

## Las nuevas técnicas informáticas y las Ciencias de la Tierra

### The new computing techniques and the Earth Sciences

**Agustín Pedro Pieren Pidal**

*Departamento de Estratigrafía e Instituto de Geología Económica CSIC-UCM, Facultad de Ciencias Geológicas,  
Universidad Complutense. 28040 Madrid.*

**PALABRAS CLAVE:** Informática, Computadores, Cálculo, Geología, SIG, Teledetección, Internet.

**KEY WORDS:** Computing, Computers, Calculation, Geology, GIS, Remote Sensing, Internet.

#### RESUMEN

En este trabajo se revisa la incidencia de la computación y de la informática en las Ciencias de la Tierra. Se distinguen tres tipos de aplicaciones. Las que han sustituido tareas preexistentes, facilitándolas, automatizándolas y acelerándolas; las aplicaciones que han surgido posteriormente y que hubieran sido inimaginables antes de la aparición de los ordenadores, y las nuevas posibilidades que surgen vinculadas al desarrollo de la red global que denominamos Internet. En el primer apartado se encuentran las aplicaciones que precisan de mucho cálculo numérico, como las que se usan en Geofísica e Hidrogeología, más todas las que podemos considerar ofimáticas que sustituyen a máquinas de escribir, ficheros y libros de cuentas. Otras herramientas como los SIG, el procesado de imágenes y la interferometría de radar eran desconocidas y no se desarrollan hasta que existe la herramienta básica. Finalmente aparece Internet, revolución que en este momento, está comenzando a cambiar muchos de nuestros hábitos de trabajo. En el análisis de las diferentes tareas relacionadas con las Ciencias de la Tierra correspondientes a estos tres grandes conjuntos de técnicas informáticas hacemos especial énfasis en como han aparecido e incidido en el trabajo de los profesionales, investigadores y docentes de esta Ciencia.

#### ABSTRACT

The influence produced within the Earth Sciences by informatics and computing is revised in this paper, differentiating three types of applications. Some have replaced pre-existing tasks making them easier, faster or automatic, some other appeared later and could not have been conceived before the computers appearance, and finally new possibilities arise related to the global net development and generalization; which are what we call Internet. In the first case are included all the applications needing a large amount of calculations and processing, such are those used in Geophysics and Hydrogeology, in addition to all office tools as word processing, data bases, spread sheets, presentation programs which are replacing typewriters, file systems, account books, and former means used for presentations such slides or transparencies. Some other tools as the Geographic Information Systems (GIS), image processing (IP) and Radar interferometry are good examples for the type of applications which were inexistent and did not appear until the basic tool, the computer, developed. Finally after a large trial period which started in 1962, Internet becomes important in 1989, and "explodes" with the turn of the millennium, constituting the present revolution which is starting to change significantly some of our working habits. A review of the tasks related with Earth Sciences is here made and related with the three large ensembles of computing techniques described. We especially enhance the fact of how these appeared and how they affected the working method of Earth Science professionals, researchers and educational staff.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Como casi siempre ha ocurrido y de nuevo sucederá con una inmensa parte de los inventos y patentes, cuando en 1947 Bardeen, Brattain y Shockley idearon el transistor, se planteó enseguida su uso como sustitutivo de la válvula termoiónica o tríodo, hecho ya de

por sí suficientemente importante como para hacer a sus inventores merecedores del premio Nobel de Física de 1956. Aparecieron rápidamente como novedad radios y otros circuitos con transistores (contracción de *transfer resistor*) que sustituyendo a las lámparas, disminuyeron notablemente el tamaño y coste de los circuitos electrónicos y permi-

El desarrollo de las capacidades gráficas y del volumen de operaciones por unidad de tiempo, ha permitido que ciertas aplicaciones que eran privativas de *Mainframes* pudieran ser acometidas simplemente desde estaciones de trabajo (*workstations*), y la mayoría de esas aplicaciones se pueden utilizar actualmente con los equipos que actualmente llamamos PC, pero que pueden tener más capacidad de procesamiento, y de almacenamiento en muchos casos, que las mencionadas estaciones de trabajo primitivas. Por ejemplo los coprocesadores aritméticos que debían añadirse a los primeros PC's utilizados en aplicaciones con cálculo, ya han sido incluidos y superados hasta en los procesadores básicos o de bajo coste.

Desde 1985 se ha mantenido inalterable la pauta de que cada año y medio los ordenadores personales han doblado su capacidad y al mismo tiempo han reducido su precio a la mitad. Sin embargo entiendo que la pauta de renovación de los mismos en el trabajo ha bajado; por el contrario ha aumentado a nivel doméstico. Esto se debe a que, por lo menos los geólogos y muchos otros científicos y técnicos, posiblemente pretendíamos acometer con un ordenador personal tareas para las que éste aún no tenía capacidad, por lo que había motivos o al menos excusas para sustituir el equipo con frecuencia por otro con mayor capacidad de proceso, resolución de pantalla, memoria más rápida y mucha mayor capacidad de almacenamiento. Un equipo comenzaba a estar obsoleto al año de su adquisición. En los últimos años, se comienza a observar una tendencia asintótica, ya que la carrera de la capacidad de los equipos y del almacenamiento continúa, pero los ordenadores actuales son capaces de hacer y con holgura la inmensa mayoría de las tareas que de momento requiere de él el usuario técnico. En las tareas ofimáticas, hace aún mucho más tiempo que las prestaciones son más que suficientes. Por el contrario, a nivel doméstico, el tratamiento de imágenes y video, y sobre todo los juegos, apuran las capacidades de los equipos al máximo, volviéndolos "lentos" en mucho menos tiempo. Un equipo capaz de procesar o "mover" con facilidad escenas completas de teledetección, quizás se encuentre más próximo al límite procesando las imágenes de un videojuego para adolescentes.

