
modelación matemática en geofísica

perspectivas en México

Por Ismael Herrera IIMAS-UNAM

Quiero hablar hoy de un tema fundamental en el desarrollo científico y tecnológico. Internacionalmente ha cobrado una importancia notable y en México ha empezado a desarrollarse, pero es claro que debería recibir mucha más atención. Me refiero a la modelación matemática.

En gran medida es verídico decir que la modelación matemática es el objetivo central de las ciencias físico-matemáticas. En realidad, esta afirmación se puede extender aún más allá, para incluir otras actividades y otras ciencias. Sin embargo, es en las ciencias físico-matemáticas donde nuestra capacidad de modelar el mundo ha alcanzado un grado de perfección mayor; y al decir aquí nuestra capacidad, me refiero a la capacidad del hombre.

El origen de la modelación matemática se pierde en la prehistoria. Y esto es así, porque el hombre desde muy temprano deseó tener capacidades de adivinación; para lograrlas intentó dos caminos, la hechicería y las

religiones, a través de las cuales trató de establecer comunicación directa con los dioses, y por otra parte, el camino científico. Este último era demasiado arduo y por ello durante mucho tiempo predominó el primero.

En efecto, la predicción científica es posible sólo cuando se ha alcanzado una comprensión muy profunda de los fenómenos a los cuales se aplica. Por ello fue necesario que transcurrieran milenios antes de que la Ciencia alcanzara el auge que hoy contemplamos y tuviera el éxito que le permite ostentarse como la Señora indiscutida del arte de predecir... O ¿qué acaso no resultaría grotesto, hoy en día, que un ingeniero invocara a los hados para definir la avenida de diseño de una estructura, por ejemplo?

Todos sabemos que fue Newton quien sentó las bases modernas de este arte. Y el esquema de Newton sigue siendo la base para la modelación de los

fenómenos macroscópicos que ocurren a velocidades ordinarias que son, por cierto, los que habitualmente interesan en Geofísica.

A pesar de ello, hubieron de pasar varios siglos para que este poderoso método diera los espléndidos frutos de nuestra época.

Se puede decir, adecuadamente, que el objetivo de la modelación físico-matemática es el movimiento, siempre y cuando este concepto se entienda en un sentido suficientemente amplio. La voz y el sonido; las olas del mar y las ondas en un sólido; la luz, que es propagación de ondas electromagnéticas. Los terremotos y las corrientes oceánicas. Un río que fluye y el transporte de sus sedimentos. La difusión de contaminantes en la atmósfera en el mar, en lagos y lagunas o en las aguas subterráneas. La conducción del calor. El viento, el estado del tiempo y aún el clima. Las corrientes de

modelación matemática en geofísica

perspectivas en México

convección en el interior de la Tierra, que generan la expansión de los fondos submarinos creando montañas en las costas y en los continentes. El viento solar que viene a través del espacio interplanetario y da lugar a ondas de choque en su interacción con el campo magnético terrestre. Puede verse que en efecto, el movimiento es un concepto muy amplio.

Debemos distinguir entre el movimiento de sistemas de partículas y el movimiento de un medio continuo, porque las posibilidades de la mecánica de los medios continuos son, con mucho, más ricas que las de la mecánica de partículas. La descripción matemática de un sistema de partículas tiene un sola variable independiente, el tiempo; la de un medio continuo, cuatro: una para el tiempo y tres para las coordenadas espaciales. Las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento son, en el primer caso ordinarias, mientras que en el segundo son parciales.

Para resolver este tipo de problemas se crearon poderosos instrumentos; casi todos los desarrollos del Análisis Matemático estuvieron motivados por

ellos. Sin embargo, hasta hace poco los resultados habían sido escasos; al menos cuando se las mira desde nuestra perspectiva presente.

Los problemas tenían que ser simples: las propiedades materiales y las configuraciones geométricas consideradas debían ser sencillas. Problemas unidimensionales como el de la cuerda vibrante. La propagación puramente comprensiva de ondas, como por ejemplo, el sonido. Materiales isotrópicos que ocupan todo el espacio o la mitad del espacio. Fluidos incomprensibles y fluidos desprovistos de viscosidad. La teoría linealizada de los fluidos comprensibles. La linealidad era una hipótesis inevitable que limitaba los resultados en casi todos los campos.

Hoy, la situación ha cambiado radicalmente. La disponibilidad de computadoras ha permitido abordar problemas de gran complejidad incluyendo los no-lineales. En Geofísica es posible ya modelar sistemas muy complicados. Lo mismo en Física de la Atmósfera, que en la del interior de la Tierra. Las corrientes oceánicas, la hidrología o la Geotermia. Esto permite llevar el

análisis hasta límites que hace sólo unos años eran inalcanzables y poner a prueba las hipótesis de trabajo con gran detalle.

Todo ello ha motivado que internacionalmente se dedique a la modelación matemática una atención que en la actualidad supera a casi cualquier otro campo. Independientemente de que esta actividad es objeto de estudio en muchas universidades, han surgido instituciones expresamente dedicadas a ellas; también, un gran número de revistas especializadas. Las industrias, la petrolera entre ellas, le dedican recursos crecientes.

