LA TEORÍA DEL CAOS COMO EXPLICACIÓN DE LA COMPLEJIDAD DEL UNIVERSO

Eduardo Piña Garza

INTRODUCCIÓN

Muchos piensan que un diálogo entre ciencia, filosofía y teología es una tarea difícil o de pocos resultados positivos. Manifiesto mi desacuerdo con esta opinión según las razones que siguen, opinión de un científico en busca del conocimiento y de la verdad.

La filosofía de la ciencia es una de las ocupaciones de muchos de mis colegas científicos en busca de una plataforma racional a su profesión y de una respuesta a cuestiones de interés científico que no pertenecen en sentido estricto a la ciencia o a su ciencia.

La filosofía es también un ingrediente del pensamiento de cualquier hombre o mujer que meditan sobre importantes cuestiones relacionadas con la existencia, la ética, el bien, la verdad, la belleza, la felicidad, el poder. Que se preguntan por el origen y el porvenir del hombre individual o colectivo. Que se enfrentan racionalmente a las cuestiones de la muerte, del mal físico y moral, del progreso, de la contaminación, de la conservación de la raza y de la especie humana.

La teología, por el contrario, parece tener el interés único de los especialistas, y llega a las grandes multitudes únicamente como un conocimiento fragmentado o nulo. En este campo mi única contribución es afirmar que la ciencia se debe contemplar como un conocimiento experimental evolutivo, que puede verse como una imagen aproximada del concepto del Universo que tiene El que es.

En realidad yo sólo puedo hablar en este diálogo acerca de la ciencia, con la pretensión de comunicar aquellas experiencias que me parecen útiles o interesantes para filósofos y teólogos, sin pretender saber todo, ni decir todo. También tengo preguntas que hacer, si bien no espero que ustedes tengan la paciencia para que yo pueda entenderlos a ustedes con claridad.

Antes de iniciar la tarea a la que fui invitado quiero hacer algunas declaraciones que intentan establecer algunas ideas mías acerca de la física, que es mi ciencia, las cuales constituyen los elementos filosóficos de mayor interés que puedo ofrecerles y que sin duda, algunos ya conocen.

La física utiliza frecuentemente el lenguaje de la matemática. Muchos diálogos son inútiles porque no se comprende el idioma usado en el diálogo. Tengo el prejuicio de que muchos filósofos y teólogos conocen poco y aprecian poco el lenguaje matemático. Las matemáticas son un lenguaje compacto, claro, lógico y útil. Utilizan teoremas y hacen demostraciones de ellos, los cuales se pueden usar con absoluta confianza, sin conocer la demostración, una vez verificado que se cumplen las hipótesis y condiciones del teorema.

Veremos algunos ejemplos con el objeto de suprimir prejuicios. Las matemáticas forman un conjunto inmenso de conocimientos muy descuidado en nuestro país. Usan de ella los ingenieros de todas las especialidades, los químicos, los físicos y los economistas. No es exagerado decir, a pesar de todos los prejuicios, que estos profesionistas estudian, conocen y usan una porción muy reducida de la matemática conocida. Les presento dos ejemplos que espero no conozcan ni ustedes, ni los profesionales mencionados.

El primer ejemplo, de gran importancia en matemáticas, se aplica a cualquier mapa del plano que se puede dibujar, y está formado por países P, fronteras F entre dos países y vértices V donde concurren tres o más países. En la figura 1 se ha representado un mapa de doce países, treinta fronteras y veinte vértices, igual que en un dodecaedro de doce pentágonos, pero aquí no interesa la igualdad de los ángulos o de los lados, sino la propiedad general que tiene todo mapa del plano: el número de países más el número de vértices, menos el número de fronteras entre dos países es igual a dos, Teorema demostrado por Euler:

$$P+V-F=2$$

Ustedes pueden verificar que se cumple para un cubo, un tetraedro, cualquier prisma, cualquier pirámide, para el icosaedro, un octaedro, o cualquier otro mapa.

En la gráfica he dibujado los segmentos de frontera entre dos países con tres colores diferentes. Cada segmento coloreado de la frontera entre dos países tiene en sus extremos dos vértices donde concurren tres países, lo cual se puede hacer con todo mapa para el cual todos los vértices tienen tres países a su alrededor. En caso de tener un vértice con más países se puede crear un nuevo país que tenga por centro al vértice múltiple y entonces ese país nuevo tiene solamente vértices de tres países. Cada vértice se puede orientar de dos formas diferentes según el orden de sus colores.

