

## Matemáticas para el planeta Tierra, ciencia para el bienestar humano\*

por

Miguel A. Herrero

RESUMEN. Exponemos algunas cuestiones cuyo estudio forma parte de la iniciativa *Matemáticas para el Planeta Tierra*. Los temas elegidos, que se describirán prescindiendo de sus detalles técnicos, son ejemplos de problemas relevantes para la humanidad y en cuya resolución las Matemáticas están llamadas a jugar un papel importante.

### 1. INTRODUCCIÓN

En este año 2013 se están desarrollando numerosos actos que subrayan el papel de las Matemáticas en el estudio de nuestro mundo. Muchas de ellas se enmarcan en la iniciativa MPE, Matemáticas para el Planeta Tierra (*Mathematics of Planet Earth*, <http://mpe2013.org>) patrocinada por la Unesco. Como indican sus promotores:

*El término «Matemáticas del Planeta Tierra» debe ser entendido en el sentido más amplio posible. Además de cuestiones como cambio climático y sostenibilidad, se incluyen allí campos como la geofísica, ecología y epidemiología, biodiversidad y en general la organización global del planeta por los seres humanos. Estos diferentes contenidos pueden clasificarse en cuatro apartados:*

***Un planeta por descubrir:*** océanos, meteorología y clima, procesos del manto terrestre, recursos naturales.

***Una planeta que alberga vida:*** ecología, biodiversidad, evolución.

***Un planeta organizado por seres humanos:*** sistemas políticos, económicos y financieros; gestión de recursos y energía, educación, salud.

***Un planeta en peligro:*** cambio climático, desarrollo sostenible, epidemias, desastres naturales.

En cuanto a los objetivos de esta iniciativa, podemos resumirlos así:

1. *Fomentar la investigación encaminada a identificar y resolver cuestiones fundamentales referentes al mundo en que vivimos.*
2. *Animar a educadores de todos los niveles a difundir las cuestiones mencionadas en el punto anterior.*

---

\*Con este artículo, LA GACETA quiere contribuir a la iniciativa *Matemáticas para el Planeta Tierra*, que bajo el patrocinio de la Unesco se celebra a lo largo de 2013.



3. *Informar al público acerca del papel esencial que juegan las ciencias matemáticas para evaluar y remediar las amenazas que pesan sobre nuestro planeta.*

Así pues, la iniciativa MPE pretende llamar la atención de la comunidad matemática en particular, y del público en general, sobre los graves problemas que en estos momentos afectan a la especie humana en la Tierra. Dentro de este marco general, las pretensiones de este artículo son muy limitadas. No se trata de reseñar aquí, ni siquiera de forma parcial, las actividades más destacadas que se han realizado o se están aún llevando a cabo en el marco de la iniciativa MPE. Me conformaré con describir brevemente algunos de los temas relacionados con esta iniciativa que en mi opinión son especialmente relevantes.

## 2. EL TEMA DE NUESTRO TIEMPO

En el inicio de este siglo la humanidad afronta problemas acuciantes, de cuya resolución depende la propia existencia de nuestra especie. Entre todos ellos, llama poderosamente la atención un cúmulo de cuestiones asociadas a la consecución y consolidación del bienestar humano, y que podríamos resumir así:

*¿Cómo podemos suministrar alimentos, agua potable, aire limpio, alojamiento, cuidados sanitarios, educación y energía a una población que ronda los 7000 millones de personas? Más aún, ¿cómo podemos hacerlo sin comprometer de manera irreversible las posibilidades de vida en la Tierra?*

Para abordar estas cuestiones, necesitamos saber mucho más del funcionamiento de nuestro planeta (incluyendo el de los seres vivos que habitan en él), y de cómo afectan nuestras acciones a este funcionamiento. Por ejemplo, es preciso predecir la evolución del clima para poder estimar su impacto (regional y global) en la producción de alimentos, la disponibilidad de recursos hídricos, la propagación de enfermedades transmitidas por vectores animales, los flujos migratorios humanos y los conflictos políticos y militares que aquellos pueden generar. La necesidad de realizar estudios detallados sobre estas cuestiones no ha pasado desapercibida a organismos internacionales y a centros de estudios prospectivos ([9], [10], [13], [23]).

En los países desarrollados se plantean además cuestiones específicas, relacionadas por ejemplo con el envejecimiento de la población, el consiguiente incremento en

las enfermedades degenerativas y la forma de garantizar recursos económicos para hacer frente a esta situación. Por otra parte, no podemos olvidar que el mantenimiento de nuestro sistema productivo y de nuestras condiciones de vida dependen del uso de recursos naturales (materias primas, energía,...), que en algún caso comienzan a escasear a escala planetaria, y del correcto funcionamiento de un tejido económico de cuya fragilidad somos cada vez más conscientes.

### 3. ¿POR QUÉ LAS MATEMÁTICAS?

La resolución de problemas tan serios como los anteriores no es posible sin la intervención de líderes políticos a la altura de los desafíos planteados. Ahora bien, para adoptar decisiones políticas adecuadas hace falta una estimación precisa y fiable de las consecuencias de las iniciativas consideradas. Esta valoración solo nos la pueden dar la ciencia y la tecnología.

