

**REAL ACADEMIA DE CIENCIAS
EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**

**DE LA COMPRENSIÓN DE LA HISTORIA
DE LA TIERRA AL ANÁLISIS Y PREDICCIÓN
DE LAS INTERACCIONES ENTRE SERES
HUMANOS Y MEDIO NATURAL**

**DISCURSO LEÍDO EN EL ACTO DE SU
RECEPCIÓN POR EL
EXCMO. SR. D. ANTONIO CENDRERO UCEDA**

**Y CONTESTACIÓN DEL
EXCMO. SR. D. ADRIANO GARCÍA-LOYGORRI RUIZ
EL DÍA 7 DE MARZO DE 2003**



MADRID
Domicilio de la Academia
Valverde, 22

Cendrero Uceda, Antonio

De la comprensión de la historia de la tierra al análisis y predicción de las interacciones entre seres humanos y medio natural / discurso leído en el acto de su recepción por Antonio Cendrero Uceda ; y contestación de Adriano García-Loygorri Ruiz el día 7 de marzo de 2003. – Santander : Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2003

ISBN 84-8102-330-2

1. Geología I. García-Loygorri Ruiz, Adriano II. TITULO

551.1/.4

Esta edición ha sido realizada por el SERVICIO DE PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.

ISBN: 84-8102-330-2

D. L.: SA-99-2003

Imprime: Gráficas Calima, S. A.

*A mis padres, Orestes y Lucía, que encendieron
una luz, y a Bronwen, Diana y Adrián, que
ayudaron decisivamente a mantenerla*

ÍNDICE

	<i>Págs.</i>
DISCURSO DEL EXCMO. SR. D. ANTONIO CENDRERO UCEDA	13
Introducción	16
El Actualismo como instrumento de análisis en Geología	7
1 La medida de los tiempos geológicos	19
El nuevo Actualismo	20
El pasado y el futuro de las Islas Canarias	23
Procesos de construcción	24
Procesos de destrucción	25
¿Una próxima catástrofe?	26
Interacción entre procesos naturales y actividad humana en el litoral	29
El ascenso del nivel marino	29
Procesos antropro-geomorfológicos recientes	31
Acción humana y evolución del relieve	32
Los deslizamientos en el pasado geológico reciente	33
La evolución en los últimos tiempos	34
Metabolismo urbano y procesos geomorfológicos	39
¿Podemos comprobar nuestras predicciones?	42
Modelos predictivos	43
Aplicaciones: análisis de amenazas, riesgos e impactos	45
A modo de recapitulación	8
4	
Referencias	51
DISCURSO DE CONTESTACIÓN DEL EXCMO. SR. D. ADRIANO GARCÍA-LOYGORRI RUIZ ..	63

DISCURSO
DEL
EXCMO. SR. D. ANTONIO CENDRERO UCEDA

*“... Maintenant je te prie de me parler des
pierres, d’autant que tu m’as dit qu’en parlant
d’icelles je connaîtrais de beaux secrets.
Je voudrais bien savoir ce que tu en veux dire:
car les uns disent qu’elles ont été formées dès
la création du monde, et les autres disent
qu’elles croissent tous les jours.”*

Bernard Palissy, Discours Admirables (1580)

Excelentísimo Señor Presidente,

Excelentísimos Señores Académicos,

Señoras y Señores:

Deseo en primer lugar expresar mi hondo agradecimiento a los Académicos que han considerado oportuno designarme para ocupar la vacante dejada por el Profesor Fúster Casas. Ese agradecimiento va unido, como no podía ser menos y por razones que inmediatamente comentaré, a un profundo pesar; y también a una cierta perplejidad por el hecho de que la elección haya recaído en mi persona, ya que me resulta difícil imaginar las razones que llevaron a los miembros de la Academia a fijarse en mí. Pienso que, además de la benevolencia del juicio de los Académicos, una posible razón sea el deseo de acoger en esta casa a alguien dedicado al estudio de las interacciones entre los rasgos y procesos de la superficie terrestre y las actividades humanas, ámbito de estudio dentro de las Ciencias de la Tierra que ha ido cobrando una importancia creciente en los últimos tiempos.

Es tradicional que con motivo del discurso de ingreso en la Academia, el electo haga una breve glosa de la figura del Académico que anteriormente ostentó la misma medalla. Esa costumbre, signo de reconocimiento y respeto hacia quien nos ha precedido, se convierte en este caso en algo lleno de significado en el ámbito afectivo, muy enraizado en los orígenes de mi actividad científica. Glosar la figura del Profesor D. José María Fúster Casas constituye para mí, al mismo tiempo, motivo de tristeza y una grata tarea. La tristeza proviene de que mi presencia aquí se debe precisamente a su fallecimiento; aun a riesgo de que mi afirmación se tome como una simple fórmula de buenas maneras, he de decir que el honor que para mí representa haber sido elegido Académico no compensa la pérdida de quien fue primero mi profesor, luego mi maestro, compañero en diversos trabajos y amigo. Espero por tanto que me disculpen si mis palabras sobre su persona se extienden un poco más de lo habitual en estos casos, se apartan de la habitual reseña biográfica y del comentario del currículum, y transitan por caminos que se adentran en la vivencia personal y en los sentimientos.

Conocí al Profesor Fúster siendo yo alumno de tercer curso de Geológicas en la Facultad de Ciencias de la Universidad Complutense –entonces, Universi-

dad Central– y amplié ese conocimiento al año siguiente, al cursar su asignatura de Petrología. Fue uno de los profesores que más profunda huella dejó en mí durante mis estudios de Licenciatura, tanto por sus conocimientos, dedicación y capacidad docente, como por sus cualidades humanas. En esta línea de recuerdos personales, me voy a permitir narrar una breve anécdota, tal vez un poco frívola, que a mi modo de ver ilustra muy claramente el talante de José María Fúster. Con motivo de una excursión de fin de curso a la zona volcánica del SE de España, tuve una fuerte discusión con él (motivada, he de admitir, por una actitud impertinente por mi parte); el nivel y el contenido de ese encuentro verbal llevaron a mis compañeros de curso a sugerir que trasladara mi expediente a Barcelona, pues en Madrid difícilmente llegaría a aprobar la Petrología. Dos o tres semanas después tuvieron lugar los exámenes finales y la calificación recibida fue de sobresaliente. Esa rectitud de comportamiento es algo que pude apreciar, desde entonces, en todas mis relaciones con el Profesor Fúster.