## 2. APLICACIONES DE ÁMBITO GENERAL

Después de sintetizar en la introducción como ha sido el desarrollo de los ordenadores a lo largo de cuarenta años, vamos a analizar que aplicaciones se han beneficiado rápidamente de su aparición por su enorme capacidad de cálculo, y sobre todo incidir en la aparición de nuevas herramientas, que antes del desarrollo de los computadores y sus aplicaciones no podían ni siquiera haber sido imaginadas.

Dividimos esta revisión en tres grandes apartados. En el primero se consideran importantes aplicaciones que no son exclusivas de las Ciencias de la Tierra, pero que en algunos casos han sido de extraordinaria aplicación, en el segundo se analizan las aplicaciones que se han desarrollado dentro o para el campo de las materias afines a esta rama de las Ciencias, y finalmente, por considerar el autor que constituye una auténtica revolución en nuestro modo de operar, se abordan por separado y en tercer lugar todos aquellos temas relacionados con la aparición de una "Red Global" cuyo concepto puede ser vinculado con la nueva palabra *Internet*.

### 2.1. La Ofimática

Las primeras aplicaciones de los ordenadores en las universidades y centros de investigación fueron las tareas de cálculo; realizaron operaciones que a un usuario le hubiesen llevado años. Algunos años más tarde, cuando los ordenadores llegaron a las oficinas y muy poco después a los hogares y a los profesionales, comenzaron ejerciendo las tareas típicas de la oficina, esto es lo que se ha denominado ofimática. Así, las primeras aplicaciones generales fueron los procesadores de texto, las bases de datos, y después aparecieron las hojas de cálculo.

Los procesadores de texto sustituyeron primero y rápidamente a las máquinas de escribir. Es una aplicación que nació conjuntamente con el ordenador personal ya que automatizaba una función existente, la mecanografía. Las máquinas de escribir electrónicas ya habían comenzado a integrar pantallas de cristal líquido en las que se podía previsualizar el texto línea a línea, permitiendo corregirlo y cuadrarlo; no olvidemos que el procesador 8088 del primer PC, había sido desarrollado por *IBM* para una máquina

Los programas C.A.D., sirven para digitalizar datos de planos o geográficos, referenciarlos respecto a ejes ortogonales, y en Geología y demás ciencias de la Tierra referirlos a diferentes sistemas de coordenadas, geográficas, UTM, Lambert u otros tipos de proyección, pudiendo ordenar la información en capas. Esta última posibilidad es en realidad una importante herramienta, y a la hora de abordar un proyecto se debe estudiar cuidadosamente la agrupación de los datos en diferentes capas de información, que se pueden activar y desactivar, pudiendo así agrupar distintas combinaciones, permitiendo dar salida a mapas distintos, que representen únicamente la información necesaria para facilitar su lectura, aunque en el archivo del C.A.D., se encuentre toda la información, mucho más compleja. Así podríamos por ejemplo para un mapa geológico-minero, estructurar en distintas capas la referencia topográfica con las coordenadas y los vértices geodésicos, la topografía, la hidrología, carreteras, municipios y construcciones, y otras con los contactos geológicos, las minas e indicios minerales, las concesiones, las tramas del dibujo y, finalmente, otra con los símbolos estructurales, pliegues, fallas, buzamientos, etc... Se podrían añadir además, en capas diferenciadas, mapas de isovalores representados, por ejemplo, mediante curvas de isolíneas con información de concentraciones geoquímicas, contornos estructurales, etc...

Mediante la combinación de las diferentes capas podemos reproducir diferentes mapas con distintos contenidos temáticos. Esta estructuración es muy importante para no tener que eliminar, o modificar información a la hora de generar salidas, pero sobre todo si posteriormente volcamos toda esta información digitalizada y georreferenciada a un SIG. Es importante destacar que al tratarse de un C.A.D. toda la información de los diferentes mapas habría sido previamente digitalizada y tratada (el tratamiento consiste en la organización en capas, tratamiento de los nodos, cierre de las polilíneas, etc...). En un C.A.D. incluso podremos, con bastante más trabajo, producir modelos tridimensionales útiles; estas son las típicas aplicaciones que utilizan los arquitectos para representar maquetas y bocetos, o los ingenieros para diseñar o analizar piezas antes de su construcción. En Geología pueden ser indicados para modelos tridimensionales, utilizados en mi-

nería, en la industria del petróleo, la obra civil y la hidrogeología, por ejemplo. Los datos pueden incluso estar asociados a una base de datos georreferenciada, momento en el cuál el C.A.D. comienza a convertirse en un SIG.