Dentro del apartado estrictamente científico, la contribución de las Matemáticas es especialmente relevante por su capacidad para proporcionar herramientas precisas para distinguir causas y efectos entre lo que se nos presenta como una acumulación, confusa y abrumadora, de datos y hechos experimentales. Por otra parte, las Matemáticas permiten explorar de manera sumamente detallada las consecuencias lógicas de hipótesis claramente planteadas. En el curso de ese proceso no solo ayudan a obtener respuestas, sino también a formular preguntas relevantes, lo que a menudo es aún más importante. Para alcanzar estos objetivos, un método básico consiste en la formulación y el estudio de modelos, tan simples como para admitir un estudio analítico y a la vez suficientemente realistas como para describir y predecir hechos reales significativos.

Ahora bien, para contribuir eficazmente a la resolución de las cuestiones anteriores no basta con una mera aplicación de técnicas matemáticas ya existentes, por muy útiles que estas puedan resultar. De hecho, gran parte de la problemática que nos apremia se puede englobar bajo el apartado genérico de Ciencias de la Complejidad, cuyo objetivo es el análisis de comportamientos emergentes en poblaciones, con frecuencia muy numerosas, que se relacionan entre sí en distintas escalas espaciales y temporales. Las reglas de interacción entre elementos de esas poblaciones incorporan con frecuencia estrategias de decisión individual, conscientes o no, y no siempre racionales. Para avanzar en la resolución de los problemas correspondientes se hace preciso contar con equipos interdisciplinares, que puedan desarrollar y utilizar métodos matemáticos y estadísticos que en estos momentos solo podemos conjeturar.

En lo que sigue describiré algunos ejemplos para ilustrar la problemática que acabo de describir.

### 4. ¿HAY AGUA PARA TODOS?

Hay pocas dudas de que un suministro adecuado de agua potable es imprescindible para el mantenimiento de cualquier sociedad humana. Ahora bien, si nos

preguntamos ¿qué suministro de agua consideramos adecuado?, o ¿qué suministro es el que podemos garantizar?, nos encontraremos de inmediato ante escenarios inquietantes.

Consideremos el caso de España. Nuestro país es uno de los cinco mayores consumidores mundiales de agua potable *per cápita*, con un uso cercano a los 2000 metros cúbicos por habitante y año en el periodo 2005–2010 [14]. Por otra parte, España es un país en el que el riesgo de desertificación es muy importante: dos terceras partes de nuestro territorio están amenazadas por este proceso (de ellas, un 30 % de forma grave), mientras que más de un 5 % se considera ya irremediablemente perdido (ver detalles en [15]).

De hecho, un gran desierto en expansión, el Sahara, se encuentra no lejos de nuestras fronteras. En muchas de las áreas que hoy ha invadido, habitaban jirafas e hipopótamos hace unos 6000 años.<sup>1</sup> En fechas más recientes, en el siglo V a.C., Herodoto de Halicarnaso aún describía en el norte de África extensas regiones arboladas, aunque la presencia de territorios áridos era ya muy significativa [7]. En nuestros días, el avance implacable de este desierto hacia el centro de África está alterando de manera dramática la estructura económica y social de países enteros. Este hecho ha contribuido al incremento de la inestabilidad política en la zona y a la formación de fuertes flujos migratorios hacia Europa, cuyo coste humano para los países emisores es devastador.

Si prestamos atención a lo que ocurre en otras regiones del planeta, el panorama se vuelve aún más amenazador. En grandes regiones de Asia que incluyen Oriente Medio, Asia Central, China, India y Pakistán (en las que habitan dos terceras partes de la población del planeta), el acceso al agua potable es ya un problema acuciante, capaz de aumentar significativamente el riesgo de inestabilidad política [6], y la situación empeoraría en el caso de persistencia de condiciones climáticas desfavorables. Por otra parte, la sequía no sería el único efecto temible de un cambio climático que aumente de manera apreciable la temperatura media de la Tierra. Por ejemplo, tal hecho podría tener serias consecuencias en la propagación de enfermedades graves como la malaria, que afecta cada año a más de 200 millones de personas y causa cerca de un millón de muertes al año,<sup>2</sup> todo ello sin contar la carga agobiante que el cuidado de los enfermos impone a sus familias en países que con frecuencia carecen de servicios sanitarios básicos.

¿Qué puede hacer la Ciencia, y en concreto las Matemáticas, ante situaciones como esta? Nos limitaremos aquí a señalar dos aspectos: la elaboración de modelos predictivos fiables, y la detección precoz de crisis antes de que estas se produzcan.