Nada más terminar la carrera empecé a trabajar con él en uno de los primeros proyectos de investigación puestos en marcha en los años sesenta, dentro del ‘Primer Plan de Desarrollo Económico y Social’ de la época; era el conocido como ‘Plan Canarias’. Me inicié así en las tareas de investigación bajo su dirección, siguiendo en el Instituto Lucas Mallada del CSIC y en el Departamento de Petrología y Geoquímica hasta que en 1970 presenté mi tesis doctoral y marché a trabajar fuera de España. Esos años pasados en estrecho contacto con el Prof. Fúster –y con su esposa, la Dra. Elisa Ibarrola– fueron decisivos para mi carrera científica. Aprendí mucho más que Petrología, Geoquímica o Volcanología; aprendí sobre todo a contagiarme de su entusiasmo por la Geología y su dedicación a ella; a sentir la universidad como una forma de vida; a pasar fines de semana en el Museo de Ciencias Naturales tratando de llevar a cabo el proyecto que teníamos entre manos; a tener la mente abierta a nuevas ideas, nuevas técnicas o nuevos enfoques; a estar dispuesto a transitar por nuevos caminos; a buscar las evidencias que pudieran sustentar un razonamiento científico; a no tener resistencia a tomar decisiones que pudieran representar riesgo en el ámbito profesional; a intentar imitar esa rectitud de comportamiento antes mencionada. Las horas compartidas en el aula, el campo, el gabinete y el laboratorio, así como la convivencia en momentos de ocio y diversión, hace que ambos representen para mí una especie de ‘padres científicos’ hacia los que siento algo que va mucho más allá de lo meramente profesional.

Aunque pasado el tiempo mi trabajo científico ha derivado hacia derroteros muy diferentes, la impronta que José María Fúster dejó en mí ha impregnado mi actividad académica desde entonces. Cuando miro hacia atrás, me doy cuenta de que su manera de entender y de sentir la vida universitaria y la investigación han

estado presentes en mi labor profesional desde entonces, en muchas ocasiones sin ser yo consciente de ello. Por tanto, los posibles méritos que los miembros de esta Academia hayan podido ver en mi persona, además de a la inestimable colaboración de mis actuales compañeros de departamento, se deben en gran parte a la semilla que el Prof. Fúster sembró hace casi cuarenta años. Me daría por muy satisfecho si yo fuera capaz de hacer algo similar por alguno de mis discípulos.

Pero es obligado también, dentro de este recuerdo de la figura de mi predecesor, pasar revista a su biografía desde una vertiente más impersonal, centrada en sus aportaciones científicas. Creo no exagerar si digo que el Prof. Fúster fue una de las personalidades más destacadas en la Geología española durante la segunda mitad del pasado siglo, siendo la figura más representativa de la Petrología. Licenciado en Ciencias Naturales en 1945, presentó su tesis doctoral sobre las rocas ígneas de Guinea Ecuatorial en 1950, y desde entonces estuvo dedicado a la investigación petrológica y geoquímica, especialmente sobre rocas y procesos volcánicos. Dirigió más de treinta tesis doctorales, la mayoría correspondientes a problemas relacionados con el volcanismo y las rocas volcánicas, especialmente sobre Canarias. Fue el iniciador de la Volcanología en España, y el principal impulsor de los estudios petrológicos y volcanológicos sobre el Archipiélago Canario, creando una extensa escuela que ha dado amplios frutos, continuando y profundizando esa línea de trabajo. El detallado conocimiento que actualmente existe sobre la geología y volcanología de Canarias se debe en gran medida a él. Las monografías cuya publicación coordinó –y en su casi totalidad escribió– en 1968, como principal resultado final del anteriormente citado proyecto de investigación y coincidiendo con el Simposio Internacional sobre Volcanología celebrado en Tenerife, se pueden considerar como las “piedras maestras” de un edificio iniciado en esos años y continuado posteriormente. Ese edificio está formado por más de un centenar de trabajos –entre otros numerosas hojas del Mapa Geológico Nacional– que han representado un avance sustancial en los conocimientos sobre esas islas, así como un importante cambio en la percepción de las mismas por parte de la comunidad científica. Aunque menos conocida, también desarrolló una intensa tarea sobre el plutonismo y metamorfismo del Sistema Central.

Su labor investigadora y docente produjo grandes frutos, entre los que se pueden destacar sus muy numerosas publicaciones científicas, gran parte de ellas en revistas internacionales de alto prestigio, y la formación de más de veinte catedráticos, profesores titulares e investigadores del CSIC, que actualmente desempeñan su trabajo en diferentes centros del país.

Entre las muchas distinciones nacionales y extranjeras recibidas en reconocimiento a su labor citaré solamente, aparte de su elección para esta Real Academia,

en 1978, la Medalla de Oro concedida en 1999 por el Gobierno de Canarias, como muestra de aprecio por su larga y fructífera labor científica en el archipiélago.

Por último, quiero también rendir aquí homenaje a otro ilustre Académico y amigo, desaparecido hace ya varios años, el Prof. Ángel Ramos Fernández, con quien tuve la fortuna de mantener una grata y fructífera colaboración en los años setenta y comienzo de los ochenta. A él se debe en parte mi interés por los temas de análisis, evaluación y planificación ambiental, los cuales desearía, en la medida de mis posibilidades, ayudar a impulsar en esta Academia. Hace unos ocho años, con motivo de su discurso de ingreso en esta Real Academia, indicaba que se sentía como el entrenador de un equipo de fútbol que es paseado a hombros tras ganar un partido importante, a pesar de que han sido otros quienes han realizado el trabajo duro y han metido los goles. El mismo sentimiento tengo yo en este momento.

Por ello, creo de elemental justicia señalar que el honor que se me hace al nombrarme Académico de esta Real de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales es en realidad un honor que corresponde fundamentalmente a otras personas, mis compañeros –colaboradores y discípulos– de la Universidad de Cantabria. La capacidad, entusiasmo y buen hacer de ese grupo de personas, a lo largo de más de veinticinco años, ha sido realmente lo que ha posibilitado la labor que ha dado lugar a que la atención de la Academia se singularice en mi persona, probablemente no por más merecedor de ella, ciertamente sí por ser de mayor edad que los demás. Deseo hacer patente aquí de forma explícita mi reconocimiento a dichas personas (por orden cronológico): Rafael Antón, Jesús Sáiz de Omeñaca, José Ramón Díaz de Terán, Enrique Francés, José Ramón González-Lastra, Joaquín Sáiz de Omeñaca, Pedro Cifuentes, Pedro Mantilla, Eugenia Pintos, Teresa Calatayud, Manuel Moñino, Begoña Martínez, Victoria Rivas, Luis Salas, Javier Barba, Alberto González, Juan Remondo, Karla Rix, José María Fernández, Cecilia Giusti, Jaime Bonachea, Viola Bruschi, Jurjen Bertens, Jürgen Weischelgartner, David del Corral e Ignacio Olague.

INTRODUCCIÓN

“Homines dum docent discunt.”
(Los hombres aprenden incluso cuando enseñan.)
Séneca, Cartas.