La diferencia esencial radica en que el SIG, operando con los datos de las diferentes capas, y con la base de datos georreferenciada, puede contestar a una cuestión (*query*), generando una respuesta mediante la producción de un nuevo mapa que nosotros no hemos introducido, o generando un listado con los elementos adecuados a las condiciones que hemos planteado en nuestra pregunta al sistema. Sin embargo en un C.A.D. no podremos extraer información mediante mapas o listados que no hayamos introducido previamente.

En ambos casos, (SIG y C.A.D.) la mayor y más apreciada novedad, es que podemos producir un modelo, que en primer lugar debe ser ajustado mediante procesos iterativos para comportarse como el elemento real, y que en segundo lugar, y esto es lo más importante, nos permitirá predecir el comportamiento del sistema modelizado ante la modificación de uno o de varios parámetros. Por ejemplo, podemos citar los modelos de producción en los campos de petróleo, cuyas técnicas se han aplicado posteriormente a la modelización de acuíferos que describiremos en otro apartado. Están de moda ahora, en los primeros años del milenio, dando un salto a los primeros planos de la información, los modelos climáticos con la modelización y previsión de los posibles cambios atmosféricos ante las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero, o la variación de la capa de ozono, y muchas otras variables para las que, como trataremos más adelante, se han diseñado incluso varios programas con la creación de instrumentos específicos para la modelización de la atmósfera montados en una nueva constelación de satélites para tal fin.

Para concluir este apartado quiero insistir en que, al menos en España, debido a una inicial pasividad de los geólogos, y a la fuerte apuesta desde el inicio tanto en proyectos relacionados con el SIG como con la Teledetección, ésta ha sido básicamente aplicada por geógrafos. Pese a ello, este es un campo en que un gran número de licenciados de las últimas generaciones de geólogos están encontrando su primer trabajo, y bastan-

Tierra. Aunque afortunadamente no necesitamos el uso directo de un ordenador para emplear un GPS, el desarrollo de estos está relacionado, de una parte, con el avance técnico de las telecomunicaciones permitido por los desarrollos en microelectrónica y microinformática. Esto es notorio cuando vemos que el tamaño de los GPS se ha reducido del mismo modo que los teléfonos móviles, y como en éstos en las pantallas que inicialmente daban la lectura de las coordenadas, se han incorporado primero, gráficos, luego color, se pudieron crear mapas de los puntos o itinerarios, y actualmente éstos aparecen directamente sobre mapas de carreteras, callejeros, pero también sobre mapas topográficos y si éste es nuestro deseo sobre mapas geológicos.

Cuando hacia 1980 se inició la utilización de los GPS, muchos cartógrafos exclamamos inicialmente que para que queríamos utilizar en nuestros trabajos de cartografía, un entonces costoso aparato que nos iba a proporcionar nuestra situación con un error de 20 m, si con los mapas fotogramétricos, en los años 90 ya digitales, y con las escalas disponibles nos podíamos situar en dichos mapas con el mismo margen de error y probablemente inferior. Esta observación es cierta en la mayoría de los casos. El problema puede surgir si nos encontramos en una zona muy llana como las tablas de Daimiel, sin más referencias topográficas que nos ayuden que los campanarios situados a muchos kilómetros, o pintando contactos geológicos dentro de un frondoso hayedo de la Cordillera Cantábrica, o en uno de los numerosos eucaliptales de Huelva o de Galicia, sin punto alguno de referencia, o en condiciones restringidas de visibilidad. En estas condiciones el GPS resultará una inestimable ayuda.

Actualmente, y gracias a varias de las recientes innovaciones que analizaremos, un geólogo que se encuentre en España puede servirse de varias herramientas con las que hace veinte años ni siquiera se podría soñar. Vamos a narrar un hipotético caso para ilustrar tal afirmación. El geólogo llega al punto que le han indicado para instalar un sondeo, con la dirección que le acaba de comunicar un constructor mediante un mensaje enviado a su teléfono móvil. Puede llegar con facilidad gracias a que su GPS, le guía todo el camino, por lo que ni siquiera se tiene que molestar en buscar un mapa o un callejero para llegar. Para ubicar el sondeo, quiere hacerse

una buena idea de la geología del lugar cuya ubicación hasta hace unas horas desconocía. Mide con su GPS la situación con mayor precisión, al encontrarse parado, y conocida ésta, puede con su ordenador portátil conectarse a Internet mediante la cobertura que le brinda su teléfono móvil. Puede descargar el mapa geológico del lugar en alguno de los varios formatos disponibles, desde la página WEB del Instituto Geológico Minero o de alguna de las instituciones autonómicas con funciones equivalentes. Entonces hoy en día tendrá dos opciones, una trasladar el mapa a su GPS, o trasvasar las coordenadas al ordenador, para saber con precisión en que lugar del mapa geológico se encuentra. Realizado el sondeo, si este es geotécnico, podrá volcar las fotos digitales de su cámara al ordenador, rellenar una plantilla del sondeo con todos los datos del mismo, dibujando la correspondiente columna litológica, y enviar desde allí, directamente los resultados a su empresa o al cliente. Este ejemplo, simplemente aún muchas actuaciones que hoy en día son muy frecuentes en los trabajos de Geología de campo.