## 5. MODELOS Y ORÁCULOS. MARGARITAS Y CISNES NEGROS

Uno de los grandes retos científicos de nuestro siglo es la elaboración y el estudio de modelos matemáticos que permitan describir, a corto y medio plazo, la evolución

---

<sup>1</sup>Algunas pinturas rupestres del Sahara argelino en las que aparecen especies ya extinguidas en esa zona pueden verse aquí: <http://www.arqfdr.rialverde.com/1-Prehistoria/tassili.htm>

<sup>2</sup>Para más información sobre la malaria, véase [http://www.malariaconsortium.org/programme\\_profiles.php](http://www.malariaconsortium.org/programme_profiles.php)

del clima en nuestro planeta y el efecto de la actividad humana sobre el mismo, tanto a escala local como global [11].<sup>3</sup> En términos técnicos, los problemas a resolver están relacionados con el estudio de movimientos de fluidos descritos por ecuaciones de tipo Euler y Navier-Stokes, cuyo análisis detallado en tres dimensiones espaciales (las dimensiones del mundo en que vivimos) es, para muchos, uno de los problemas matemáticos más difíciles planteados hasta la fecha.<sup>4</sup>

¿Qué esperamos de un modelo matemático? Fundamentalmente, buscamos predecir acontecimientos futuros a partir del conocimiento de las leyes que gobiernan los procesos considerados en cada caso, y con ayuda de información adicional (condiciones iniciales, datos en la frontera del dominio considerado, . . .) suficiente. Esta es una pretensión perfectamente razonable. Ahora bien, con frecuencia las predicciones de un modelo resultan ir en contra de nuestra intuición (lo que no siempre nos gusta) y a veces lo que nos gustaría poder predecir es . . . lo impredecible. Examinemos brevemente estas observaciones.

Una característica notable de los modelos matemáticos, y una de las razones principales de su utilidad, es que con frecuencia proporcionan resultados sorprendentes. Consideremos un ejemplo simple. ¿Qué relación hay entre la temperatura de la Tierra y la energía que le llega del Sol? Una respuesta intuitiva y razonable es que la primera crece con la segunda: a más luminosidad solar, mayor temperatura en el planeta. Sin embargo, esta afirmación ignora un hecho crucial: la existencia de seres vivos en la Tierra permite regular la temperatura, de modo que una redistribución de las especies puede mantener una temperatura estable de equilibrio, incluso en presencia de incrementos considerables de la energía solar que llega hasta nosotros. El reconocimiento de este hecho es muy reciente, y solo se abrió paso cuando se pudo formular un modelo matemático simple, capaz de explicar de forma clara y convincente este inesperado fenómeno de regulación.

El modelo en cuestión es el mundo de las margaritas (*Daisyworld*) de Watson y Lovelock [27], un planeta ideal en el que solo hay dos especies vivas: margaritas blancas y margaritas negras. Las primeras reflejan la luz solar más que las segundas, por lo que los terrenos ocupados por unas y otras absorben distintas proporciones de la energía que les llega desde el exterior. Gracias a esta diferencia, los dos tipos de margaritas pueden controlar su distribución global, ocupando mayor superficie las unas o las otras de modo que se mantenga estable la temperatura media del planeta, incluso bajo importantes incrementos de la energía solar. Así pues, los seres vivos son capaces de regular las condiciones ambientales para mantenerlas de forma estable.

Lamentablemente, no todo son buenas noticias en este campo. El estudio detallado de este tipo de escenarios muestra que, al aumentar la complejidad de las interacciones, es posible alcanzar regiones críticas en las que la estabilidad del sistema global formado por la materia viva y la materia inorgánica requiera la eliminación de la primera. Esta situación dramática, que podría ser desencadenada por la acción

---

<sup>3</sup>Una breve descripción de estudios de predicción meteorológica en los que participa la Agencia Española de Meteorología (AEMET) pueden verse en <http://www.aemet.es/es/idi/prediccion>

<sup>4</sup>Ver, por ejemplo, [http://www.claymath.org/millennium/Navier-Stokes\\_Equations/](http://www.claymath.org/millennium/Navier-Stokes_Equations/)

irreflexiva de la humanidad sobre su medio ambiente, quizás no esté muy lejana en estos momentos [12].

Por otra parte, a la hora de formular modelos se presenta otro reto de distinta naturaleza. Me refiero a la posibilidad de predecir fenómenos muy improbables pero capaces de producir efectos masivos, de los que me ocuparé ahora brevemente.

Aunque no nos gusta que nos lo recuerden, estamos siempre expuestos a la visita de un cisne negro. En la terminología de Taleb [24], este término describe un acontecimiento que reúne tres cualidades: es totalmente inesperado, su aparición produce un efecto masivo que altera radicalmente el medio en el que se produce y, una vez observado, su importancia nos lleva a intentar explicarlo mediante teorías diseñadas al efecto (suponiendo, claro está, que sobrevivamos a él). Huelga decir que tales teorías son en general inútiles, ya que el siguiente cisne negro será muy distinto, y tan impredecible como el anterior. No es difícil encontrar en la historia sucesos que se ajustan a estas descripciones. Ahora bien, el catálogo de cisnes pasados nos sirve de poco para anticipar la llegada y la naturaleza del próximo ejemplar.

¿Pueden las Matemáticas decir algo al respecto? Sí, aunque para ello tendremos que desarrollar mucho más campos ya existentes y, tal vez, crear otros nuevos. A continuación expondremos algunas observaciones sobre este asunto.

