su vez inspira algunas de las correspondientes contribuciones de Siméon Denis Poisson (1781-1840), particularmente su importantísima, aunque en sus fundamentos físicos un tanto trasnochada, obra *Théorie mathématique de la chaleur*, publicada en 1835, cuando nuevas teorías de la propagación de la luz empezaban a conquistar los manuales de enseñanza. Esta obra de Poisson es notable en historia de la Meteorología por contener, junto con una teoría rigurosa de la insolación, la ecuación que los meteorólogos han dado en llamar, erróneamente, de Schwarzschild (quien la publica poco más de siete décadas más tarde), y que rige la transferencia de energía radiativa en el caso de que se pueda hacer abstracción del esparcimiento. Poisson la aplica a la radiación solar y a la del "calor oscuro", prefigurando claramente todas las posteriores teorías sobre el efecto invernadero. Toda explicación de las isotermas en superficie depende tanto de esta ecuación como de la insolación en el límite de nuestra atmósfera. Pero aparentemente ningún autor decimonónico tomó nota de ese aspecto de la teoría de Poisson, pese al sonado nombre de su autor. Su espléndida teoría se adelantó sobremanera a unos desarrollos que no tuvieron lugar sino hasta el siglo XX.

Tras la obra de Poisson, las investigaciones teóricas sobre la insolación continúan a aparecer con cierta regularidad. Bástenos mencionar las siguientes contribuciones: En 1856 L.W. Meech publica *On the relative intensity of the heat and light of the sun upon different latitudes of the Earth*; en 1876 aparece *Über die Stärke der Bestrahlung der Erde durch die Sonne in ihren verschiedenen Breiten und Jahreszeiten* (Sobre la intensidad de la insolación de la Tierra en sus distintas latitudes y estaciones), mientras que a mediados de la década del ochenta, la Academia de Ciencias de París convoca a un concurso cuyo tema era determinar lo mejor posible la distribución del calor sobre la superficie terrestre del globo, además de "investigar teóricamente según cuáles leyes el calor solar llega a las distintas latitudes del globo terrestre a lo largo del año, teniendo en cuenta la absorción atmosférica. Hacer un estudio comparativo de la distribución de temperaturas dadas por las observaciones." El premio fue adjudicado a W. Zenker, quien publica su victoriosa memoria bajo el título *Die Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche* (La distribución del calor sobre la superficie terrestre), en 1888. A este extenso trabajo seguirá en 1895 uno sobre la estructura térmica de los climas, pero no nos detendremos a discutir estas dos obras, basadas en leyes empíricas de la radiación térmica, y no en la recién (en 1879) descubierta ley de Stefan, consolidada por la derivación teórica que Boltzmann diera cinco años más tarde.

Por otro lado, la parte que tiene que ver con el debilitamiento de la radiación solar es válida, ya que en ella se aplicaba la ley de Bouguer, aunque bajo una forma ligeramente distinta, propuesta por Pouillet en 1838. En este trabajo fundamental para los desarrollos posteriores, en el que Pouillet busca medir la constante solar con la ayuda de su famoso pirheliómetro, leemos que su autor había tratado de descubrir una ley que se ajustara a sus medidas pirheliométricas, reconociendo a la postre que su fórmula podía reducirse a la ley de Bouguer. La fórmula, muy utilizada en el siglo XIX y hasta bien entrado el siglo XX, aparece bajo la forma

$$t = A p^\varepsilon$$

... donde $\varepsilon = (1 + 2r + r^2 \cos^2\theta)^{1/2} - r \cos\theta$ es el espesor de la atmósfera atravesada, siendo respectivamente r y θ el radio de la Tierra y el ángulo cenital de los rayos solares incidentes; t representa la fuerza de la radiación; A y p son constantes, a determinar mediante las observaciones de la radiación solar. Para cada día diferente, A y p son constantes, pero p varía de un día para otro. A es pues, según Pouillet, la constante solar, y p la constante atmosférica, que representa la capacidad variable de la atmósfera para dejar pasar, más o menos debilitados, los rayos solares.