En la figura formada por doce pentágonos, en cada pentágono observamos que cuatro vértices tienen una orientación de colores y un vértice tiene la orientación contraria. Tres segmentos de frontera que llegan del exterior a vértices contiguos de cada pentágono siempre tienen el mismo color. Se han marcado cuatro vértices que tienen una orientación de sus tres colores, todos los otros vértices tienen la orientación contraria.

Podemos ahora colorear cualquier mapa con cuatro colores, poniendo dos colores separados por fronteras de alguno de los tres colores, y adyacente a la región de esos dos colores, otros dos colores separados por fronteras del mismo color, proceso que se puede repetir hasta agotar todos los países del mapa.

Un matemático nos diría, como una primera observación, que hemos olvidado la posibilidad de países rodeados totalmente por otro país. Como segunda observación afirmaría que el teorema de Euler no siempre es válido para mapas dibujados en superficies con agujeros, por ejemplo en una dona.

Otro ejemplo para ilustrar los intereses de las matemáticas es la búsqueda de cuatro números enteros positivos o negativos tales que la suma de los cubos de dos de ellos sea igual a la suma de los cubos de los otros dos. Si represento los cuatro números con los símbolos x_1, x_2, x_3, x_4, quiero que se cumpla la igualdad

$$(x_1)^3 + (x_2)^3 = (x_3)^3 + (x_4)^3,$$

por ejemplo:

$$9^3 + 10^3 = 12^3 + 1^3 \text{ , o también } 3^3 + 4^3 = 6^3 + (-5)^3$$

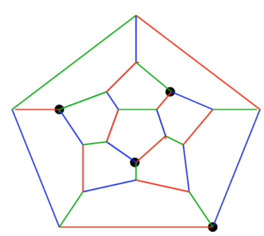

Figura 1: Figura de 12 pentágonos (Uno de ellos es el pentágono exterior)

Ramanujan encontró soluciones en términos de dos parámetros y Euler y Binet encontraron la solución general con cuatro parámetros. Duarte, de Venezuela, encontró la misma solución por otro método que utiliza la ecuación llamada de Pell. El número de soluciones es infinito. Algunas de las más sencillas son:

$$24^3 + 19^3 = 27^3 + 10^3,\ 51^3 + 12^3 = 43^3 + 38^3,$$
$$36^3 + 26^3 = 39^3 + 17^3,\ 17^3 + 14^3 = 20^3 + (-7)^3$$

La física hace uso de teoremas de matemáticas porque, una vez planteado un problema en términos matemáticos, su solución es un conocimiento nuevo y una nueva herramienta para la física. Pero observen que todo teorema tiene hipótesis y límites a su validez que un físico debe verificar que se cumplan antes de usar el teorema y asegurar que es cierta la predicción demostrada por el teorema.

Muchos problemas de física matemática requieren de cálculos de gran complejidad y extensión, los cuales se realizan en computadoras. Las computadoras sirven para hacer cálculos complicados, no sólo numéricos sino algebraicos y de cálculo diferencial e integral a un nivel insospechado de dificultad. También sirven para controlar experimentos y acumular cantidades fabulosas de medidas y otros tipos de información. Hacen gráficas y resuelven problemas lógicos. Las computadoras hicieron una verdadera revolución científica en este mundo, que aún estamos viviendo.

Los físicos estamos especializados en una parte de la física, sabemos poco de otras especialidades. Esto es consecuencia del crecimiento explosivo de la actividad científica en el mundo. Cada mes aparecen unas diez revistas de cada especialidad de la física, cada una con las dimensiones de un libro. Esto hace prácticamente imposible salir del horizonte de conocimiento impuesto por la producción mundial en la especialidad del físico. Es ilusorio pensar en que el físico, que hace investigación de frontera, puede tener tiempo para muchas diversiones fuera de su especialidad.