## 6. ¿CÓMO DETECTAR LA TORMENTA QUE SE AVECINA? ¿QUÉ HAY QUE HACER CUANDO LLEGUE?

¿Es posible predecir la llegada de una crisis antes de que esta se manifieste de manera declarada y sea ya demasiado tarde para prevenir sus efectos?

Los antiguos nos hablan con frecuencia de hechos extraordinarios que anteceden y anuncian las catástrofes. Así, Tito Livio enumera los prodigios que conmovieron a la ciudad de Roma avisando del avance de Aníbal [26], y durante siglos la aparición de cometas se consideró como presagio de acontecimientos trascendentales, generalmente funestos.<sup>5</sup> Sin embargo, la aproximación matemática a este problema no consiste tanto en interpretar prodigios como en analizar en detalle la estructura de los acontecimientos cotidianos, que tal vez contienen ya el germen de una crisis en gestación. Por ejemplo, Marten Scheffer, Jordi Bascompte y sus coautores se plantean en [21] descubrir aquellas características de los modelos matemáticos que representan sistemas complejos, desde ecosistemas hasta mercados financieros, que permitan detectar umbrales de crisis en sistemas que aún están operando con aparente normalidad. Mencionaremos solo una de las conclusiones de este trabajo. Según sus autores:

*«Cuando el sistema se aproxima a un punto crítico, se recupera cada vez más lentamente de los cambios inducidos por pequeñas perturbaciones.»*

<sup>5</sup>Un ejemplo magnífico lo proporciona el tapiz de Bayeux, en el que la aparición de un cometa (identificado mucho después con el cometa Halley) anuncia la invasión de Inglaterra por los normandos y la muerte del rey Harold in 1066. Véase, por ejemplo, [http://en.wikipedia.org/wiki/Bayeux\\_Tapestry](http://en.wikipedia.org/wiki/Bayeux_Tapestry)

El método empleado para llegar a esta conclusión consiste en el estudio detallado de los llamados sistemas dinámicos, y en concreto de los cambios de comportamiento que ocurren cerca de sus bifurcaciones paramétricas.

Examinemos ahora una segunda cuestión. ¿Qué debemos hacer si nos vemos en medio de una catástrofe? Para responder a esta pregunta vale la pena revisar la página de la Agencia Federal de Tratamiento de Emergencias de Estados Unidos, FEMA.<sup>6</sup> Allí se contemplan diversos escenarios, incluyendo la respuesta a los desastres de mayor gravedad, auténticos cisnes negros conocidos como «maximum of maximum events».<sup>7</sup> En estos casos se plantea un objetivo ambicioso: restaurar en 72 horas un funcionamiento básico de los servicios en una región (tal vez una ciudad) sometida a gran devastación. La evaluación de la posible eficacia de los planes propuestos requiere simular diversas estrategias mediante modelos matemáticos adecuados, que deben utilizar técnicas muy variadas (optimización estocástica, minería de datos, métodos de decisión en presencia de incertidumbre, . . .). Nótese que en situaciones de emergencia se hace preciso partir de hipótesis alejadas de las habituales en los modelos matemáticos clásicos. En general, estos últimos presuponen dinámicas próximas a estados de equilibrio estables por un lado, y comportamiento racional de los agentes humanos involucrados por otro, hipótesis de cuya validez cabe dudar cuando estamos inmersos en el ojo del huracán.

## 7. SOCIEDADES HUMANAS: ENTRE LA COOPERACIÓN Y LA CONFRONTACIÓN

Somos muchos los habitantes de este planeta y hacemos un uso muy desigual de los recursos que este nos ofrece. La mitad de la población de la Tierra vive por debajo del umbral de la pobreza, estimado por la ONU en unos ingresos no superiores a un dólar por día. En estas condiciones, no es extraño que las sociedades que hemos construido sean inestables. Lo realmente sorprendente es que no lo sean aún más. De hecho, podemos preguntarnos si la estabilidad social es un comportamiento emergente que resulta de una multiplicidad de comportamientos individuales arbitrarios, o si es consecuencia de un orden necesario, impuesto por la fuerza por quienes nos gobiernan. Para muchos, la primera opción es simplemente absurda. Por ejemplo, un pensador como Thomas Hobbes, sostiene que:

*«En estado natural. . . la vida humana es solitaria, pobre, desagradable, brutal y breve, . . . una guerra de todos contra todos. . . »*<sup>8</sup>

Ahora bien, aun aceptando la necesidad de coacción social, ¿será posible eliminar los comportamientos antisociales (o criminales), que hacen de la vida humana «una guerra de todos contra todos»? Oigamos a uno de los padres de la sociología contemporánea, Emile Durkheim [3]:

<sup>6</sup><http://www.fema.gov>

<sup>7</sup>Las posibles estrategias a seguir ante uno de estos «maximum of maximum events» pueden consultarse en [http://www.fema.gov/about/2011\\_14\\_strategic\\_plan\\_faq.shtm](http://www.fema.gov/about/2011_14_strategic_plan_faq.shtm)

<sup>8</sup>Una descripción detallada de la evolución del concepto del «buen salvaje», incluyendo las opiniones de Hobbes, se puede encontrar aquí: [http://en.wikipedia.org/wiki/Noble\\_savage](http://en.wikipedia.org/wiki/Noble_savage)

*«El crimen es normal, ya que una sociedad libre de crímenes es de hecho imposible. Esa es la primera y paradójica evidencia que hace surgir la reflexión sociológica.»*

De hecho, para Durkheim la necesidad de la sociología es consecuencia de la inevitabilidad de los comportamientos antisociales, del mismo modo que para muchos las Ciencias Económicas surgen como respuesta a la escasez de muchos recursos naturales.