Las reflexiones que presento aquí reflejan un cambio que ha experimentado mi enfoque personal en el estudio de los procesos geológicos y que, a mi

modo de ver, es a su vez consecuencia de una evolución que afecta a las Ciencias de la Tierra. Esa evolución se ha hecho especialmente patente desde hace dos o tres décadas y está teniendo una importante influencia en la orientación de muchas investigaciones geológicas.

La investigación en Geología se ha dirigido fundamentalmente, desde lo que podríamos considerar como los primeros balbuceos de una ciencia geológica más o menos formalizada, en los siglos XVII y XVIII, hacia el conocimiento de la historia del planeta y de los procesos que han originado los materiales, estructuras y formas actualmente existentes en la superficie y el interior de la tierra, su génesis y evolución. Desde entonces, las Ciencias de la Tierra se han dedicado a estudiar la constitución del planeta y a desentrañar los procesos que actúan en él; esto es, a lograr un mejor conocimiento de cómo es la Tierra y una mejor comprensión de su funcionamiento, en el interior y en la superficie y tanto en la actualidad como en el pasado.

Tradicionalmente, estos estudios han adoptado en general un enfoque que podríamos llamar 'histórico'. Han tratado sobre todo de averiguar el pasado de la Tierra, cómo y cuándo se formaron y evolucionaron las distintas partes del planeta o bien éste en su conjunto. Ese conocimiento también tenía una importante vertiente aplicada, orientada sobre todo a la localización y explotación de recursos minerales, energéticos (fundamentalmente combustibles fósiles) e hídricos, así como a la planificación, diseño y ejecución de grandes obras públicas.

Una dificultad importante con la que se han enfrentado siempre las investigaciones en este campo de la ciencia es el carácter irrepetible de los acontecimientos geológicos y los largos períodos de tiempo necesarios para la formación de los materiales y las estructuras que aparecen en la corteza terrestre o en zonas más profundas. Acontecimientos ocurridos hace millones, cientos o miles de millones de años deben reconstruirse sobre la base de 'documentos' escasos y que proporcionan una información incompleta: minerales, rocas, sedimentos y fósiles dispuestos constituyendo estructuras con una determinada geometría y presentando ciertas formas en superficie. Es lo que de forma genérica se denomina el 'registro geológico', el cual presenta toda una serie de analogías con el registro histórico humano.

El Actualismo como instrumento de análisis en Geología

Un instrumento metodológico que ha servido de base a estas investigaciones desde los albores de la ciencia geológica es el sencillo Principio del Uniformismo o del Actualismo, debido a dos eminentes naturalistas escoceses: James Hutton (1726-1797) y Charles Lyell (1797-1875). Formulado inicialmente por

Hutton (1788, 1795) y posteriormente expresado y difundido por Lyell (1830), este principio se contraponía a las ideas catastrofistas de Cuvier (1769-1832), quien, muy influido por la Biblia, interpretaba los rasgos geológicos como consecuencia de una serie de grandes cataclismos pasados.

La idea uniformista representa una interpretación gradualista de la historia de la Tierra y consiste esencialmente en suponer que los procesos geológicos pasados se desarrollaron de la misma forma que los actuales; esto es, dichos procesos han permanecido aproximadamente constantes a lo largo de los tiempos geológicos. El concepto de actualismo, aunque muy similar, presenta algunas diferencias de matiz; considera que los procesos que actúan hoy en día producen efectos análogos que los producidos por procesos similares en el pasado, sin que esto implique un desarrollo uniforme de los mismos.

El modelo actualista se ajusta mejor a la realidad del funcionamiento del planeta, tal como se puso de manifiesto con posterioridad, ya que ha habido procesos que actuaron en el pasado y dejaron de hacerlo en la actualidad (por ejemplo, los ligados a una atmósfera de carácter reductor, hoy inexistente). Igualmente, como comentaré mas adelante, el funcionamiento actual de ciertos procesos no tiene precedente en la historia del planeta.

El razonamiento de tipo actualista es aplicable a la interpretación de los procesos geológicos tanto con modelos gradualistas como catastrofistas. De hecho, con los conocimientos actuales parece evidente que la concepción que mejor se ajusta a la realidad de la historia terrestre es de tipo ‘neocatastrofista’; esto es, los procesos geológicos actúan y han actuado en general de forma gradual, pero también presentan fases especialmente violentas, con periodicidad irregular (grandes inundaciones, terremotos intensos, erupciones violentas) e incluso acontecimientos de tipo catastrófico que han representado modificaciones muy importantes en cortos períodos de tiempo (por ejemplo, el conocido impacto meteorítico de la transición Cretácico-Terciario o, hace unos miles de años, la inundación del Mar Negro como consecuencia del ascenso del nivel del mar, acontecimiento que muy probablemente dio lugar a la idea del ‘diluvio universal’). En lo que sigue presentaré algún ejemplo de esta dualidad gradualismo/catastrofismo en los procesos geológicos.

El concepto de actualismo se suele formular de manera simplificada como: ‘el presente es la clave para la reconstrucción del pasado’. ¿Qué quiere decir esto?; simplemente, que observando cómo se desarrollan los procesos que actualmente tienen lugar en la Tierra, los materiales, estructuras y formas que originan, podemos aplicar el conocimiento así adquirido a la interpretación de materiales, estructuras y formas generados en el pasado y deducir cómo se originaron y los

cambios que experimentaron, así como las condiciones ambientales existentes en el momento de su formación. Esas condiciones ambientales incluyen la composición de la atmósfera, el clima, el campo magnético terrestre, las comunidades bióticas y, en los últimos miles de años, la acción humana; esta última de manera creciente hasta nuestros días. Evidentemente, la aplicación de este razonamiento analógico tiene limitaciones y ha de hacerse con las debidas cautelas.

La medida de los tiempos geológicos

Las ideas anteriores llevaban aparejada la noción de la dilatada duración de los ‘tiempos geológicos’. De hecho, estas ideas tuvieron también influencia en Charles R. Darwin (1809-1892), que tuvo conocimiento de ellas gracias a la obra de Lyell, y contribuyeron a la formulación de su teoría evolucionista.

De acuerdo con las ideas actualistas, los grandes cambios que se observaban en el registro geológico difícilmente se podían concebir en una Tierra con una edad como la que hasta entonces se suponía, basándose en interpretaciones del Antiguo Testamento. Esas interpretaciones llevaron a J. Lightfoot, “Vice-Chancellor” (Rector) de la Universidad de Cambridge, a afirmar que el Cielo y la Tierra fueron creados por la Trinidad el 26 de octubre de 4004 antes de Cristo, a las nueve de la mañana (King, 1976; Gutiérrez Elorza, 2001); esto es, tendrían escasamente 6.000 años.