A la lista de trabajos teóricos citados podemos agregar, para redondear la literatura: *Temperature of the Atmosphere and Earth's Surface*, de Ferrel, publicado en 1884; *Recherches théoriques sur la distribution de la chaleur à la surface du globe*, de Angot, presentado en 1883 y publicado en 1885; y el de Hargreaves, *Distribution of solar radiation of the surface of the earth and its dependence on astronomical elements*, publicado en 1896.

Rigor serbio en la Climatología teórica

Pasemos ahora a considerar la obra del preclaro científico serbio Milutin Milankovitch (1879-1958). Según lo confiesa él mismo, en busca de un tema para ejercer sus habilidades matemáticas, se topó con el tema del concurso de París que había ganado Zenker, cuyo programa adecuaba entonces a su gusto personal (Milankovitch, 1920): "Se puede ampliar este problema y se le puede dar una forma más precisa proponiéndose uno describir matemáticamente la marcha de la insolación en la superficie terrestre y hallar, mediante leyes físicas, la conexión entre esta insolación y la temperatura de la superficie del globo y su atmósfera." En el párrafo siguiente le da un visto de perentoriedad a su nueva tarea: "Bajo esta forma, la proposición se convierte en el problema fundamental de la Meteorología y la Climatología; y he de confesar mi sorpresa cuando me percaté de que este problema no había sido resuelto todavía, ni siquiera a grandes rasgos, a pesar de su importancia particular. Poisson, en su obra clásica *Théorie mathématique de la chaleur*, ya se había ocupado del problema, pero la ignorancia en que se encontraban en esa época con respecto a la radiación le impidió entrever la solución. Después de él, fueron notablemente Meech, Wiener y Angot los que dieron una descripción matemática de la insolación del globo, mas sin estudiar la relación entre la insolación y la temperatura. Zenker dedicó a esta última cuestión dos obras particulares..., pero, por haber desatendido las leyes de radiación que ya se conocían en su momento, no logró establecer sino unas leyes empíricas sin significado. Así, a pesar de los esfuerzos de este autor, el problema seguía sin solución."

Milankovitch, con rigor matemático fuera de lo común en una ciencia aplicada, dedicó de buena gana casi todas sus energías a la resolución del problema propuesto por la Academia de París y extendido por él, acometiéndolo en 1911 y orgullosamente dándolo por terminado 30 años después. Publicó tres obras principales (1920, 1930, 1941), en las que consolidó y amplió lo que hoy se conoce como la teoría de las causas astronómicas o de

Milankovitch. Incluye en su investigación la radiación "oscura" (infrarroja), casi al mismo tiempo en que su transferencia por medios opacos se aplicaba por vez primera a la atmósfera, en un trabajo fundamental de Emden, publicado en 1913 por la Academia de Baviera. Milankovitch tiene en cuenta la radiación "oscura" emitida por la superficie terrestre y por la misma atmósfera, y tiene en cuenta su extinción de manera análoga al debilitamiento de la radiación solar según la ley de Bouguer, debida a dos gases traza: "Nuestra Atmósfera posee, tal como lo demostró experimentalmente Tyndall, una propiedad parecida [a la del invernadero]. Al atravesarla, la radiación solar no sufre sino débiles pérdidas, mientras que la radiación emitida por la Tierra es casi totalmente absorbida. Esta absorción es debida casi exclusivamente a la presencia del vapor de agua y del dióxido de carbono" (Milankovitch, 1920). Su atmósfera modelo tiene en cuenta, por lo tanto, una transmisividad adicional, asociada a la radiación infrarroja o térmica: "Hasta ahora no hemos considerado sino los cambios del clima matemático debidos a los cambios de insolación, provocados por la variación de los elementos astronómicos. No obstante, el clima terrestre depende igualmente de otros factores. La intensidad de la insolación es, por ejemplo, proporcional a la constante solar, no siendo este valor, pese a su nombre, una verdadera constante. Además, en las ecuaciones desarrolladas para el cálculo del clima matemático,... las magnitudes A [albedo], p , p' [transmisividades respecto de la radiación solar y oscura, respectivamente], [no] pueden considerarse como constantes. Las variaciones de estas cuatro magnitudes tendrán como consecuencia diversos cambios del clima matemático de la Tierra" (Milankovitch, 1920). Y una vez más, un teórico de la insolación defiende su proceder enteramente reducido a las peripecias del lápiz sobre el papel: "La climatología actual es una ciencia esencialmente empírica... Por consiguiente, hay problemas relacionados con los climas geológicos y sus causas a la espera de soluciones... y hay que abordarlos a través del estudio de los cambios del clima matemático. Esos cambios constituyen un componente importante de las variaciones climáticas y tienen la ventaja de poder ser tratados matemáticamente. A este estudio se tiene que unir el otro, el que atañe a los otros componentes de las variaciones climáticas" (Milankovitch, 1920).