¿Debemos pues confiar en que nuestros dirigentes nos impongan las medidas adecuadas para el mejor funcionamiento colectivo, por incómodas que nos puedan parecer sus decisiones? Desgraciadamente, las dudas al respecto están justificadas. Hablando de los procesos de selección de cargos de responsabilidad en sociedades avanzadas, y tomando como ejemplos la elección de profesores universitarios, pontífices romanos o presidentes de los Estados Unidos, Max Weber [28] observaba que:

*«Debido a las leyes de la cooperación entre los hombres... no hay que extrañarse de que con frecuencia se den errores... sino de que el número de nombramientos acertados sea, a pesar de todo, muy significativo.»*

Las reflexiones anteriores nos llevan a relativizar la importancia de las normas impuestas y a considerar con más atención el papel de los comportamientos sociales emergentes. La caracterización de tales comportamientos (entre los que puede incubarse —cómo no— algún que otro cisne negro) es, en la actualidad, uno de los temas más atractivos en el estudio de los Sistemas Complejos. Este estudio dista mucho de ser fácil. De hecho, las paradojas que surgen al comparar comportamientos individuales y colectivos han sido puestas de manifiesto con reiteración. Por ejemplo, uno de los fundadores de la economía contemporánea, Adam Smith, consideraba que los mercados competitivos, aunque basados en el estricto interés individual, tienden a favorecer intereses sociales amplios,<sup>9</sup> afirmación cuya veracidad supondría un gran consuelo para todos.

Entre los posibles comportamientos sociales emergentes, hay uno que ha generado gran interés entre sociólogos y biólogos: el altruismo. Me refiero a la capacidad de aceptar sacrificios, incluso de entregar la propia vida, por el beneficio de la comunidad a la que el individuo altruista pertenece. Para Charles Darwin, la paradoja entre interés individual e interés colectivo se manifiesta con claridad en este caso:

*«Quien está dispuesto a sacrificar su vida antes que a traicionar a sus camaradas, pocas veces dejará descendientes a quien transmitir su noble naturaleza... Por ello parece poco posible que el número de personas dotadas de tales virtudes crezca por selección natural, es decir mediante la supervivencia del mejor adaptado...» ([2], pág. 111)*

Sin embargo, un poco más adelante en la misma obra leemos lo siguiente:

---

<sup>9</sup>Véase el apartado dedicado a la historia de la economía en <http://en.wikipedia.org/wiki/Economics>

*«Una tribu en la que haya muchos miembros que, poseyendo un alto espíritu de patriotismo, fidelidad, valor, obediencia... estén siempre dispuestos a ayudarse entre sí y a sacrificarse por el bien común, triunfaría sobre la mayor parte de las demás tribus, y esto daría lugar a una selección natural.»* ([2], pág. 115)

El análisis del altruismo como comportamiento emergente es, en la actualidad, objeto de considerable atención ([4], [17], [20]). Podemos considerarlo como una más entre las piezas del extenso mosaico de conductas cuyo análisis puede abordarse mediante los métodos de la teoría de juegos y el estudio de sistemas dinámicos. El estudio y caracterización de comportamientos sociales emergentes y su simulación eficaz constituyen para muchos una de las nuevas fronteras de la Ciencia en el siglo XXI. El lector interesado encontrará ejemplos e información adicional sobre esta problemática en ([1], [8], [18]).

## 8. CONVIVIR CON EL ENEMIGO

Nuestro último ejemplo trata del principal factor de mortalidad en países desarrollados: las enfermedades. Durante el último siglo hemos visto disminuir considerablemente, e incluso en algún caso desaparecer, la amenaza que suponían padecimientos considerados como temibles desde el origen de la humanidad: pensemos por ejemplo en la viruela o en las diversas clases de infecciones causadas por microorganismos. Sin embargo, han aparecido riesgos nuevos y se ha mantenido, e incluso incrementado, la amenaza causada por trastornos hace tiempo conocidos, como las enfermedades cardiovasculares y el cáncer. A este último dedicaremos unas observaciones a continuación.