La falta de métodos y de técnicas instrumentales adecuadas que permitieran establecer la magnitud de los tiempos implicados en los procesos geodinámicos hizo que, durante más de un siglo, la sucesión de los acontecimientos geológicos y la historia de la Tierra tuvieran que basarse en cronologías relativas, de tipo cualitativo. A finales del siglo XIX hubo algunos intentos de cuantificar esa historia, como los de Joly y Thompson (posteriormente Lord Kelvin), ambos en 1889. El primero, basándose en suposiciones sobre la tasa de acumulación de sales en los océanos, calculó una edad de 80-90 millones de años para la Tierra; el segundo, a partir de un modelo de enfriamiento del planeta, estimó su edad en 20-40 millones de años.

El descubrimiento de la radiactividad en 1896 por parte de Becquerel y los estudios de Rutherford (quien en su conferencia de 19 de mayo de 1904, en la Royal Society de Londres, resumió su trabajo sobre las series de desintegración radioactiva de U, Th, Ac y Ra y estableció la noción de período de semi-desintegración) dieron paso al trabajo de Boltwood, que en 1905 puso de manifiesto la posibilidad de datar rocas por el método U/Pb. Las edades obtenidas por Boltwood para el conjunto de muestras que analizó oscilaban entre 410 y 2.200 millones de años (en rea-

lidad, tenían un error por exceso de aproximadamente el 20%) y pusieron claramente de manifiesto la fuerte infravaloración de las cifras anteriores.

En 1911, Arthur Holmes estableció por primera vez la edad de una serie de períodos del Paleozoico y del Precámbrico, comparando las escalas cronológicas relativas de los mismos (de base paleontológica), con las edades absolutas obtenidas por métodos radiométricos. Se abrió así el camino para un cambio fundamental en las Ciencias de la Tierra; se pasó a partir de entonces a disponer de los medios para cuantificar la dimensión temporal de los procesos geológicos, lo que a su vez hacía posible determinar las tasas de dichos procesos y la frecuencia o los períodos de recurrencia de determinados acontecimientos en el pasado. Aunque en esa época todavía no se planteaba, se abría también la posibilidad de hacer extrapolaciones en el tiempo y estimar las tasas de los procesos o la probabilidad de ciertos acontecimientos en el futuro. Esto es, se ponían las bases para el enfoque prospectivo de la Geología que surgiría varias décadas después.

El nuevo Actualismo

El enfoque actualista sigue teniendo una total vigencia en el momento presente y continúa representando una herramienta conceptual de gran valor para el avance de las ciencias geológicas; estas ciencias son en gran medida de carácter empírico, se apoyan en razonamientos de tipo analógico y no disponen de muchos modelos de tipo determinístico con capacidad predictiva.

Pero en las últimas dos o tres décadas del pasado siglo XX ese enfoque de tipo histórico ha experimentado un cambio importante o, más exactamente, ha adquirido una nueva dimensión. Es de todos conocido que la preocupación por los temas ambientales se ha ido extendiendo en las últimas décadas a todos los países y sectores sociales (Delibes, 1979; Stanners & Bourdeau, 1995; UNEP, 1997; E.E.A., 1998; European Commission, 1998; PNUMA, 2000). Esa preocupación se desencadenó inicialmente en los ámbitos científicos, pero se extendió rápidamente y actualmente impregna a los sectores productivos, la política y la sociedad civil en general. Dos hitos muy significativos en este proceso de formación de una 'conciencia ambiental' extendida a la sociedad en general fueron, por un lado, la promulgación de la Ley de Protección Ambiental en Estados Unidos (NEPA, 1970), que representó la irrupción del tema en los ámbitos legislativos y dio lugar a su posterior extensión por todo el mundo; por otro lado, la publicación del conocido como 'Informe Brundtland' (CNUMAD, 1987), que puso las bases para la Conferencia de Río de Janeiro en 1992 y marcó la incorporación del tema a las prioridades de la agenda internacional. Como consecuencia de esa relevan-

cia política y social, se ha producido un proceso de realimentación que ha afectado de manera importante a distintas ciencias y ha contribuido a que éstas se planteen cuestiones y objetivos que antes recibían una atención limitada, o incluso eran considerados de manera despectiva.

Así, la constatación de los procesos de cambio global que está experimentando el planeta, el grave deterioro ambiental que sufren muchos sistemas naturales por acción humana, o los numerosos desastres producidos como consecuencia de fenómenos naturales violentos, han dado lugar a que la investigación geológica haya pasado a dedicar muchos más esfuerzos al estudio de los procesos actuales (Funnell, 1974; Singer, 1975; Murck et al., 1996). Sin abandonar el estudio de lo que podríamos llamar 'antiguo y profundo' (la génesis y evolución de las cadenas montañosas, los procesos en la base de la corteza o en el manto terrestre), se ha intensificado el interés por lo 'superficial y reciente' como, por ejemplo, los cambios globales recientes (IPCC, 1995; Cendrero, 2000), la búsqueda de indicadores geológicos de cambios ambientales rápidos (Berger & Iams, 1996), o la respuesta geomorfológica a las actividades humanas (Panizza et al., 1996; Marchetti & Rivas, 2001).

Además, se está adoptando cada vez más un enfoque integrador y sistémico, de análisis del funcionamiento del sistema terrestre como 'sistema cerrado', en el que se integran una serie de 'subsistemas abiertos', estrechamente interdependientes, afectados por una serie de grandes 'ciclos' que incluyen diversos procesos (Murck et al., 1996). Tenemos así: la atmósfera con sus ciclos climáticos; la hidrosfera y el ciclo hidrológico; la corteza-manto y los ciclos geodinámicos externo e interno; la biosfera, los ciclos biogeoquímicos, el sistema socio-económico, etc. Los cambios en una parte de cualquiera de esos subsistemas no solamente afectan a éste, sino que pueden afectar a otros o al sistema global en su conjunto.

De especial importancia en este nuevo enfoque resulta el análisis de la interacción entre la actividad humana y los procesos terrestres. Nos encontramos actualmente ante una situación sin precedentes en los más de cuatro mil quinientos millones de años de vida del planeta: por primera vez existe una especie con capacidad de influir sobre los distintos sistemas naturales, a nivel planetario, con una importancia cualitativa y cuantitativa que pudiera igualar o superar a la de los agentes naturales. Ejemplos conocidos de esto son: el cambio climático actual, las fortísimas variaciones en la cobertura vegetal, la extinción o modificación de especies animales y vegetales, los drásticos cambios en el ciclo hidrológico o la 'suplantación' de los ríos del mundo como principal agente de erosión y transporte de sedimentos en la superficie terrestre. Actualmente, los

seres humanos parecen ser el principal agente geomorfológico a nivel global; la modificación de formas, la denudación y la acumulación de materiales que producen supera a las originadas por ríos, viento o glaciares (Lüttig, 1992; Cendrero & Douglas, 1996; Rivas et al., 2002). Al mismo tiempo, al aumentar la ocupación de los más diversos espacios y ambientes por parte de la humanidad, con un crecimiento muy marcado de la densidad de población y de estructuras humanas de todo tipo, se han incrementado fuertemente la pérdida de vidas y los daños materiales ocasionados por procesos geológicos violentos.