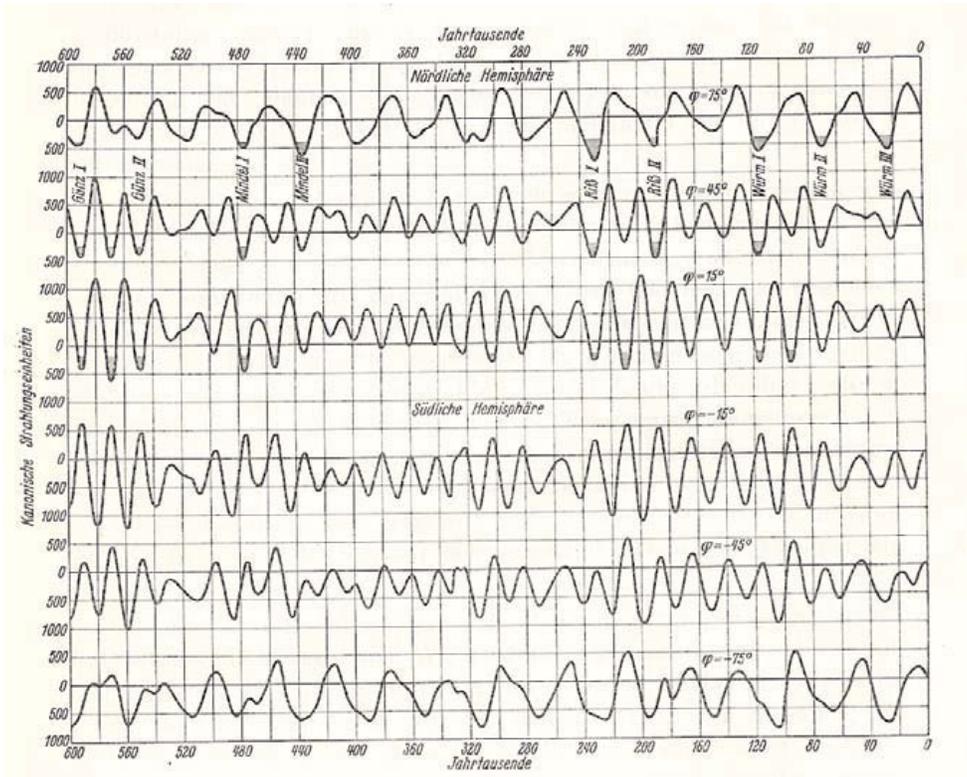


Figura 2.- Curvas de insolación de Milankovitch

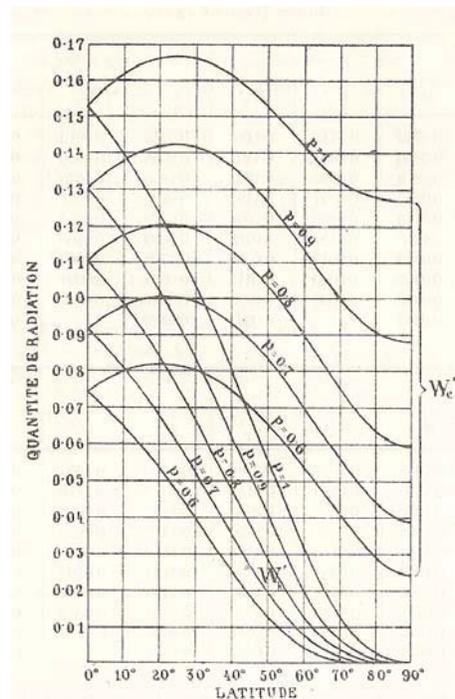


Figura 3.- Curvas de insolación semianual

De los resultados más conocidos que Milankovitch presenta en base a una teoría sistemáticamente elaborada con gran empeño, sólo exhibo dos muestras. Las llamadas curvas de insolación (la figura 2 muestra las curvas para seis latitudes distintas) resultan de sucesivas integraciones de $Q_{\downarrow}(0)$, cuyo valor anual varía de uno a otro año (por mor de causas astronómicas) y que, al remontarse hasta los 600 000 años en el pasado, abarcan un mínimo de cuatro glaciaciones. Las fluctuaciones observadas se deben a las variaciones seculares de los parámetros orbitales cual son su excentricidad, la oblicuidad del eje de rotación terrestre y la precesión de los equinoccios (véase, por ejemplo, Vázquez, 1998). La figura 3 enseña la insolación semianual media (normada, y donde los índices h y e se refieren a la estación de invierno y a la de verano, respectivamente), en función de la latitud y el "grado de transparencia" (p) de la atmósfera, siendo la curva correspondiente a $p=1$ un buen ejemplo de lo que había de ser, desde Halley, el resultado de las investigaciones teóricas: la distribución latitudinal de la insolación (instantánea o media) en el límite exterior de la atmósfera.

El problema teórico que planteaba Halley en 1693, amén de ser un ejercicio académico digno de grandes matemáticos, es considerado hoy como fundamental en toda teoría del clima. No solamente permite entender las estaciones del año, sino que es imprescindible poder calcular la insolación milenaria para entender mejor las condiciones de las glaciaciones, y no hay teoría actual del paleoclima que no tenga en cuenta las variaciones de insolación: "Modelos sofisticados son empleados para explorar cómo la insolación, y en particular su distribución respecto de la latitud y durante el año, fuerzan el clima" (Loutre, 2002).