Los físicos tenemos mucha confianza en nuestra ciencia y admiramos su capacidad para describir un número inmenso de comportamientos de muchos sistemas, a partir de un conjunto muy pequeño de hipótesis. Esta característica de la física hace que para muchos de nosotros la realidad se pueda reducir al conocimiento de estas hipótesis, y a su aplicación, porque su capacidad de predicción de un conjunto tan grande de fenómenos hace posible olvidar el resto de la realidad. Por lo menos hasta que en las revistas de nuestra especialidad encontramos nuevos problemas resueltos, nuevas respuestas a preguntas, dudas o inquietudes planteadas dentro de nuestro campo de estudio. O hasta que un cambio importante de la física modifique de forma drástica la teoría.

Las grandes teorías de la física nueva no se encuentran todos los días y son el resultado de grandes incógnitas de la ciencia que no han podido ser explicadas con los conocimientos previos. Corresponden a cambios de paradigmas, a revoluciones que conmueven los cimientos de la ciencia, pero a los cuales nos adaptamos con gusto y con toda la rapidez posible.

1. LA GENERACIÓN DE COMPLEJIDAD A PARTIR DE LO SIMPLE

Lo simple parece imposible que de lugar a lo complejo. La paradoja se resuelve cuando se acumulan muchos simples o se reproducen o iteran procesos simples un número cada vez mayor de ocasiones.

Como consecuencia del uso de las computadoras se han desarrollado estudios muy extensos de sistemas complejos, los cuales son accesibles en la actualidad por la conjugación de diversos factores. Los más importantes son las computadoras y los expertos que las construyen y hacen trabajar; la rapidez extraordinaria de estas máquinas, la capacidad enorme de guardar datos, la abundancia de estudiantes de las ciencias, la solución científica de muchos problemas técnicos, y su financiamiento generoso.

Se sabe que sistemas de apariencia simple dan lugar a dinámicas complejas. Este conocimiento tiene raíces en el pasado pero se ha vuelto de conocimiento público por el acceso general a las computadoras. El ejemplo ilustrativo más conocido es la iteración de la parábola (llamada logística): a partir de un número mayor que cero y menor que uno: en el intervalo (0,1), que representamos con la letra x con subíndice 1: x_1, y de otro número λ en el intervalo [1,4], se calcula el número x_2

$$x_2 = \lambda x_1 (1 - x_1),$$

y se itera esta operación, con el mismo valor de λ, con x_2 sustituyendo a x_1, cuyo resultado llamamos x_3, etc.

$$x_3 = \lambda x_2 (1 - x_2),$$

y así sucesivamente:

$$x_4 = \lambda x_3 (1 - x_3), \text{ etc.}$$

A continuación, con ayuda de la computadora describiremos algunos ejemplos numéricos de este algoritmo que muestran sus características y su complejidad.

Tomamos un valor fijo de λ, cercano a 2 (mayor que 1 y menor que 3). Se aplica el algoritmo con cualquier valor inicial x_1 en el intervalo permitido (x_1 mayor que 0 pero menor que 1). Al cabo de un cierto número de iteraciones se llega siempre al valor final igual a $1 - 1/\lambda$, que ya no cambia al iterarlo (los matemáticos dicen es un punto fijo de la iteración).

Tomamos ahora un valor fijo de λ, mayor a 3 pero menor que $1 + \sqrt{6} = 3{,}44948974...$ Después de un cierto número de iteraciones vemos aparecer sucesivamente dos números que se repiten sucesivamente (se habla de un período 2). Los mismos dos números sin importar el valor inicial de x_1, pero que cambian con el valor fijo de λ. Por ejemplo para λ= 3,22603 se encuentran los dos números finales 0.50351078 y 0.80646774.

Tomemos ahora un valor fijo de λ un poco mayor de $1 + \sqrt{6}$, después de cierto número de iteraciones se alcanzan cuatro valores sucesivos que forman un período 4. Por ejemplo para λ= 3,52 se encuentran los valores finales sucesivos 0.51207636, 0.87948665, 0.37308439, 0.82330135.

Tomando valores superiores de λ cercanos a los anteriores se encuentran duplicaciones de período, 8, 16, 32, etc. en intervalos de λ cada vez más pequeños. Para valores mayores de λ aparece una zona llamada caótica en la cual podemos encontrar un período cualquiera en un intervalo pequeño de λ, seguido por una bifurcación de ese valor, 2, 4, 8, etc. veces. Hay dos regiones con período 4. El segundo nace para valores de λ superiores a 3.960101883..., por ejemplo para λ= 3,9602, se encuentran los valores finales 0.5007588, 0.99004772, 0.03902077, 0.14850018.