Ante una situación de este tipo es lógico plantearse interrogantes con respecto al futuro. ¿Podemos predecir cuál será la situación en el globo en conjunto o en ciertas partes del mismo, dentro de veinticinco, cincuenta, cien años o varios siglos? ¿Es posible al menos plantearse ciertos escenarios razonables? ¿Somos capaces de predecir con cierta fiabilidad los efectos de acciones humanas concretas sobre el entorno? ¿Estamos en condiciones de hacer pronósticos sobre como se desarrollarán en el futuro ciertos procesos potencialmente violentos y peligrosos –volcanes, terremotos, inundaciones, deslizamientos– y, por lo tanto, de poner en práctica medidas de mitigación que ayuden a minimizar los daños y las víctimas?

Para ayudar a encontrar respuesta a esas preguntas resulta de gran utilidad el antes mencionado Principio del Actualismo, pero aplicado en sentido inverso: ‘el pasado y el presente son la clave para predecir el futuro’. Esto es, si estudiamos con detalle cómo se han producido en el pasado –más o menos reciente– los procesos que afectan a la superficie terrestre y cómo han variado en respuesta a los cambios ambientales experimentados, si analizamos cómo funcionan esos procesos en la actualidad y cómo interactúan con los seres humanos, podremos hacer extrapolaciones hacia el futuro, e intentar pronosticar las consecuencias de ciertas actuaciones o de determinados cambios.

Nos encontramos, por tanto, con que el estudio y la comprensión de los procesos terrestres se pueden proyectar en un doble sentido: hacia el pasado, para una mejor comprensión de la historia geológica, y hacia el futuro, para predecir los impactos de las actuaciones humanas, plantear escenarios de cambio o tratar de mitigar los riesgos derivados de los procesos geológicos. Este enfoque de carácter prospectivo ha ido cobrando una importancia creciente y son cada vez más los esfuerzos que se dedican a desarrollar modelos que nos ayuden a realizar dichas predicciones. Naturalmente, al igual que ocurre con la aplicación hacia el pasado, el uso prospectivo de estos razonamientos analógicos debe realizarse de manera prudente y plantea ciertas dudas.

Las ideas que acabo de exponer pueden resultar algo vagas o difusas, por lo que trataré de ilustrarlas por medio de algunos ejemplos que espero sirvan

para situarlas en un plano más concreto. Los ejemplos que voy a presentar se apoyan, no sorprendentemente, en investigaciones en las que he participado a lo largo de mi actividad científica. Esas investigaciones han ido jalonando una evolución en mi actividad profesional que refleja la evolución general que antes mencionaba y que me ha llevado de interesarme por procesos ocurridos hace decenas de millones de años a decenas de kilómetros de profundidad, temperaturas de unos 1.000° C y presiones de 10-30 kb, a procesos que ocurren actualmente en superficie, perceptibles a escala de unos pocos años, a temperatura y presión atmosféricas.

EL PASADO Y EL FUTURO DE LAS ISLAS CANARIAS

“Que sais-je?”

Montaigne, Essais (1582)

El primer caso que deseo comentar es el nacimiento y evolución de las Islas Canarias, como resultado de la actividad volcánica.

Las investigaciones llevadas a cabo sobre el archipiélago canario desde hace más de treinta años, impulsadas inicialmente por el profesor Fúster (Fúster et al., 1968 a, b, c, d) y continuadas posteriormente por muchos de sus discípulos (entre otros, Ibarrola, 1969, 1970; López Ruiz, 1969; Muñoz, 1969; Araña, 1971; Cendrero, 1971; Coello, 1973; Hernández-Pacheco, 1973; Hernández-Pacheco e Ibarrola, 1973; Fúster, 1975; Anguita y Hernán, 1975; Pellicer, 1977, 1979; Carracedo, 1979; Fúster, 1981; De la Nuez, 1983; Anguita et al., 1991; Carracedo, 1994), han permitido reconstruir una interesante historia que nos habla del origen de esas islas y de la evolución que han experimentado a lo largo del tiempo, como consecuencia de la actividad volcánica y de otros procesos menos conocidos pero de gran importancia. Esa historia se formuló inicialmente en términos cualitativos, por medio de cronologías relativas. En una fase posterior, cuyo inicio puede situarse en los trabajos de Abdel Monem et al. (1971, 1972) pero que se desarrolla esencialmente a partir del inicio de la década de los ochenta, la aplicación sistemática y detallada de los métodos radiométricos de datación permitió hacer dicha historia más cuantitativa (McDougall y Schmincke, 1976; Schmincke, 1981; Cantagrel et al., 1984; Staudigel et al., 1986; Ancochea et al., 1990; Coello et al., 1992; Fúster et al., 1993; Ancochea et al., 1994; Pérez Torrado et al., 1995; Ancochea et al., 1996; Guillou et al., 1996, 1998; Carracedo, 1999; Day et al., 1999). Se determinaron los lapsos cronológicos a lo largo de los cuales se formaron las diferentes unidades volcano-estratigráficas, se identificaron los momentos en los que ocu-

rrieron algunos episodios sobresalientes y se calcularon las tasas de ciertos procesos, muy especialmente las tasas de emisión de materiales volcánicos.

Procesos de construcción

Los rasgos esenciales de la historia que así se ha reconstruido se exponen brevemente a continuación en lo referente a las formaciones volcánicas subaéreas, dejando de lado los llamados ‘complejos basales’, menos relevantes para lo que aquí se trata de presentar.

Los conocidos como ‘basaltos antiguos’ o ‘basaltos horizontales’, correspondientes a una etapa de formación de escudos volcánicos antiguos, iniciaron su emisión en Fuerteventura, donde se acumularon entre hace aproximadamente 20 y 12 millones de años. Esa acumulación se produjo en Lanzarote entre hace 15 y 4 millones de años aproximadamente, y en períodos más recientes en Gran Canaria, La Gomera y Tenerife. La actividad volcánica ha continuado de forma ininterrumpida en el archipiélago hasta nuestros días, si bien en todas las islas ha presentado, en unos u otros momentos, períodos de reposo. La Gomera es la única isla sin actividad efusiva en los últimos 3 millones de años aproximadamente. Una etapa de formación particularmente rápida de escudos volcánicos recientes ha tenido lugar en La Palma y El Hierro, cuya construcción subaérea empezó hace aproximadamente 2 y 1 millón de años respectivamente.