### 2.3. Teledetección

#### 2.3.1. Desarrollo histórico

Teledetección significa poder ver más lejos, llegar a tener percepción de algo, allí donde nuestros propios medios no nos lo permitirían. Comienza por un lado en la exploración del universo que nos circunda con la invención del telescopio. Fue el astrónomo holandés Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758 -1840), quién dándose cuenta de la sorpresa de sus hijos al superponer dos lentes, combinó por primera vez en 1606, un vidrio cóncavo con uno convexo, logrando aproximar la visión de los objetos, pero por ser monoculares no logró patentarlo. Habiendo tenido noticias del invento de Matthias, Galileo Galilei meditó sobre el tema y logró construir un telescopio de tres aumentos. El segundo fue de 17 y con el describió las montañas de la Luna, algunos conglomerados estelares, los cuatro satélites de Júpiter, la triplicidad de Saturno (estrella con orejas) y las fases de Venus, comenzando, a juicio del autor, la teledetección espacial.

Por otro lado, la Teledetección terrestre casi siempre ha ido a remolque de la teledetección militar, y fueron éstos quienes prime-

(*pixel*) en su lugar, acorde a la proyección cartográfica deseada. Esto requiere una programación y un proceso informático complejo. Luego se modifica la distribución del histograma de la imagen de cada banda (*stretching*), se aplican filtros, de paso alto, de paso bajo, de realce de contactos, de realce de lineaciones etc... Otra opción de trabajo son las operaciones entre bandas, en las que se pueden hacer todas las operaciones aritméticas o lógicas deseadas, siendo típicos los ratios. Se suelen presentar imágenes combinándolas, por ejemplo en imágenes RGB, donde representamos una banda en rojo, otra en verde y la tercera en azul, creando las combinaciones conocidas como "falso color real", falso color, y una multitud de combinaciones posibles.

Todo esto necesita gran capacidad de procesado, facilita asimismo el trabajo el que la escena completa quepa en la memoria de la tarjeta gráfica, y requiere suficiente capacidad de almacenamiento, puesto que cuando se comienzan a filtrar, operar y generar imágenes de bastante resolución, *sin pérdida de datos*, el tamaño de los archivos generados se dispara. Si se usan los típicos formatos de almacenamiento de fotografías, el suavizado y variaciones en matices que genera un formato jpg, permite presentar a distancia un resultado final, pero hace inútil la imagen archivada así para cualquier otro proceso porque simplifica, modifica y sesga la información. Por este motivo, el procesado completo de imágenes en ordenadores personales no era cómodamente factible hasta finales de 1990, aunque había PCs, con tarjetas gráficas especiales, o sobre todo con controladores específicos para su uso en Teledetección, era muy difícil o muy lento tratar "escenas completas", por lo que hasta ese momento se trabajaba mayoritariamente con estaciones de trabajo.

Por otra parte, uno de los puntos más importantes en la historia de la teledetección por imágenes de barrido ha sido el aumento continuo de la resolución espacial de las imágenes. Estas están formadas por teselas o *pixeles*, unidades básicas indivisibles de información. En los primeros satélites estos píxeles cubrían aproximadamente media hectárea, mientras que en los últimos satélites espía militares (que se conocen) la resolución es de  $33 \times 33$  cm. Hay ya satélites comerciales cuya resolución varía desde 10, 6 y 4 m hasta 66 cm de lado dependiendo del

modo de operación (multiespectral o pancromático). Debemos tener en cuenta que al pasar de una imagen de  $30 \times 30$  m (Landsat IV y V) a una imagen de  $15 \times 15$  m (Landsat VII), la resolución parece aumentar linealmente, pero el número de píxeles así como el tamaño de los archivos aumenta cuadráticamente. Esto ha dado lugar a dos situaciones. Por una parte en los satélites que captan una imagen de la misma superficie en el terreno, el tamaño de los archivos se ha disparado, por lo que se necesita un mayor ancho de banda para su transmisión y capacidades mayores de cálculo y almacenamiento en los ordenadores para su procesado. Otros satélites, de muy alta resolución espacial han optado por reducir la escena; pueden orientar ligeramente sus objetivos y trabajan exclusivamente sobre las zonas de interés que les son encargadas (Satélites Quickbird, Ikonos p. ej.).