Lo anterior se justifica porque la modelación matemática no sólo tiene relevancia científica, sino que también es indispensable en la solución de muchos problemas económica y socialmente importantes. En la explotación de un campo petrolero, por ejemplo, es necesario modelar el flujo de los hidrocarburos líquidos y gaseosos a través del medio poroso que los contiene. Su aprovechamiento óptimo depende de nuestra capacidad de reproducir matemáticamente este proceso. La efectividad de la exploración petrolera se basa

modelación matemática en geofísica

perspectivas en México

en la modelación e interpretación de las ondas elásticas que se transmiten a través del subsuelo. Para el aprovechamiento del agua subterránea es necesario reproducir las condiciones de su movimiento en el interior de la Tierra; sólo así se puede prever el desarrollo de las poblaciones que en ella se sustentan y evitar los graves problemas asociados al uso irracional del agua. Intrusión salina en los acuíferos costeros, que amenaza reintegrar al desierto las áreas que con dificultad se habían rescatado para uso agrícola. Hundimientos del suelo que ponen en peligro la estabilidad de las obras civiles en la ciudad de México.

Aún regiones que dependían sólo de recursos hidráulicos superficiales, se han visto en la necesidad de recurrir a las aguas subterráneas, debido a su creciente desarrollo. Al hacerlo es necesario prever su evolución futura, pues de lo contrario o se acepta un desarrollo que es insostenible, con los graves problemas económicos y sociales que esto acarrea, o se cae en el extremo opuesto de limitar innecesariamente el desarrollo.

Muchos ejemplos más se pueden citar: diseño de presas

para resistir sismos, modelación de campos geotérmicos para producir energía eléctrica, diseño de cimentaciones, predicción de avenidas en los ríos y canales, circulación en lagunas, difusión y transporte de contaminantes en la atmósfera, así como en las aguas tanto superficiales como subterráneas, etc.

Es evidente por lo anterior, que sería de gran importancia para nuestro país establecer las condiciones para que la modelación matemática pueda ser utilizada eficazmente por la industria y la ingeniería nacionales. Además de los beneficios directos que esto traería, podría constituir un importante primer paso en una acción más amplia que condujera a encauzar eficazmente la acción de la ciencia y la tecnología avanzada en beneficio del país.

México, al igual que otros países en una etapa similar de desarrollo, ha tropezado con obstáculos para vincular su progreso en las actividades de investigación, con su problemática tiene la virtud de constituir un núcleo integrador que aglutina en forma coherente actividades en disciplinas diversas, las cuales en su ausencia aparecen como

inconexas y aún carentes de toda relación. Por ello, el desarrollo de la modelación matemática contribuiría a que otras especialidades adquirieran una mayor conciencia de su capacidad aplicativa y de su importancia en el progreso tecnológico. Se daría así un paso que es indispensable para lograr nuestra autodeterminación tecnológica.

Sin embargo, no lo hemos hecho. Nos hemos limitado a hacer las aplicaciones más rudimentarias y a recurrir a modelos y programas desarrollados en otras partes, en los demás casos. También, y tal vez más grave, no utilizamos estas herramientas para el análisis de muchos problemas.

Podríamos preguntar ¿por qué es esto así? Creo que las causas principales se encuentran en una falta de interés motivada por falta de conciencia y de confianza en nuestras propias capacidades.

Quisiera explicar con algún detalle las bases de esta convicción mía. Vemos cuáles son los ingredientes que se requieren para el desarrollo de la mo-

modelación matemática en geofísica

perspectivas en México

delación matemática. Conocimiento de Física y de Matemáticas. De Física los procesos básicos que intervienen en los fenómenos, los que son macroscópicos, y generalmente relacionados con la Mecánica de Medios Continuos. De Matemáticas, Ecuaciones Diferenciales Parciales, Análisis Numérico y Computación. También, Probabilidad y Estadística, para modelar la incertidumbre de los procesos.

En México contamos con una ya importante tradición en Física y Matemáticas, la cual por cierto se ha desarrollado con una muy sólida base. De ahí provenimos muchos de los que hacemos Geofísica en México.

¿Qué falta entonces? Que nos propongamos alcanzar excelencia en este campo, suministrándole así una importante herramienta a quienes trabajan en problemas de Geofísica. Necesitaríamos empezar por preocuparnos porque existan programas educativos que integren este tipo de capacidades, pues no existen actualmente.

Nosotros hemos venido haciendo trabajo en este campo con cierto éxito. Las primeras aplicaciones las hicimos en hidrología subterránea y cuestiones relacionadas. Desarrollamos modelos y analizamos sus implicaciones para el Valle de México, en donde estudiamos el su-

ministro de agua subterránea y el hundimiento asociado. En la Costa del Pacífico, la evolución de los acuíferos sometidos a explotación y la intrusión salina. Los campos geotérmicos de Cerro Prieto y los Azufres, para definir su potencialidad y la factibilidad de proyectos de generación de energía eléctrica. Mucho más se puede hacer dependiendo de la disponibilidad de gentes y de que se nos dé acceso a los problemas. En la industria petrolera, por ejemplo.

En este sentido, el sector paraestatal y las dependencias gubernamentales deberían ser la vanguardia del progreso tecnológico de México.