Hay un intervalo asociado al período 3 cuando λ es mayor de $1 + \sqrt{8}$ = 3,82842712. Por ejemplo si λ= 3,835, se encuentran los tres valores finales 0.49451437, 0.9586346, 0.15207427.

Hay tres intervalos de λ en que se puede encontrar un período 5. Por ejemplo para λ= 3,7389, se encuentran los 5 valores finales 0.50006778, 0.93472478, 0.22812595, 0.65836235, 0.8409585.

Estos valores que detecta la computadora forman un período estable. Éste convive con períodos inestables cuyos valores en lugar de ser atraídos, son repelidos y por lo mismo no son observables, pero el matemático sabe contarlos y detectar su presencia. Todos aquellos que fueron estables para valores inferiores de λ siguen existiendo inestables. Todos aquellos que nacen estables, como el período 3 que nace en $\lambda= 1 + \sqrt{8}$, nacen con una pareja de mismo período, pero inestable. La excepción son los de período par que nacieron por bifurcación, los cuales no tienen pareja inestable.

Se dice que se tiene caos por el orden intrincado en que se encuentran los períodos, pero los matemáticos han encontrado varios algoritmos para describir el orden y propiedades de dicho ”caos”, cuyo nombre no corresponde al del diccionario.

2. DE LOS PROCESOS PROBABILÍSTICOS A LA IRREVERSIBILIDAD

La explicación de la transición entre procesos probabilísticos al fenómeno de la irreversibilidad descansa generalmente en la multitud de sistemas considerados. Veamos primero cuándo usamos la probabilidad o la estadística. Se usa en dos situaciones, cuando se considera un número grande de objetos, acciones, procesos, o cuando un proceso particular se repite numerosas veces en circunstancias similares. El ejemplo más conocido es el de pólizas de seguros de vida o accidente. La ganancia de la compañía de seguros de vida se basa en el promedio esperado de defunciones o accidentes. Para calcular el costo de la póliza de vida se analizan los censos de población en el pasado y se determina con ayuda del cociente de muertes dividido por el número de habitantes, este número debe ser menor al cociente del valor del número de pólizas vendidas entre el valor del número de pólizas pagadas.

Ustedes ya conocen algunos conceptos de la termodinámica en equilibrio e irreversible. La termodinámica del equilibrio de un sistema homogéneo simple, presupone que si en un recipiente cerrado, rígido, impermeable, aislado del calor, introducimos una cantidad de algún gas puro y nos esperamos cierto tiempo de añejamiento, podremos medir un conjunto de propiedades como la masa, el volumen, la densidad, la presión, la temperatura, la energía interna, etc., que tienen valores fijos que ya no cambian con el tiempo y algunos de los cuales se pueden medir en diversos puntos del interior del recipiente y en todos ellos se encuentra el mismo valor; son valores homogéneos (sin cambio en el espacio) y sin cambio en el tiempo.

Además estos números no son todos independientes, sino que, conocidos algunos de ellos, todos los demás están determinados por los anteriores. Por otra parte sabemos que este gas está formado por cantidades enormes de moléculas en movimiento, las cuales aunque están en una agitación continua, mantienen sin cambio los números termodinámicos del equilibrio. La física estadística explica esta situación mediante la hipótesis de que cada cantidad termodinámica de interés es el promedio de alguna función de las posiciones y velocidades de las moléculas que forman el gas y de las fuerzas que existen entre estas moléculas. El proceso de añejamiento que lleva al equilibrio es irreversible, en el sentido que si inicialmente no había homogeneidad o había cambios en el tiempo, después del añejamiento desaparecen.

De tarde en tarde se pueden detectar pequeños cambios llamados fluctuaciones, pero al poco rato el sistema vuelve al equilibrio.

Las situaciones fuera de equilibrio se pueden estudiar con mediciones de algunas de las variables anteriores, como la presión, la temperatura, la densidad, que son funciones ahora de cada punto y del tiempo (que cambian con el punto y el tiempo). Pero aparecen ahora variables nuevas: la velocidad hidrodinámica, el flujo de calor, etc. Estas y las anteriores se consideran también cantidades promedio de cantidades moleculares, pero en su movimiento encontramos fenómenos disipativos en los cuales la energía pierde capacidad de trabajo y se convierte en energía degradada relacionada siempre con el calor.