El cálculo de los volúmenes emitidos en los diferentes lapsos temporales, obtenido por cubicación directa en las formaciones más recientes y por reconstrucción de la geometría primitiva de los edificios en las más antiguas, a través de extrapolaciones morfológicas, ha permitido determinar las tasas de emisión en las diferentes etapas e islas. Esas tasas de emisión han variado entre un máximo de 2-10 km³/ka (kilómetros cúbicos por milenio) para la fase de construcción del escudo antiguo de Gran Canaria (McDougall y Schmincke, 1976; Schmincke, 1981; Bogaard & Schmincke, 1998) y un mínimo de 0,003-0,007 km³/ka para el volcanismo reciente de Fuerteventura (Coello et al., 1992). Sin embargo, para la mayoría de las islas y períodos de actividad volcánica, las tasas presentan valores de 0,1-0,5 km³/ka. En las dos islas que muestran la actividad volcánica más reciente, Tenerife y La Palma, las tasas de emisión durante los últimos 500 años han sido respectivamente de 0,3 km³/ka y 0,15-0,37 km³/ka, en ambos casos muy similares a los promedios generales y a los valores calculados para los diferentes períodos eruptivos en dichas islas.

Nos encontramos así, a grandes rasgos, con un comportamiento en cierto modo ‘uniformista’ del volcanismo en la zona desde hace unos veinte millones

de años, evidentemente con pulsos y oscilaciones alrededor de ese promedio que marca la tendencia general. Esa relativa regularidad de las tasas eruptivas es particularmente marcada en el caso de Tenerife y La Palma, las dos islas con mayor actividad histórica.

Si, aplicando el Principio del Actualismo en sentido inverso, proyectamos esto hacia el futuro, es razonable pensar que las tasas de emisión sigan siendo de un orden de magnitud similar a lo largo de los próximos siglos o milenios, probablemente mucho más. A una escala temporal más acorde con las preocupaciones humanas y con las aplicaciones del conocimiento científico, es igualmente lógico esperar que la frecuencia promedio de las erupciones durante los tiempos históricos (aproximadamente tres por siglo) se mantenga en los siglos próximos. Esto tiene un evidente interés en relación con la previsión de riesgos volcánicos futuros y la elaboración de planes de prevención y mitigación. La reconstrucción de la historia geológica del archipiélago ha permitido establecer también que, afortunadamente, las erupciones de carácter explosivo y, por tanto, potencialmente muy peligrosas, han tenido lugar con frecuencia mucho menor, con períodos de recurrencia de al menos miles de años. Por tanto, la misma aplicación del Principio del Actualismo permite establecer que dicho tipo de erupciones son mucho menos probables en el futuro próximo (aunque eso no quiere decir, por supuesto, que no sean posibles).

Procesos de destrucción

Pero la reconstrucción de la historia geológica nos proporciona otras claves interesantes para tratar de intuir el futuro. Los trabajos antes descritos, así como otros más recientes (Ancochea et al., 1990, 1994; Fúster et al., 1993; Carracedo, 1999; Day et al., 1999; Carracedo et al., 1999; Krastel et al., 2001) han puesto de manifiesto que estos edificios volcánicos son el resultado de una serie de procesos constructivos y destructivos que se suceden y superponen en el tiempo. La acumulación de grandes volúmenes de materiales volcánicos en tiempos relativamente cortos originó la formación de edificios inestables; esto, unido a la fracturación, penetración de magma y actividad sísmica asociadas al volcanismo y la presión de poros causada por la infiltración de agua de lluvia o de agua marina en la base de dichos edificios, dio lugar a la formación de colapsos de proporciones muy considerables en diferentes momentos de la historia geológica de todas las islas, algunos de ellos hace solo unas decenas de miles de años.

Así, en Tenerife (Ancochea et al., 1990, 2000; Cantagrel et al., 1999), el primitivo edificio Cañadas experimentó al menos cuatro episodios de deslizamien-

to, con edades aproximadas de 2,5 millones de años, 1,2-0,7 millones de años, 700.000-500.000 años y 150.000 años; el último de estos episodios dio lugar a la formación de la caldera de Las Cañadas, posteriormente rellenada en parte por el actual edificio Teide-Pico Viejo. Otro gran deslizamiento produjo la formación del valle de Güimar, hace aproximadamente 800.000-600.000 años. En La Palma (Ancochea et al., 1994) hubo al menos tres episodios de colapso, uno hace aproximadamente 1,2 millones de años y otros dos hace casi 700.000 años, los cuales dieron origen a la Caldera de Taburiente. En el caso de El Hierro (Fúster et al., 1993) se han identificado al menos tres episodios, uno datado en menos de 300.000 años, otro menos de 80.000 y un tercero sin datar. Estos descomunales deslizamientos dieron lugar a algunos de los rasgos más espectaculares y característicos del paisaje de Canarias (Cañadas del Teide en Tenerife, Caldera de Taburiente en La Palma o arco de El Golfo en El Hierro).

La energía liberada por estos movimientos fue enorme. Se ha estimado que el deslizamiento de Las Cañadas movilizó unos 80 km³ de roca, lo que representa aproximadamente 5×10^{18} julios (Cendrero y Dramis, 1996). Si ese deslizamiento consistió en un evento único, dicha energía pudo liberarse de manera prácticamente instantánea y sería equivalente al impacto producido por un proyectil de hierro (o un meteorito) de casi 1 km de diámetro desplazándose a una velocidad de 1 km s⁻¹. Es decir, nos encontramos ante procesos de un gran potencial destructivo, muy superior al de cualquiera de las erupciones históricas ocurridas en el archipiélago.

¿Una próxima catástrofe?

En los últimos años (Day et al., 1999; Carracedo et al., 1999; Krastel et al., 2001), basándose en la existencia de algunos signos de inestabilidad en la zona occidental de Cumbre Vieja, el edificio volcánico reciente del sur de la isla de La Palma, se ha señalado la posibilidad de que deslizamientos de esa magnitud puedan producirse en un futuro más o menos próximo. Según los últimos autores, se han identificado al menos 12 deslizamientos submarinos producidos en el último millón de años en los alrededores de La Palma, El Hierro y Tenerife, alguno con un volumen cercano a 1.000 km³; esto es, aproximadamente diez veces mayor que el anteriormente mencionado. La edad de los cinco deslizamientos más recientes se ha estimado entre 13.000 y 536.000 años. De acuerdo con algunos autores (Krastel et al., 2001; Hutton Commentaries, 2001), un deslizamiento instantáneo de esa magnitud produciría un gigantesco tsunami (o maremoto) con una altura en origen de 650 m, el cual podría tener efectos devastadores incluso al otro lado del Atlántico, en las costas americanas.