Aunque no constituye en estos momentos la primera causa de mortalidad en países desarrollados [16], el cáncer es probablemente la enfermedad que más temor inspira a la población en dichos países. En los años 70 del pasado siglo, en un momento de euforia ante los éxitos resonantes de la ciencia y tecnología de la época, y en una situación de bonanza económica, el líder de la nación más poderosa de la Tierra consideró llegado el momento de acabar definitivamente con ese azote de la humanidad. En concreto, en su discurso anual sobre el Estado de la Unión en 1970, el Presidente Richard Nixon dijo lo siguiente:

*«Voy a solicitar una partida extra de 100 millones de dólares para lanzar una campaña intensiva para encontrar una cura para el cáncer, y pediré después cuantos fondos puedan ser usados eficazmente [para este fin]. Ha llegado en América el momento en que el mismo tipo de esfuerzo concentrado que logró la fisión del átomo y llevó el hombre a la Luna sea dirigido hacia la conquista de esta temible enfermedad. Proponemos un compromiso nacional total para conseguir este objetivo.»*

Cuarenta años después, y a pesar de los grandes esfuerzos desplegados en esta dirección, la guerra contra el cáncer no ha sido ganada. De hecho, las estadísticas en Estados Unidos apuntan al mantenimiento de la tasa de mortalidad por esta

enfermedad en los últimos 50 años,<sup>10</sup> y la situación es particularmente sombría en lo que se refiere a la tasa de supervivencia a cinco años en tumores diseminados.<sup>11</sup> ¿Por qué hemos sido incapaces de derrotar a este enemigo? ¿Será que no hemos invertido los recursos suficientes? ¿O tal vez este enemigo es invencible?

Tendemos a pensar que esta última posibilidad debe ser rechazada, y que una cura para el cáncer (y una solución para cualquier problema) debe existir, y solo las limitaciones de nuestra inteligencia, o de nuestros medios, nos impiden dar con ella. Sin embargo, en los últimos años se ha ido abriendo paso la idea de que, al menos en una proporción considerable de casos, podríamos estar ante un enemigo al que muchas veces no se podrá derrotar, pero con el que tal vez sea posible acordar una coexistencia razonable. En esta delicada tarea diplomática, las Matemáticas pueden suministrar negociadores expertos.

Consideremos una situación en apariencia muy distinta: las plagas del campo. Desde el origen de la historia escrita tenemos constancia del terror al hambre producida por cosechas insuficientes, debidas a fenómenos naturales (sequía u otros) o al azote de insectos voraces: piénsese en la plaga bíblica de la langosta en Egipto. En épocas recientes, poseedores de formidables arsenales químicos, hemos concebido la esperanza de acabar de una vez por todas con las plagas de insectos... hasta que hemos comprendido que ello no es posible.

Un ejemplo lo proporciona la *plutella xylostella*, que ocasiona graves daños a los cultivos de col en Estados Unidos, estimados en más de mil millones de dólares al año [25]. A finales de los años 80 del pasado siglo, se comprobó que este parásito es resistente a todos los pesticidas conocidos, de modo que una plaga declarada no puede ser exterminada por medios químicos. La estrategia a seguir en este caso, y en otros similares, está descrita en la llamada Integrated Pest Management, IPT.<sup>12</sup> Sus principios básicos pueden resumirse así:

1. La erradicación total de una plaga invasora y diseminada es prácticamente imposible.
2. La heterogeneidad del fenotipo (esto es, la expresión del genotipo en función de un determinado ambiente) de la especie invasora y las condiciones ambientales dan lugar a la aparición de resistencia ante cualquier terapia.
3. Es posible controlar una plaga, pero para ello hace falta desplegar estrategias explícitamente diseñadas para este fin.
4. No hay que eliminar el mayor número posible de insectos, sino tan solo el mínimo necesario.
5. Los controles biológicos (por ejemplo, la introducción de especies que compiten con la plaga) son en general más eficaces que los químicos.

La idea fundamental que hay tras la estrategia IPT es que, con frecuencia, una plaga no está formada por una población única, sino que en ella coexisten diversas

---

<sup>10</sup>Véase <http://www.silverbook.org/fact/531>

<sup>11</sup>Un detallado estudio estadístico se encuentra en [19].

<sup>12</sup>Pueden encontrarse detalles sobre la IPT en <http://www.epa.gov/pesticides/factsheets/ipm.htm>

subespecies o tribus, alguna de las cuales resulta resistente al tratamiento químico empleado, cualquiera que sea este. Por ello, el uso enérgico de pesticidas solo consigue eliminar aquellas tribus sensibles a su uso, dejando así vía libre a la proliferación de las que son inmunes a ellos.

Una idea similar ha sido propuesta recientemente como base de una terapia adaptativa en el tratamiento de tumores [5]. Es sabido que la mortalidad producida por esta enfermedad está causada principalmente por la aparición de resistencia ante los tratamientos químicos o radiológicos. La terapia adaptativa propone considerar alternativas al uso terapéutico de dosis altas (por ejemplo, en quimioterapia) que buscan la eliminación total del tumor. En concreto, y partiendo de la hipótesis de que muchos tumores son heterogéneos y contienen líneas celulares distintas, y suponiendo que en ausencia de terapia las células más resistentes están menos adaptadas al medio que las menos resistentes, se plantea el objetivo de mantener de manera estable un volumen tumoral aceptable, convirtiendo así la enfermedad en crónica. El diseño práctico de tal estrategia requiere (entre otras cosas) desarrollar nuevos métodos matemáticos, y no es casualidad que alguno de los centros en los que se están estudiando estas técnicas reúnan bajo un mismo techo a grupos de investigación clínicos y matemáticos.<sup>13</sup>