3. EL CAOS, SUS LEYES Y LA PREEXISTENCIA DEL TIEMPO: LA PROPUESTA DE I. PRIGOGINE

El concepto del caos en las matemáticas tiene raíces en el pasado, pero es una consecuencia directa del estudio empírico con ayuda del poder asombroso de la computación. El ejemplo de la logística tuvo un gran impacto porque a partir de un modelo matemático muy simple se encontró una dinámica muy compleja. Pronto se descubrió que esto es lo que ocurre genéricamente: los comportamientos sencillos son la excepción, no la regla. Y también pronto se supo que las propiedades matemáticas del modelo logístico son válidos en muchos otros modelos matemáticos similares, y lo que resultó asombroso fue que sistemas complejos estudiados cuidadosamente en muchas ramas de las ciencias duras o medibles, tienen un paralelismo asombroso con los resultados matemáticos. Se encontraron semejanzas en fenómenos hidrodinámicos, en reacciones químicas, en circuitos electrónicos con elementos no lineales (varactores), en series de tiempo económicas, etc. Los ejemplos se multiplicaron tanto que el campo de estudio creció vertiginosamente. Hoy es imposible describir con certeza todos sus logros, predicciones y aplicaciones. Existen libros dedicados a aprender el caos en campos particulares de la ciencia, libros dedicados a divulgar al gran público algunos aspectos del caos y libros dedicados a enfatizar las aplicaciones del caos.

En la física el caos surgió en varios frentes, pero en el campo de la mecánica de Newton, que es la herramienta cotidiana de muchos ingenieros, el caos tenía una historia de muchos años que esperaba pacientemente la llegada de las computadoras. El éxito de la teoría de Newton para explicar las leyes de Kepler se basa en un cálculo que toma en cuenta por separado al Sol con cada planeta, olvidando por un rato la existencia de los demás. El movimiento en una elipse y la ley que descubre una velocidad constante areolar (de área) fue el primer resultado. Pero la tercera ley de Kepler es entre planetas diferentes, no se pueden olvidar los demás. Se descubre que del olvido de ellos sigue también la tercera ley si se desprecia la masa del planeta considerado respecto a la masa del Sol. Después se quiso tomar en cuenta, junto al movimiento de la Tierra, el movimiento de la Luna que la acompaña en su movimiento elíptico alrededor del Sol. Los triunfos en la predicción de este movimiento fueron mucho más lentos y menos precisos. Para encontrar la influencia mutua de los planetas asimismo se tuvieron que hacer cálculos extensos, lentos e imprecisos. El éxito de estos esfuerzos permitió predecir teóricamente la existencia de planetas nunca observados antes de los cálculos numéricos. Se encontraron así Urano, Neptuno y Plutón.

Pero el estudio del movimiento de tres cuerpos no pudo resolverse con ayuda de funciones como el caso de dos de ellos: el Sol y un planeta. Agregar otro planeta al cálculo condujo al descubrimiento del caos en mecánica. Se puede conocer el movimiento en forma numérica, pero la solución es esencialmente diferente al caso de dos cuerpos en que la solución se conoce en términos de funciones ya conocidas para todos los casos posibles. En tanto que el problema de tres cuerpos requiere un cálculo numérico para cada caso conocido.

La dificultad es esencial: deviene en la no existencia de funciones que den la solución; no resulta de la ignorancia sino de la imposibilidad. Poincaré estudió el problema. Demostró que los cálculos numéricos de los astrónomos dan lugar a series, llamadas por él asintóticas, que son muy útiles, pero no definen funciones que se puedan utilizar en otros casos. Cuando mucho aproximaciones que pueden servir al mismo caso o a otro muy similar. Se dice que los sistemas son no integrables.

El breviario 466 del Fondo de Cultura Económica de I. Ekeland ilustra algo de este problema y de los hallazgos con ayuda de computadoras. Esa misma editorial tiene cuatro libros de divulgación para explicar el caos en la serie llamada primero *Ciencia desde México* y ahora *Ciencia para todos;* en ella tengo un pequeño libro donde toco también un poco del tema. Pero estos libros tratan el asunto a la ligera porque el tema es caótico.

