



AZARES DEL CLIMA

POR JOSÉ ANTONIO LÓPEZ DÍAZ

Puntos críticos del Sistema Climático

En el Sistema Climático muchos procesos en escalas de tiempo pequeñas son aproximables linealmente. Los sistemas lineales son básicamente predecibles, su respuesta frente a pequeñas perturbaciones se puede acotar, y por tanto no deparan grandes sorpresas. En cambio los sistemas no lineales pueden mostrar evoluciones que súbitamente (frente a las escalas temporales de referencia) experimentan cambios importantes tras sobrepasar un determinado umbral. En este caso se habla de que el sistema presenta un punto crítico o de inflexión (*tipping point*). A estos puntos críticos del Sistema Climático está dedicada la extensa publicación *Global Tipping Points Report 2023* de la universidad de Exeter. Esta publicación contiene un tratamiento detallado de muchos aspectos relacionados con los puntos críticos, desde su definición y discusión conceptual, pasando por el análisis de los puntos críticos en la círosfera, la biosfera, circulaciones atmosféricas y oceánicas, nubes, sensibilidad climática dentro del Sistema Climático. Además aborda con profundidad los impactos de estos potenciales fenómenos, y también se adentra en los puntos críticos de la respuesta socioeconómica de la humanidad.

El Sistema Climático contiene muchos ejemplos de dinámica no lineal que sabemos que tienen, o pueden potencialmente tener, puntos críticos, en algunos casos con consecuencias catastróficas. En estos casos el tratamiento del riesgo es muy complejo. El paradigma clásico para el tratamiento de riesgos combina la probabilidad del suceso con sus consecuencias debidamente valoradas, para estimar la esperanza matemática como producto de la probabilidad por el valor de la pérdida asociada a cada suceso. Esto proporciona una escala que permite comparar diferentes riesgos.

Pero a medida que la pérdida potencial crece y la probabilidad asociada decrece esto deja de tener sentido, básicamente porque el esquema basado en la esperanza matemática presupone para su racionali-

dad la posibilidad de repeticiones, como sucede en los juegos de azar mientras las sumas apostadas no conduzcan a la bancarrota de algún participante, y de hecho del análisis de este caso surgieron estas ideas¹.

Pero cuando hablamos de consecuencias catastróficas, de una escala enorme, la idea de repetición resulta inadecuada o problemática, y con ello la de esperanza matemática de la perdida para valorar el riesgo. Por poner un ejemplo sencillo, la mayoría de nosotros no consideramos que sea lo mismo jugar cien euros en una lotería con una posibilidad entre diez mil de ganar, que jugar cien mil euros en una lotería con una posibilidad entre diez millones de ganar, aunque en términos de esperanza matemática de la ganancia son equivalentes.

Pero, además de este problema conceptual, sucede que las probabilidades, cuanto más bajas, mayor suele ser el error relativo que se comete al estimarlas, lo que se explica porque al situarse muy allá en la cola de las distribuciones los detalles de estas se desdibujan rápidamente. Otro tanto sucede con la estimación de las consecuencias de sucesos catastróficos, y por razones similares en lo esencial. En suma la incertidumbre de cualquiera de los parámetros de descripción de estos sucesos singulares se dispara. Además, como se sabe desde antiguo, los riesgos que no dan señales de alarma son a menudo los peores².

Probablemente los puntos críticos más alarmantes son los que provienen de la círosfera, no en vano los últimos 2.5 millones de años, el periodo Cuaternario, han estado dominados climáticamente por la sucesión de glaciaciones y períodos interglaciares. Los principales puntos críticos de la círosfera que reseña el informe, todos ellos con un periodo de siglos-milenarios, son:

En cambio, para el hielo marino ártico en verano el informe constata que, según las últimas investigaciones, el temor a un proceso no lineal acelerado de desaparición inducido por la retroalimentación del albedo³ no tendría fundamento, al compensarse esta retroalimentación hielo-albedo positiva por retroalimentaciones negativas en invierno. El efecto total es una respuesta aproximadamente lineal de la extensión de hielo marino ártico veraniego al calentamiento global.

Un aspecto novedoso de la publicación es que aborda también, con bastante detalle, los "puntos críticos" (definidos por analogía con los de un sistema físico) en la evolución socioeconómica de la humanidad en lo relativo a la emisión de gases de efecto invernadero. Se incluyen la posible irrupción en el mercado de los vehículos eléctricos una vez superado un umbral de precio, o la expansión masiva de las fuentes de energía renovables. Aquí echo en falta que no se mencione el punto crítico que supondrá, según las previsiones de los expertos, la irrupción de la energía de fusión en algunos decenios. Esta tiene el potencial de transformar radicalmente el panorama energético de la humanidad, pasando de usar la energía solar como hasta ahora (en forma fósil en los combustibles fósiles, como radiación recibida o en forma de energía cinética del viento) a tener múltiples mini-soles en la Tierra. O en una escala menor, el potencial del hidrógeno como vector y reservorio energético en combinación con las energías renovables, potencialmente resolviendo el talón de Aquiles de las renovables, su almacenamiento.

Referencias

● *Global Tipping Points (report 2023)*

University of Exeter (Global Systems Institute)

<https://global-tipping-points.org/>

Región	Umbral crítico del calentamiento global, en °C	Elevación del nivel del mar (máx), en m
Capa de hielo de Groenlandia	0.8 - 3	7
Capa de hielo de la Antártida Occidental	1 - 3	3
Cuencas marinas de la Antártida Oriental	2 - 6	19
Capa hielo no marino de la Antártida Oriental	6 - 10	34

¹ En 1654, considerado el año "oficial" del surgimiento de la ciencia de la probabilidad, Pascal y Fermat resolvieron un problema que llevada más de un siglo preocupando a los matemáticos de la época, en especial a los italianos desde el siglo XVI. Se trataba de dos jugadores que apuestan inicialmente una suma determinada, el que gana se lleva todo. Se supone entonces que la autoridad irrumpe antes de la finalización del juego (en esa época eso podía perfectamente suceder pues las autoridades a menudo prohibían los juegos de azar). La pregunta es cómo repartir justamente la suma apostada entre los dos jugadores, en casos en que uno lleva ventaja respecto al otro en sentido probabilístico. La solución que dieron Pascal y Fermat empleaba el concepto de esperanza matemática aunque sin formular con precisión esta idea proporcional a las probabilidades de ganar de cada jugador. Esto corresponde, en lenguaje moderno, a asignar a cada jugador su esperanza matemática de ganancia.

² "Quod apud Bactrianos vulgo usurabant, ...altissima quaeque flumina minimo sono labunt", *Historiae Alexandri Magni* of Q. Curtius Rufus (traducido, "Lo que se solía decir entre los bactrianos, los ríos más profundos fluyen casi sin ruido"

³ Al ser el albedo del mar mucho menor que el del hielo, la desaparición de este reduce el albedo, lo que a su vez aumenta la absorción de energía solar de la superficie, acelerándose la desaparición del hielo.