Referencias

- Acosta, J. de.** 1985: Historia natural y moral de las Indias. (Edición original, Sevilla 1590.) Fondo de Cultura Económica, México.
- Beer, A.,** 1854: Grundriss des photometrischen Calcüles (Fundamento del cálculo fotométrico). Vieweg, Braunschweig.
- Bouguer, P.,** 1729: Essai d'optique sur la gradation de la lumière. París.
- De Mairan, J.J. d'Ortous,** 1719: Sur la cause générale du froid en Hiver, et du chaud en Été. Mém. de l'Acad. R. des Sci., 104-135.
- De Mairan, J.J. d'Ortous,** 1721: Sur le Memoire de la Cause generale du Froid en Hiver, et de la Chaleur en Été. Mém. de l'Acad. R. des Sci., 8-17.
- De Mairan, J.J. d'Ortous,** 1765 (1768): Nouvelles Recherches sur la cause générale du chaud en Été & du froid en Hiver, en tant qu'elle se lie à la chaleur interne & permanente de la Terre. Mém. De l'Acad. R. des Sci., 143-266.
- Emden, R.,** 1913: Ueber Strahlungsgleichgewicht und atmosphaerische Strahlung (Sobre equilibrio radiativo y radiación atmosférica). Sitzungsber. d. Koenigl. Bayer. Ak. d. Wissen., Munich, 55-142.
- Euler, L.,** 2004: Determinatio caloris et frigoris graduum pro singulis terrae locis ac temporibus. Comm. academ. Petropolitanae 11, (1739), 1750. En Leonhardi Euleri Opera omnia, Series Tertia, Opera Physica, Miscellanea, Volumen X. Birkhauser, Basilea, 2004.
- Halley, E.,** 1693: A discourse concerning the proportional heat of the sun in all latitudes, with the method of collecting the same. Philos. Trans. Roy. Soc. London, Vol. XVII, 878-885.
- Humboldt, A. von,** 1817: Des lignes isothermes et de la distribution distribution de la chaleur sur le globe. Memories de physique et de chimie de la Société d'Arcueil. Vol. III, 462-602.
- Kirwan, R.,** 1789: Estimation de la température de différens degrés de latitude (obra traducida del original inglés de 1787). Chez Cuchet, París.
- Lambert, J.H.,** 1760 (1997, para esta versión francesa): Photometrie. L'Harmattan, París.