¿Cuáles son las leyes del caos? Para los matemáticos un ingrediente esencial es la sensibilidad a la condición inicial: un pequeño cambio en la configuración inicial conduce a un gran cambio en la posición en el futuro. Esta es una condición necesaria muy conocida. Pero se requiere algo más según los matemáticos; una condición de recurrencia, para algunos. Una condición de mezclado, dicen otros.

Es muy frecuente encontrar que los fenómenos caóticos, cuando aceptan una representación matemática, son generalmente no lineales y esto a su vez significa comúnmente que son no integrables, pero hay excepciones. Casos no lineales integrables que no son caóticos (por ejemplo el movimiento sin torcas de un cuerpo rígido). Casos no lineales que sí son integrables y son caóticos (por ejemplo la logística cuando $\lambda = 4$).

Muchas personas conocen por libros, revistas y programas de televisión, representaciones gráficas de fenómenos caóticos obtenidos mediante computadoras y graficadores. También obtenidos de mediciones experimentales fotografiadas o trasladadas al graficador. Muchas de estas construcciones gráficas tienen aspectos estéticos extraños conocidos como *fractales*. ¿Cuáles son los fractales? y ¿por qué son agradables para muchos de los que los contemplan? Los fractales son figuras cuyos bordes, líneas o superficies son irregulares a primera vista, pero tienen la propiedad de que al ser amplificados vuelven a dar el mismo aspecto, como si no hubieran sido amplificados.

Esta repetición con pequeñas variaciones de tamaño, lugar y orientación es la simetría que los define y que agrada a algunos observadores. El matemático francés B.

Mandelbrot los ha popularizado en libros de arte y tiene la competencia de muchas publicaciones donde se han reproducido. Las nubes, el follaje, la rugosidad de las montañas, la forma de los relámpagos, las fracturas de los sólidos, la forma de las hojas, etc. son fractales o aproximación de fractales. Muchos estudiantes de computación conocen los algoritmos para fabricar fractales regulares e irregulares y se usan en películas de ciencia-ficción. Han dado lugar a exposiciones de arte moderno.

En los fractales es fundamental calcular el factor de escala de amplificación que corresponde a la misma dimensión aparente. Este número se mide o calcula y es un dato esencial del fractal; en pocos casos se puede predecir a partir de la teoría.

Algunos autores incluyen en la teoría del caos otros sistemas complejos obtenidos del experimento o la computación. Algunos de ellos pueden no ser caóticos, según la definición matemática, o pueden no ser fractales. Un ejemplo que ha dejado huella es el estudio de las bifurcaciones. Estas ocurren como parte de los fenómenos caóticos cuando la frecuencia de bifurcaciones sigue una representación fractal. Las bifurcaciones son de diverso tipo y han sido clasificadas y estudiadas por los matemáticos. El nombre de R. Thom, quien escribió un libro sobre bifurcaciones que él bautizó como *catástrofes* es uno de los más conocidos en el tema. La bifurcación implica un cambio brusco (discontinuo) del comportamiento del sistema. Los cambios de fase son el ejemplo más conocido, pero hay muchos otros ejemplos que se extienden a la Economía o a las ciencias de la Conducta. En el modelo matemático de la logística las bifurcaciones aparecen como duplicaciones del número de atractores y como nacimiento de un atractor particular (el cual después se bifurca).

Dentro de los sistemas caóticos de interés para la fisicoquímica, se encuentran algunos fenómenos considerados desde hace muchos años por la escuela de Bruselas y Austin, del premio Nobel Ilya Prigogine y otros colegas. Se trata de experimentos fuera de equilibrio, pero que mediante modificación de condiciones de frontera, dan lugar a partir de una situación de flujo de energía constante, a una bifurcación donde cambia el comportamiento del sistema y se inician fenómenos periódicos, los cuales pueden desestabilizarse y cambiar de período. Uno de éstos es la formación de celdas de Bénard en un fluido contenido entre dos placas transparentes paralelas con dos temperaturas diferentes. Al ajustar las dos temperaturas se forman celdas similares a las de un panal de abejas, con el fluido manteniendo un movimiento periódico, pero limitado al interior de cada celda. Otro movimiento observado es un movimiento circular de cilindros paralelos que rotan en sentidos opuestos.