Los geólogos al principio utilizaban imágenes de teledetección generalmente obtenidas para otros fines o sistemáticamente, y las interpretaban visualmente, como si de una foto aérea de gran escala se tratase, eso si conscientes de las características espectrales de los sensores (visible-infrarrojo cercano -infrarrojo térmico- vapor de agua) o de las combinaciones entre estas (por ejemplo la característica imagen en falso color con el infrarrojo cercano representado en rojo, con lo que la vegetación aparece en distintas tonalidades de rojo). La capacidad de los ordenadores personales actuales, hace que para un fin que no sea demasiado específico, el geólogo pueda obtener imágenes de buena resolución gratuitas ( $15 \times 15$  m) de cualquier lugar del mundo en Internet, y tras descargarlas rápidamente, hacer los filtrados deseados y generar las combinaciones que precise. Para resoluciones mayores, fechas precisas o recientes, repetibilidad, etc..., obviamente las imágenes han de ser adquiridas. Pero las de libre acceso pueden cubrir un amplio abanico del soporte que se requiere para una exploración cartográfica, estratigráfica, estructural o minera.

### 2.3.2. El Radar

La línea conductora que hemos seguido se acentúa en el caso del RADAR (*Radio Detection and Ranging*), acrónimo que podríamos traducir como Detección y Distanciamiento por ondas de Radio (DEDRA). Pese a que se descubrió y utilizó para detec-

imágenes pasivas de barrido. El procesado es muy laborioso y largo, y sería imposible acometerlo sin una gran capacidad de cálculo.

La precisión altimétrica obtenida por el radar es muy alta (0,5 m), y es aún más alta cuando lo que hacemos es comparar imágenes (2-3 cm). Esto permite hacer análisis interferométricos de la superficie que nos permiten posteriormente estudiar o cuantificar la acción de la subsidencia, terremotos, movimientos de fallas, etc... Para esto la labor de hacer coincidir cada zona de una imagen con la correspondiente tomada en otra fecha, es una tarea ingente que requiere, además de un software adecuado, gran capacidad de procesado.

Desde hace aproximadamente diez años, el radar está mostrando unas capacidades enormes para el avance de las Ciencias de la Tierra, ha permitido por ejemplo ubicar paleocauces bajo el desierto así como cráteres de impacto bajo las mismas arenas, hacer mapas altimétricos de detalle de la altura de la superficie de los océanos, mostrando variaciones de ésta, en enormes abombamientos de más de 80 m, que hubiera sido imposible constatar de otra manera. Esta altimetría de detalle combinada con datos gravimétricos, ha permitido a su vez, una caracterización topográfica de precisión de los fondos de todos los mares y océanos<sup>1</sup>. Los análisis interferométricos son una herramienta que también está en sus inicios, mientras que el LIDAR, una variedad del radar, que en vez de ondas de radio utiliza el espectro visible y que permite alzados de altísima precisión, incluso urbanos, está prácticamente aún en estado experimental (Fig. 1).

Todo el campo de la teledetección hubiera sido absolutamente imposible sin los ordenadores, y su desarrollo ha estado íntimamente ligado al incremento de las capacidades de cálculo, y a la miniaturización y avances de la microelectrónica.

### 3. APLICACIONES ESPECÍFICAS EN LAS CIENCIAS DE LA TIERRA

#### 3.1. Geofísica

La Geofísica es uno de los campos de las Ciencias de la Tierra, en los que se han

aplicado los ordenadores desde su aparición. La gran cantidad de cálculos necesarios para realizar correcciones y la aplicación de filtros de la señal, han hecho que desde los primeros ordenadores con tarjetas perforadas y en el lenguaje Fortran se "corriesen" aplicaciones geofísicas. Por otra parte, en Geofísica (como en Física) los cálculos muchas veces no son directos, sino procesos iterativos que deben ir comparando los resultados de la aplicación de un modelo con los resultados obtenidos en la campaña de campo. Incluso ordenadores relativamente sencillos son muy apropiados para realizar estos procesos iterativos. Por ejemplo, un simple y primitivo PC con procesador 8086, eso sí, equipado con coprocesador aritmético, permitía al operador obtener unos primeros resultados a partir de los datos de campo, en el mismo día de su obtención con métodos geofísicos como la gravimetría o el método electromagnético de control de pulsos (EMP). Para tal fin se desarrollaron unos primitivos ordenadores "portables" (voluminosos como una maleta mediana y de una veintena de kilos), pioneros de los actuales portátiles. Tenían el tamaño de un PC corriente, pero con un monitor monocromo de 9 o 13" encastrado en la caja, en la que el propio teclado hacía a la vez de tapa en una de sus caras más delgadas.

Por supuesto para la corrección y modelización de estos datos se precisaba de ordenadores potentes que eran a la sazón *mainframes* o al menos estaciones de trabajo. En métodos de obtención y sincronización de datos mucho más complejos como la sísmica de reflexión, siempre se ha necesitado de equipos grandes, incluso para el registro de los datos, dada la gran cantidad de sismógrafos en una línea sísmica multicanal. Durante muchos años se registraban los datos en cintas que posteriormente se procesaban para la eliminación de ruidos, *stacking* y migración. Posteriormente el ajuste de las líneas sísmicas, ya fuese seleccionando, por el binomio geofísico-geólogo, velocidades sísmicas para los diferentes cuerpos rocosos, o aplicando los que se pudieran haber obtenido de un sondeo sísmico vertical (disparos realizados desde abajo hacia arriba realizados en un sondeo ubicado en la misma línea sísmica

<sup>1</sup> Topografía del fondo de los océanos: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/image/estimatedimages.html>

tróleo en la parte más alta al NE. Mediante un riguroso estudio de los testigos del yacimiento y de los sondeos que no habían dado con la roca almacén, se pudo determinar que la roca almacén correspondía a un atolón, con arcillas de lagoon en la parte central, y margas de plataforma abierta rodeando el atolón. Por lo tanto el yacimiento no era un óvalo, sino una forma más parecida a un anillo o un toroide.