El razonamiento actualista puede ayudarnos aquí a estimar la probabilidad de un acontecimiento de este tipo. De acuerdo con los datos aportados, en las tres islas citadas se han producido un par de docenas de grandes deslizamientos (entre 10 y 1.000 km³) en los últimos 1,2 millones de años, lo que representa como promedio uno cada 50.000 años. En el caso concreto de La Palma, si consideramos que la rápida acumulación de materiales volcánicos es el principal factor causante de la inestabilidad, y que las perturbaciones producidas por las erupciones volcánicas son el principal proceso desencadenante de los deslizamientos, la relativa uniformidad de las tasas de emisión antes mencionada permite esperar en el futuro frecuencias similares a las del pasado, del orden de cientos de miles de años. Dicho de otro modo, la probabilidad de ocurrencia de dichos procesos es bastante baja (pero no despreciable).

Pero hay otro aspecto fundamental a tener en cuenta ¿es razonable esperar que dichos colapsos se produzcan como movimientos únicos de carácter instantáneo? Lo que se puede observar en la actualidad en la gran mayoría de los deslizamientos que ocurren en muy distintos contextos geológicos es que dichos movimientos rara vez tienen lugar como episodios únicos; en general son el resultado de una serie de movimientos menores escalonados, que se suceden a lo largo de un tiempo más o menos dilatado (días, años, siglos). La observación de los depósitos resultantes de estos movimientos complejos con frecuencia no permite identificar los distintos episodios acaecidos, incluso en deslizamientos de pequeñas dimensiones perfectamente accesibles y observables sobre el terreno. Tal como recientemente se ha puesto de manifiesto (Remondo, 2001; Soto et al., 2002), el uso de técnicas como la del Cs-137, puede permitir la identificación de varios episodios en depósitos de deslizamiento de no más de cuatro décadas de antigüedad, aparentemente producidos por un movimiento único.

Si aplicamos este conocimiento sobre los procesos de deslizamiento actuales a los antiguos deslizamientos de Canarias, tanto subaéreos como submarinos, es razonable suponer que probablemente esos movimientos tuvieron lugar por medio de una serie de pulsos (¿unos pocos, decenas, cientos?) a lo largo de un cierto tiempo (¿años, décadas, siglos, algunos milenios?). Los procedimientos de observación y las técnicas de datación hasta ahora utilizados para el estudio de los grandes deslizamientos de Canarias no permiten diferenciar entre, por ejemplo, un movimiento único y unas decenas de movimientos superpuestos a lo largo de unos siglos. El único caso en el que se estudiado con cierto detalle la evolución de uno de estos grandes movimientos es el de la caldera o barranco de Tirajana, en Gran Canaria (Lomoschitz, 1999; Quintana y Lomoschitz, 2000). Estos autores han puesto de manifiesto que ese deslizamiento es, en realidad, el resultado de numerosos movimientos ocurridos a lo largo de unos dos millones de años.

La diferencia entre un deslizamiento único y numerosos deslizamientos acaecidos en unos cientos de años es poco relevante para el conocimiento de la evolución geológica de las islas; unos siglos es prácticamente ‘un instante’ en el desarrollo de la mayoría de los procesos geológicos. Sin embargo, es absolutamente fundamental cuando se trata de extrapolar el conocimiento sobre el pasado para hacer pronósticos sobre el futuro. Si esos grandes desplomes fueron, como en el caso de Tirajana, una sucesión de movimientos menores a lo largo de un cierto tiempo (aunque solamente fueran unos siglos), lo que representa una suposición bastante razonable, la energía liberada en cada uno de ellos tuvo que ser mucho menor y, por tanto, también la magnitud de los tsunamis correspondientes, caso de que realmente ocurrieran.

Las consideraciones de tipo actualista en un doble sentido nos permiten ir un poco más allá. Es bien conocido que solamente se tiene la seguridad de que un proceso ha ocurrido en el pasado cuando encontramos huellas materiales directamente achacables al mismo (formas, estructuras, depósitos). En el caso que nos ocupa, lo único que podemos constatar es que existen depósitos que indican la existencia de deslizamientos que pudieron ocasionar tsunamis de gran magnitud, pero ninguna evidencia de los efectos de dichos tsunamis, esto es, de la existencia real de los mismos. Si un tsunami de más de 600 m de altura originado en Canarias podría causar efectos devastadores en las costas de América, imagínense los efectos que produciría en las propias islas o en las costas africanas, a solo unos cientos de kilómetros de distancia. ¿Hay alguna evidencia de dichos efectos en el registro geológico de estas zonas?

El mayor tsunami debido a este tipo de procesos del que se tiene constancia histórica es el ocurrido en 1958 en Letuya Bay, Alaska (Hutton Commentaries, 2001). Según esta fuente, el desplome de un acantilado de grandes dimensiones dio lugar a una ola mayor que cualquier rascacielos, que arrancó árboles y suelo hasta alturas de 500 m. ¿Existen en Canarias o en las cercanas costas africanas huellas (formas, depósitos) que pudieran deberse a un proceso similar ocurrido en los últimos cientos de miles de años? De acuerdo con mi conocimiento, no se han encontrado dichas huellas. Esto, naturalmente, no es una prueba inequívoca de que el proceso no haya tenido lugar; tal vez no se han encontrado porque no se han buscado adecuadamente. Como señalaba Goethe (1749-1832) “solamente vemos lo que sabemos”; aunque parece poco probable, es posible que las evidencias geológicas de tan colosales eventos hayan pasado inadvertidas, simplemente porque los geólogos que han trabajado en la zona hasta la actualidad no se planteaban la posibilidad de su existencia.

En resumen, en el estado actual del conocimiento y teniendo en cuenta el conjunto de las evidencias existentes, no se justifican los planteamientos de tipo

catastrofista, como bien ha señalado Carracedo (2001). Aunque hay una cierta posibilidad de que se produzca en Canarias, especialmente en La Palma, el colapso parcial de un edificio volcánico, la probabilidad de que esto ocurra en el próximo siglo difícilmente superaría el 1/1.000. La probabilidad de que dicho colapso tenga el carácter de un episodio único y de que además afecte a un volumen suficientemente grande para producir efectos devastadores como los descritos por Krastel et al. (2001) sería varios órdenes de magnitud menor. El caso analizado pone de manifiesto cómo la juiciosa aplicación del Principio del Actualismo, aunque no despeje todas las dudas, puede ayudar a situar el problema en sus justos términos.

INTERACCIÓN ENTRE PROCESOS NATURALES Y ACTIVIDAD HUMANA EN EL LITORAL

“La Naturaleza ya está hecha, es así.”

Miguel Delibes, *Un mundo que agoniza* (1979)

Un segundo tema que comentaré brevemente (ilustrándolo por medio del análisis de la evolución reciente en la costa cantábrica) es el relativo a las variaciones que el litoral ha sufrido en el pasado y puede sufrir en el futuro, como consecuencia de la conjunción de procesos naturales, procesos globales debidos en parte a causas naturales y en parte a causas humanas, y procesos locales de carácter esencialmente antropogénico.