## 9. A MODO DE CONCLUSIÓN

Hemos revisado brevemente un conjunto de problemas que van desde el cambio climático a nuevas terapias antitumorales, mencionando por el camino cuestiones relacionadas con los lazos que mantienen unidas a nuestras sociedades, en contraposición con aquellos que tienden a fragmentarlas. No se trata de especulaciones ociosas sobre un futuro hipotético, sino de ejemplos, muy simplificados, de cuestiones acuciantes que debemos abordar con urgencia. A día de hoy, no es posible responder a muchas de las cuestiones que nuestra breve descripción ha puesto de manifiesto. Para ello necesitamos fomentar los estudios científicos interdisciplinares. Nos va literalmente la vida en ello y solo este tipo de investigación es capaz de proporcionarnos recursos adecuados para afrontar desafíos como los expuestos.

Este carácter interdisciplinar, ¿es algo nuevo en la historia de la Ciencia? No, ni mucho menos. No es sino una manifestación más de los impulsos que llevaron a nuestros antepasados a estudiar la regularidad temporal de la aparición de las constelaciones y su relación con las estaciones del año, y a deducir de ello el momento más adecuado para la siembra de las cosechas. Ahora bien, hacer ciencia interdisciplinar supone un desafío considerable. ¿Cómo podemos ser expertos en varias disciplinas a la vez, con lo difícil que es dominar una sola de ellas?

En la Introducción de su libro *¿Qué es la vida?* [22], Erwin Schrödinger nos recuerda lo siguiente:

---

<sup>13</sup>Es interesante revisar la lista de grupos de investigación presentes en el Moffitt Cancer Centre de Tampa, en Florida, uno de los mayores centros de investigación en cáncer de Estados Unidos, cuya página es <http://www.moffitt.org>. Véase, en particular, <http://www.moffitt.org/research-clinical-trials/research-disciplines/departments/integrated-mathematical-oncology>

«Hemos heredado de nuestros antecesores el anhelo por un conocimiento unificado, que lo abarque todo. De hecho, el mismo nombre que damos a nuestras más altas instituciones de enseñanza (Universidad de los Estudios) nos recuerda que, desde la antigüedad y durante muchos siglos, el aspecto universal ha sido el único considerado plenamente satisfactorio. Sin embargo, el desarrollo en extensión y profundidad de las muchas ramas del conocimiento durante los últimos siglos nos ha hecho afrontar un dilema inesperado. Nos damos cuenta de que solo ahora estamos empezando a acumular suficiente material como para poder reunir la suma de lo que sabemos en un único todo. Sin embargo, se ha convertido casi en imposible para un simple individuo el dominar algo más que una pequeña parte de ese total.»

¿Qué hacer ante tal situación? Schrödinger nos propone un camino:

«Si no queremos renunciar para siempre a ese profundo anhelo, no veo más solución que el que alguno de nosotros se atreva a embarcarse en una síntesis de hechos y teorías, aunque sea con un conocimiento impreciso y de segunda mano de alguna de ellas, y corriendo por ello el riesgo de hacer el ridículo.»

Así concluye el prólogo de este libro fascinante y así termina este artículo.

## REFERENCIAS

- [1] N. BELLOMO, *Modeling Complex Systems: A Kinetic Theory and Stochastic Game approach*, Birkhäuser, 2008.
- [2] C. DARWIN, *The Descent of Man and Selection in Relation to Sex*, 1874. Véase [http://www.forgottenbooks.org/books/The\\_Descent\\_of\\_Man\\_1000014132](http://www.forgottenbooks.org/books/The_Descent_of_Man_1000014132)
- [3] E. DURKHEIM, *Le crime, phénomène normal*, 1894. Edición electrónica en [http://classiques.uqac.ca/classiques/Durkheim\\_emile/crime\\_phenomene\\_normal/crime\\_phenomene\\_normal.pdf](http://classiques.uqac.ca/classiques/Durkheim_emile/crime_phenomene_normal/crime_phenomene_normal.pdf)
- [4] E. FEHR Y U. FISCHBACHER, The nature of human altruism, *Nature* **425** (2003), 785–791.
- [5] R. A. GATENBY, A change of strategy in the war against cancer, *Nature* **459** (2009), 508–509.
- [6] P. H. GLEICK, Freshwater and foreign policy: new challenges, *Great Decisions* (2005), 95–104, The Foreign Policy Association. Puede descargarse en <http://www.pacinst.org/publication/freshwater-and-foreign-policy-new-challenges/>
- [7] HERODOTO, *Los nueve libros de la historia (libro IV)*, elaleph.com, 2000. Puede descargarse en <http://www.elaleph.com/libro/Los-nueve-libros-de-la-historia-libro-IV-de-Herodoto-de-Halicarnaso/560/>
- [8] J. HOFBAUER Y K. SIGMUND, *Evolutionary games and population dynamics*, Cambridge University Press, 2002.