Cuando hubo que aplicar métodos secundarios (inyección de agua) o terciarios (inyección de detergentes o gasoil) para optimizar la recuperación del crudo del almacén (en este caso se alcanzó 60-65% en métodos secundarios y 90-95% con los terciarios), el conocimiento del almacén, que había podido ser modelizado tridimensionalmente gracias a la interpretación sedimentológica detallada de los sondeos, permitió escoger los puntos ideales para optimizar la dirección de los fluidos inyectados, ya fuese agua en primer lugar o detergentes, muchos más caros, finalmente. Se puede afirmar que en el caso de Goose River, al modelización del yacimiento permitió la recuperación económicamente rentable de un 35% del almacén, y prolongar la vida de éste más de ocho años manteniendo el mismo ritmo de producción.

En la industria del petróleo las modelizaciones 3 D se utilizan para prever las líneas de flujo dentro del macizo rocoso. Bruscas variaciones en la permeabilidad, como pueden ser el ejemplo del arrecife mencionado o la geometría y frecuencia de canales fluviales arenosos, dentro de las lutitas de una llanura de inundación, deben ser modelizados a partir de datos de sondeos e implementados mediante algoritmos probabilísticos. El que dos sondeos de explotación consecutivos estén comunicados por cuerpos sedimentarios, estructuras tectónicas (fallas, fracturación, etc...) o cavidades kársticas, o aislados por arcillas, cineritas, sales, es una diferencia fundamental y las compañías precisan saberlo. De ahí, la evolución de la sedimentología, la sísmica, y la modelización 3D. Estos dos últimos campos se han enriquecido particularmente con el desarrollo de la informática. Estos programas nacidos normalmente en la industria del petróleo se han utilizado también o han producido líneas derivadas para la estratigrafía y la modelización estructural. Podemos consultar un ejemplo en el trabajo de Remacha *et al.* (2004) que han realizado

una modelización tridimensional en la cuenca eocena surpirenaica central, en el que además de la estructura se representan las numerosas variaciones de facies en estos materiales.

Los programas para la modelización del flujo, permiten hacer previsiones sobre el comportamiento de los campos a corto y medio plazo según la producción de los pozos en barriles día, y del comportamiento del yacimiento a largo plazo. Estos simuladores desarrollados con amplios recursos económicos en la industria del petróleo, han sido posteriormente incorporados con sumo éxito en el campo de la hidrogeología (p. ej. el programa Modflow).

### 3.2.2. Hidrogeología

La Hidrogeología es otro de los campos de la Geología que se ha beneficiado rápidamente de la aparición de la informática, en particular por su capacidad de cálculo. Los hidrogeólogos han tenido habilidad para simplificar la realidad geológica lo suficiente, como para poder hacer modelizaciones y simulaciones desde estadios tempranos de la informática. Por regla general, los geólogos tenemos la necesidad profesional de anotar y representar muchos detalles, que habitualmente utilizamos en el gabinete para analizarlos mediante un proceso deductivo, parecido al empleado por los detectives (es esta una razón por la que existen bastantes geólogos en los cuerpos de policía y del Ministerio de Hacienda). Dicha profusión de detalles es difícilmente o en absoluto modelizable, por lo cuál puede resultar un arte separar entre estos datos el polvo de la paja, para conseguir construir un modelo capaz de reflejar la realidad. En Hidrogeología, sobre todo en los modelos originales, se tuvo esa capacidad de abstracción con lo que se pudieron hacer modelos digitales de la realidad. Pese a su simplificación las modelizaciones simularon satisfactoriamente los flujos o el comportamiento de los acuíferos sometidos a bombeo y recargas.

Desde el análisis de un simple ensayo de bombeo o su recuperación, hasta el comportamiento general de un acuífero a largo plazo, son susceptibles de interpretación y modelización con ordenador, y los hidrogeólogos se han dedicado a ello desde que han tenido acceso a la informática, comenzando con los ordenadores de fichas perforadas, y mejorando y simplificando las herramientas según han ganado capacidad de cálculo y se han abaratado

a un ordenador que podrá realizar los cálculos necesitando poca ayuda del operador, lo que permite datos más precisos y con menos errores. Por ejemplo, las actualizaciones, debidas a las obras públicas recientes, pueden

nales, mapas de pendientes total y según una dirección, mapas de visibilidad, simulaciones de vuelos sobre un recorrido concreto (Fig. 2). Los mapas obtenidos tienen un aspecto que los profanos pueden confundir con



Fig. 2.—Perspectiva del Sinclinal de Herrera del Duque, Badajoz, visto desde el SW, realizada utilizando el modelo digital del terreno de la Carta Militar Digital de España. La imagen 1 está obtenida a partir de interferometría de satélite, mientras que esta imagen está realizada contando únicamente con los datos topográficos de elevación.