- Lambert, J.H.**, 1779: Pyrometrie oder vom Maasse des Feuers und der Wärme (Pirometría o de la medida del fuego y del calor). Haude & Spener, Berlín.
- V. Lindenau, B.**, 1807: Beyträge zu einer Geschichte merkwürdiger Winde. (Contribuciones a una descripción de los vientos notables.) Monatliche Correspondenz, XV, 40-68.
- Loutre, M.F.**, 2002: Ice Ages (Milankovitch Theory). Encyclopedia of Atmospheric Sciences, Vol. III, Academic Press, San Diego.
- Mayer, T.**, 1775: De variationibus thermometri accuratius definiendis. Opera inedita I (Ed. G. Chr. Lichtenberg), Gotinga.
- Meech, L.W.**, 1856: On the Relative Intensity of the Heat and Light of the Sun upon Different Latitudes of the Earth. Smithsonian Contributions to Knowledge, Washington.
- Meinardus, W.**, 1899: Die Entwicklung der Karten der Jahres- Isothermen von A. v. Humboldt bis auf H.W. Dove (Evolución de los mapas de la isothermas anuales de Humboldt a Dove). En: Wissenschaftliche Beiträge zum Gedächtniss der hundertjährigen Wiederkehr des Antritts von Alexander von Humboldt's Reise nach Amerika (volumen conmemorativo del centenario del viaje de Humboldt a América). Kuehl, Berlín.
- Milankovitch, M.**, 1920: Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. Gauthier Villars et Cie., Paris.
- Milankovitch, M.**, 1930: Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwankungen (Teoría matemática del clima y teoría astronómica de las fluctuaciones del clima). Vol. I del Handbuch der Klimatologie (Manual de climatología) der Köppen & Geiger, Gebrueder Borntraeger, Berlín.
- Milankovitch, M.**, 1941: Kanon der Erdbestrahlung (Canon de la insolación terrestre). Academia Real de Serbia, Belgrado.
- Poisson, D.**, 1835: Théorie mathématique de la chaleur. Bachelier, Paris.
- Pouillet, M.**, 1838: Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique et sur la température de l'espace. Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences, 48 pp.
- Prevost, P.**, 1809: Du calorique rayonnant. Paschoud, Paris. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 1996: Vocabulario científico y técnico (3a edición). Espasa, Madrid.
- Vázquez Abeledo, Manuel**, 1998: La historia del sol y el cambio climático. McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid.
- Wiener, Chr.**, 1876: Über die Stärke der Bestrahlung durch die Sonne in ihren verschiedenen Breiten und Jahreszeiten (Sobre la intensidad de la irradiación por el Sol en diferentes latitudes y estaciones). Braun'sche Hofbuchdruckerei, Karlsruhe.
- Zenker, W.**, 1888: Die Vertheilung der Wärme auf der Erdoberfläche (La distribución del calor sobre la superficie terrestre). Jul. Springer, Berlín.