- [9] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR MIGRATION, *Migration and Climate Change*. Véase el enlace <http://www.iom.int/cms/climateandmigration>
- [10] K. JOHNSTON, *Climate Change, a cause of conflict?* Véase el enlace <http://www.global-politics.co.uk/issue5/Johnston/>
- [11] P. LOUBERE, The Global Climate System, *Nature Education Knowledge* **3** (10) (2012), 24. Puede descargarse en <http://www.nature.com/scitable/knowledge/library/the-global-climate-system-74649049>
- [12] J. E. LOVELOCK, *Gaia, a new look at Life on Earth* (reedición), Oxford University Press, 2009; *The Revenge of Gaia*, Penguin Books, 2006; *The vanishing face of Gaia*, Penguin Books, 2010.
- [13] A. J. MC MICHAEL ET AL. (EDITORES), *Climate change and human Health: risks and responses*, World Health Organization, Ginebra, 2003. Puede descargarse en <http://www.who.int/globalchange/publications/climchange.pdf>
- [14] M. M. MEKONNEN Y A. Y. HOEKSTRA, *National water footprints accounts: the green, blue and grey water footprints of production and consumption*, Unesco-IHE Research Report Series 50, Vol. 1, 2011. Puede consultarse aquí: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report50-NationalWaterFootprints-Vol1.pdf>
- [15] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO, *Programa de acción nacional contra la desertificación*, 2008. Disponible en [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-y-restauracion-forestal/PAND\\_agosto\\_2008\\_tcm7-19664.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/desertificacion-y-restauracion-forestal/PAND_agosto_2008_tcm7-19664.pdf)
- [16] S. L. MURPHY, J. XU Y K. D. KOCHANEK, *Deaths: Preliminary Data for 2010*, National Vital Statistics Reports, Vol. 60, No. 4, 2012. Disponible en [http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr60/nvsr60\\_04.pdf](http://www.cdc.gov/nchs/data/nvsr/nvsr60/nvsr60_04.pdf)
- [17] M. A. NOWAK, C. E. TARNITA Y E. O. WILSON, The evolution of eusociality, *Nature* **466** (2010), 1057–1062. Un resumen del contenido puede verse en <http://www.nature.com/news/2010/100825/full/news.2010.427.html>
- [18] J. C. NUÑO, M. A. HERRERO Y M. PRIMICERIO, A mathematical model of a criminal-prone society, *Discrete Contin. Dyn. Syst. Ser. S* **4** (2011), 193–207.
- [19] L. A. G. RIES, J. L. YOUNG, G. E. KEEL, M. P. EISNER, Y. D. LIN Y M.-J. HORNER (EDS.), *SEER Survival Monograph: Cancer Survival Among Adults: U.S. SEER Program, 1988–2001, Patient and Tumor Characteristics*, National Cancer Institute, SEER Program, NIH Pub. No. 07-6215, Bethesda, MD, 2007. Disponible en [http://seer.cancer.gov/publications/survival/seer\\_survival\\_mono\\_lowres.pdf](http://seer.cancer.gov/publications/survival/seer_survival_mono_lowres.pdf)
- [20] A. SÁNCHEZ Y J. A. CUESTA, Altruism may arise from individual selection, *J. Theor. Biol.* **235** (2005), 233–240.
- [21] M. SCHEFFER, J. BASCOMPTE, W. A. BROCK, V. BROVKIN, S. R. CARPENTER, V. DAKOS, H. HELD, E.H. VAN NESS, M. RIETKERK Y G. SUGIHARA Early-warning signals for critical transitions, *Nature* **461** (3) (2009), 53–59.

- [22] E. SCHRÖDINGER, *What is life?*, 1944. Reimpresión en 1992 en Cambridge University Press.
- [23] THE ROBERT S. STRAUSS CENTER, UNIVERSITY OF TEXAS AT AUSTIN, *How Climate affects Africa's Security and Development*. Véase el enlace <https://strausscenter.org/ccaps/>
- [24] N. N. TALEB, *The Black Swan: the impact of the highly improbable*, Random House, 2010.
- [25] N. S. TALEKAR Y A. M. SHELTON, Biology, Ecology and Management of the Diamondback Moth, *Annu. Rev. Entomol.* **38** (1993), 275–301. Puede descargarse en <http://web.entomology.cornell.edu/shelton/diamondback-moth/pdf/literature-review/Talekar-Shelton-1993-Ann-Rev-DBM.pdf>
- [26] TITO LIVIO, *Ab Urbe Condita (Storia di Roma dalla sua Fondazione)*, I Classici Della BUR, volumen quinto, libri XXI-XXIII, Rizzoli, 1986. Se puede encontrar una traducción al castellano en <http://tlivio.260mb.com/index.html>
- [27] A. J. WATSON Y J. E. LOVELOCK, Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld, *Tellus* **35B** (1983), 284–289.
- [28] M. WEBER, *La ciencia como profesión, la política como profesión*, Colección Austral, Espasa Libros, 1992. La edición original es de 1919.

MIGUEL A. HERRERO, DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICA APLICADA, FACULTAD DE MATEMÁTICAS,  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID, 28040 MADRID  
Correo electrónico: [herrero@mat.ucm.es](mailto:herrero@mat.ucm.es)