—Perspective view of Herrera del Duque Syncline (province of Badajoz), seen from the South West, produced using the terrain digital model included in the Military Digital Map of Spain.

The figure 1 was obtained from satellital interferometry, whereas this image was produced using only an elevation topographic model.

hacerse rápidamente (en función de la precisión requerida) con un DGPS (DALDA MONRÓN, 1997).

Estas innovaciones y una acertada política cartográfica del Instituto Geográfico Nacional, han permitido que España cuente desde hace algunos años de una cobertura topográfica digital, a Escala 1:25.000. Esta es una herramienta revolucionaria de la que aún no se aprovecha todo el potencial. Esta base de datos digital, no quiere decir que los mapas topográficos estén escaneados o digitalizados, sino que toda la cobertura nacional cuenta con un dato de elevación cada 25 m (cada milímetro en un mapa a E 1:25.000). Esto es un modelo digital del terreno. Además también está digitalizada y estructurada en capas toda la información habitualmente impresa en un mapa topográfico.

Desarrollaremos brevemente a continuación la idea de lo que nos permiten hacer conjuntamente un ordenador y un modelo digital del terreno. Podemos hacer mapas de isolíneas, sombreados, bloques tridimensionales,

una imagen de Teledetección, pero como el modelo topográfico no incluye la vegetación, frecuentemente aporta más información de la geografía física que las imágenes de satélite (ver la figura en SAN JOSÉ, 2003). Se puede además superponer una imagen ráster (cuya información está compartimentada en píxeles), por ejemplo sobre ortofotos, ortoimágenes, mapas geológicos o cualquier otro tipo de mapa temático, y a partir de ahí generar perspectivas, que en muchos casos nos van a dar imágenes de aspecto muy real, o nos van a permitir comprender mejor un mapa geológico complejo, al simular el relieve. Otras aplicaciones de uso sencillo, generan anaglifos, lo que nos permite ver el relieve tanto en pantalla como proyectado, para lo que el usuario necesita únicamente gafas de colores distintos o con diferentes polarizaciones para cada ojo.

Otras aplicaciones, menos difundidas permiten, por ejemplo, dibujar la geología sobre una foto aérea, que en el programa está georreferenciada, pero que nosotros ve-



versiones mejoradas de estos productos en Internet. Muchas veces están agrupadas en paquetes comerciales. Sin embargo en 1991, Linus Torvalds un estudiante de informática inicia en la Universidad de Helsinki, escribiendo las primeras líneas de código y combinando su nombre con el del sistema operativo UNIX, el sistema operativo gratuito LINUX<sup>4</sup>. Los jóvenes profesores de universidades, especialmente físicos, se adhirieron rápidamente a esta corriente escribiendo aplicaciones originales que desarrollaron este sistema operativo gratuito, estable y potente. Desde entonces muchas aplicaciones geológicas libres y gratuitas están disponibles en Internet para prácticamente todas las tareas específicas del geólogo, geoquímico e hidrogeólogo en todos sus campos. Curiosamente, por la gran expansión del sistema Windows, pese a ser las aplicaciones de Linux gratuitas, y en general mejor acabadas y más compatibles, son poco conocidas fuera de algunos ambientes universitarios.

#### 4. LA RED GLOBAL: INTERNET

##### 4.1. *Desarrollo histórico de Internet*

Ya hemos expuesto algunas aplicaciones tanto de cálculo aplicados a campos específicos de la Geología, control de laboratorios, programas de cartografía tanto en aplicaciones SIG como C.A.D., modelizaciones 3D y simulaciones, siempre en función de la experiencia del autor, pero lo que realmente ha constituido una auténtica revolución, y nos encontramos aún en pleno proceso de expansión y desarrollo, provocando incluso un cambio de actitud en profesionales, docentes e investigadores, ha sido la generalización de Internet, y de varias de sus aplicaciones inmediatas como bases de datos, correo electrónico, acceso digital a revistas y posibilidad de descarga de éstas (obtener una copia en formato estándar, pdf, que se almacenará en nuestro ordenador).

Explicar, aún sucintamente, el desarrollo de Internet desde sus orígenes en 1962, hasta la situación de red global descentralizada actual es tarea de más de un artículo (BARRY *et*

*al.*, 1997, 98; CHAMERO, 2005)<sup>5</sup>. En 1962 Licklider escribe un ensayo introduciendo el concepto de una red en la que todo el mundo está interconectado pudiendo acceder a programas y datos desde cualquier lugar del planeta, convirtiéndose ese mismo año en el primer director de ARPA. En 1963 un comité de la industria y el gobierno de los EE.UU. crean el código ASCII (cuya pronunciación original es Asky), siendo el primer estándar mundial para computadoras con 128 configuraciones, y entre ellas todo el abecedario. Para incluir los acentos, la ñe y caracteres de otros idiomas como la ç, hubo que esperar al ASCII ampliado con 256 configuraciones correspondientes a otros tantos caracteres. En 1964 buscando solucionar el problema de seguridad estratégica, ante un posible ataque nuclear, se pretende que la información no esté centralizada, y que el sistema de información no tenga jerarquía. Se obtienen soluciones comunes por numerosos investigadores acerca de los problemas de convergencia. En 1966 aparece la idea de enrutamiento bajo "paquetes" lo que acelera significativamente en 1967, la transmisión de 2.400 a 50.000 bytes por segundo (bps).