Otro fenómeno caótico de la fisicoquímica es la reacción química de Belousov Zhabotinsky, la cual da lugar a un reloj químico que cambia de color periódicamente y que puede originar espirales y estructuras con la forma de laberintos, con períodos espaciales y temporales.

A estos comportamientos Prigogine y colaboradores han agregado un análisis importante en el cual hacen notar que se trata de situaciones fuera de equilibrio, y con fricciones y disipación que generalmente llevan a un mayor reposo, pero como el sistema está forzado a mantenerse fuera del equilibrio, ellos hacen notar como una nueva ley, que en tales casos ocurrirán nuevas estructuras ordenadas, de las cuales se conocen muchos ejemplos, pero en la cual ellos incluyen los fenómenos biológicos, en su origen o en su cambio, y más adelante otros fenómenos.

Conviene decir que Prigogine atribuye mucha importancia a las resonancias de Poincaré, las cuales son originalmente bifurcaciones de órbitas periódicas estables de sistemas newtonianos caóticos, que al ser perturbadas o modificadas dan lugar a dos órbitas, una estable y otra inestable, que también son periódicas pero están enrolladas alrededor de la órbita estable, alejándose de ella (al nacer) y dando un número entero de vueltas alrededor de la órbita periódica estable. En mecánica se ha observado el fenómeno opuesto cuando dos órbitas mueren en pareja estable-inestable al fundirse con una órbita que ellas estrangulan.

Pero las órbitas inestables, que se encuentran dondequiera en un sistema caótico, dan lugar a un comportamiento difusivo en el sistema, descubierto por el matemático ruso V. Arnold y que produce en los sistemas newtonianos caóticos una deriva difusiva que recuerda la de la fisicoquímica. Hay que recordar que hay un paralelismo entre las trayectorias de partículas en Relatividad General, geodésicas de la métrica y el problema equivalente de los sistemas de Newton en una formulación matemática de Jacobi. En ambos existe generalmente el caos y es similar. En ambos hay geodésicas inestables que dan lugar a derivas difusivas. Por este motivo tiene razones Prigogine para extender sus argumentos al dominio de la Relatividad General y de la Cosmología.

En la extensión de sus ideas, las situaciones fuera del equilibrio de la cosmología, las estructuras disipativas, entre las cuales está la difusión, dan lugar a nuevas estructuras que nacen de las situaciones desordenadas del no equilibrio, en una creación de nuevas estructuras. Nos podemos preguntar sobre la predicción de las propiedades de las nuevas estructuras, pero no se conocen. Sin embargo un gran avance es estar preparados a recibir la sorpresa de nuevos fenómenos esperados, pero desconocidos.

4. AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Dr. Héctor Velázquez, coordinador del simposio *Creación y Evolución: Hacia una interpretación unitaria del universo. Dos tópicos para un diálogo entre ciencia, filosofía y teología,* por haberme invitado a presentar este trabajo. También agradezco a los presentes por escuchar mis ideas y comentarlas, lo cual ha enriquecido el texto definitivo de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

DAVIS, P. (Editor), *The New Physics,* Cambridge University Press, 1989.

EKELAND, I, *El cálculo, lo imprevisto. Las figuras del tiempo de Kepler a Thom* México, Fondo de Cultura Económica, breviario 466, 1988.

FORD, G. *What is chaos, that we should be mindful of it?*

GLEICK, G., *Chaos. Making a New Science,* Viking, 1992.

JUAN PABLO II, *Fe y razón,* Editorial Basilio Núñez, México.

NICOLIS, G., *Physics of far-from-equilibrium systems and self-organization.*

PRIGOGINE, I., *El fin de las certidumbres,* Madrid, Taurus, 1997.

RUSSELL, R. J, STOEGER, W., COYNE, G. (compiladores) *Física, Filosofía y Teología, Una búsqueda en común,* México, EDAMEX, 2000.

Scientific American (Special Issue). A matter of time, september 2002.

Scientific American (Special Edition). The once and future cosmos. 2002.

ZEH, H.D., *The Physical Basis of The Direction of Time,* Springer, 2001.

Eduardo Piña Garza
Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa
pge@xanum.uam.mx