En 1968 se produce un hecho significativo; en la sede de Los Ángeles de la Universidad de California (UCLA) se conecta la supercomputadora más grande del mundo en ese momento, pudiendo acceder por primera vez investigadores científicos a su base de datos. En 1969 aparece la primera requisitoria de registro de comentario (RFC), que señala el comienzo del patrimonio intelectual de Internet; el mismo grupo desarrolla el primer protocolo de control de redes (NCP). En 1970 comienza la expansión de Internet: aparece un nuevo nodo por mes.

En 1972, otro hecho revolucionario, la aparición del e-mail, el correo electrónico inventado por Ray Tomlinson quién selecciona arbitrariamente el símbolo @ para la fórmula convencional de las direcciones *usuario@servidor*. Ese mismo año comienza el desarrollo del lenguaje "C". En 1973, la red pionera ARPA pasa a ser DARPA por la importancia que adquiere la D, del Departamento de Defensa. Aparecen otras dos redes PRNET de Hawai, y SATNET, del

<sup>4</sup> Linux: <http://www.monografias.com/trabajos14/linux/linux.shtml#historia>

<sup>5</sup> Historia de Internet: <http://www.albanet.com.mx/articulos/HISTORIA.htm> (<http://www.albanet.com.mx/> (artículos))

tores de bases de datos nos avisan de la aparición de nuevos artículos o eventos que pudieran ser de nuestro interés. Podemos estar al corriente de una información que nos interese, en un par de minutos, usando un buscador común (*Google, Lycos, Altavista, MSN*) y de información científica especializada adicional mediante los recursos que nos brindan actualmente las bibliotecas en la red ("*Cisne*", *First Search*<sup>6</sup>, *Isi Web of Knowledge*<sup>7</sup>).

Como hemos indicado en el apartado anterior, no existe un control central en la red, por lo que hay en ella tantas ventajas como inconvenientes. En una biblioteca o en una revista de prestigio, lo que se encuentra disponible ha pasado una serie de controles, filtros y editores que mejoran y seleccionan los productos. En la red encontraremos posiblemente lo mejor, pero también elementos sin ninguna supervisión e incluso delictivos. El criterio del usuario final es por lo tanto más necesario que nunca para discriminar las fuentes.

Otras posibilidades de Internet además de las indicadas, pueden ser la formación, la difusión de los apuntes y de clases por profesores y alumnos y la existencia de foros de cualquier tipo. Queremos destacar que el Campus Virtual que se ha comenzado a desarrollar en la Universidad Complutense de Madrid por profesores y alumnos, ha multiplicado por cuatro las expectativas iniciales, pero que en una materia tan práctica como la Geología no debe en ningún caso sustituir, sino complementar, el trato directo con el alumno y con el medio físico.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dr. Antonio Perejón Rincón su revisión crítica del original y su dedicación y comentarios para la mejora de este trabajo.

#### BIBLIOGRAFÍA

- CHAMERO, J., 2005. Historia de Internet y El Internet Histórico; [http://www.aunmas.com/future/internet\\_historia/](http://www.aunmas.com/future/internet_historia/)
- DALDA MONRÓN, A. 1997. DGPS y levantamientos topográficos. *Mapping*, **38**: 42-49.
- LEINER, B. M., CERF, V. G., CLARK, D. D., KAHN, R. E., KLEINROCK, L., LYNCH, D. C., POSTEL, J., ROBERTS, L. G. & WOLFF, S. 1997. Una breve historia de Internet (10 parte) *Novática* 130: 4-12 [Http://www.Ati.Es/docs/internet/histint/histint1.tml](http://www.Ati.Es/docs/internet/histint/histint1.tml)
- Una breve historia de Internet (20 parte) *Novática* 131: 44-49 <http://www.ati.es/DOCS/internet/histint/histint2.html>
- REMACHA, E., LABOURDETTE, R., CLIMENT, F., BOLAÑO, F., CRUMEYROLLE, P., OMS, O. & GUAL G. 2004. Modelización 3D combinando los software gOcad y gOsed en dos sistemas turbidíticos del Grupo de Hecho: sistemas Banastón y Morillo (cuenca eocena surpirenaica central). *Geo-Temas*, **6** (3): 275-277.
- SAN JOSÉ, M. A. 2003. Rasgos geológicos fundamentales del antepaís meridional de la Cuenca del Tajo, en Toledo (España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sección Geológica)*, **98** (1-4): 5-22.
- SÁNCHEZ LÓPEZ, C. & FERNÁNDEZ DE GAMBOA, C. 1996. Realización de ortofoto digital 1/25.000 del Parque Natural de Ordesa, *Mapping*; **31**: 92-93.

<sup>7</sup> *ISI web of knowledge*: <http://portal02.isiknowledge.com/>