El ascenso del nivel marino

Uno de esos procesos es el ascenso del nivel de los océanos. Es bien conocida la preocupación actual por el proceso de calentamiento que está experimentando el clima y por el aumento del nivel del mar (Warrick et al., 1993; IPCC, 1995; Cendrero, 2000) que, entre otras cosas, implica. Dicho aumento se ha estimado entre aproximadamente 20 cm y 1 m para finales del presente siglo. Esto representa lo que podríamos calificar como una situación de alto riesgo y alta incertidumbre. Alto riesgo porque, de materializarse, las consecuencias pueden ser muy graves en amplias zonas del mundo; alta incertidumbre, porque realmente no sabemos cuando ni con qué magnitud va a tener lugar. Los modelos disponibles, al igual que ocurre con los razonamientos analógicos de base empírica, permiten hacer pronósticos pero no predicciones exactas. Ante ese tipo de situaciones es conveniente plantear posibles escenarios que nos ayuden a prever las consecuencias del proceso. Como en el caso anterior, para plantear escena-

rios futuros resulta de interés analizar lo que ha ocurrido en el pasado, en momentos que puedan servir para establecer analogías con el futuro próximo.

La observación de ciertos rasgos producidos actualmente en la línea de costa como consecuencia de procesos litorales, nos permite identificar rasgos similares en el pasado y, por tanto, determinar la posición de dicha línea de costa en períodos anteriores. Es el caso de plataformas de abrasión, playas o acantilados. La identificación y datación de rasgos de esa naturaleza en el litoral cantábrico han permitido establecer, por ejemplo, que hace unos 5.500 años, coincidiendo con un período en el que las temperaturas medias en la zona eran 1,5-2° C superiores a las del presente, el nivel del mar se situaba aproximadamente 1-2 m por encima del nivel actual (Moñino, 1986; Moñino et al., 1988; Rivas, 1991; Rivas y Cendrero, 1991, 1995; Salas, 1993a, b; Salas et al., 1996). Salvando la incertidumbre inherente tanto a la determinación de la situación pasada como a las extrapolaciones hacia el futuro, esto representa el equivalente de las condiciones que, basándose en los modelos existentes (IPCC, 1995), se pronostican para finales del presente siglo.

¿Qué consecuencias tendría una situación de este tipo en una zona de fragilidad relativamente baja ante el ascenso del nivel del mar, como es la escarpada costa cantábrica? Según se ha puesto de manifiesto por Rivas (1991) y Rivas y Cendrero (1991, 1995), ascensos del nivel del mar de 0,5 m, 1,0 m y 1,5 m afectarían, respectivamente, a 23,5 km², 79 km² y 97 km² en el conjunto del litoral de Guipúzcoa, Vizcaya y Cantabria. Muchas de las zonas potencialmente afectadas están ocupadas por áreas industriales, urbanas o de grandes infraestructuras. En conjunto, se ha estimado que el valor del 'capital' (terrenos, edificios, estructuras, servicios, etc.) situado sobre esas zonas representa, para los tres escenarios de ascenso citados, 820 x 10⁶, 8370 x 10⁶ y 9770 x 10⁶ dólares USA (cifras no actualizadas al presente).

Pero el ascenso del nivel marino tendría también otras consecuencias de tipo geomorfológico, de gran trascendencia desde el punto de vista socio-económico, como las que afectarían a las playas. Hay una bien conocida regla empírica, la regla de Bruun (1962, 1980) que establece que a un ascenso del nivel del mar le corresponde un avance erosivo, en costas de materiales incoherentes, 100 veces superior. La aplicación de esta regla para los tres escenarios descritos y teniendo en cuenta las dimensiones y características de las playas cantábricas, nos muestra que se produciría la desaparición de 20 km, 31 km y 38 km de éstas, equivalentes aproximadamente al 40%, 60% y 76% de la longitud total de playas en las tres provincias citadas. De hecho, en distintas playas a lo largo de este litoral se pueden observar evidencias de la intensificación de la erosión en las últi-

mas dos décadas. Es posible, aunque no seguro, que dicha erosión sea una manifestación de la elevación del nivel del mar en el pasado siglo, especialmente en su segunda mitad.

Procesos antropo-geomorfológicos recientes

La mirada alternativa hacia el pasado y el futuro también resulta de utilidad al analizar otros aspectos de las interacciones entre los procesos geológicos y las actividades humanas en las zonas litorales. Este tipo de análisis resulta cada vez más pertinente, especialmente si se tiene en cuenta que la actividad humana es en la actualidad un agente geomorfológico de primordial importancia, y que es previsible que dicha importancia se incremente en el futuro.

El caso de la evolución del litoral cantábrico en tiempos recientes (holocenos-históricos) nos sirve para ilustrar esto. Este litoral está constituido mayoritariamente por acantilados labrados en rocas compactas y la evolución que ha experimentado a lo largo de los últimos siglos ha afectado esencialmente a las bahías, estuarios y zonas húmedas litorales. La principal manifestación de los cambios acaecidos es la desecación o relleno de áreas intermareales y zonas húmedas, por acción humana deliberada o indirecta.

Durante los siglos XIX y XX, la extensión total afectada por este proceso fue de unos 73 km², con una tasa promedio de 0,35 km²/año, mientras que la tasa promedio del proceso natural ha sido aproximadamente 0,0025 km²/año a lo largo de los últimos 5.000 años (Rivas & Cendrero, 1991). Las consecuencias ambientales de este proceso son muy diversas e incluyen, entre otras: disminución del volumen de los estuarios y de su capacidad de dilución de contaminantes, pérdida de la diversidad de ecosistemas y reducción de la productividad biológica, además de pérdida de calidad estética y potencial recreativo. Estas pérdidas se han estimado (Cendrero et al., 1981; Rivas y Cendrero, 1991, 1993) en unos 200 millones de dólares USA al año para el conjunto del litoral (Rivas & Cendrero, 1991, cifras no actualizadas).

La extrapolación de las tendencias recientes de este proceso ‘antropo-geodinámico’ nos ayuda hacer pronósticos sobre la situación que cabría esperar en el futuro próximo, de no producirse cambios en las citadas tendencias. Esas extrapolaciones permiten establecer que el conjunto de las zonas húmedas intermareales y húmedas del litoral cantábrico desaparecería –si persisten las citadas tendencias– en menos de 150 años. Una desaparición casi total se ha producido ya en algunas zonas, como por ejemplo la ría de Somorrostro, en Vizcaya.

Por otro lado, el ascenso del nivel marino también produciría algunos efectos beneficiosos, tales como los relativos a la recuperación de ciertas zonas húmedas litorales, aquéllas que han perdido su funcionalidad como consecuencia de acciones de aislamiento o desecación. El análisis realizado por Rivas (1991) ha puesto de manifiesto que existen unos 37 km² de marismas y zonas intermareales en esta situación, y que recuperarían su funcionalidad si el nivel marino aumentara en la medida prevista. Dicha recuperación, tal como ha puesto de manifiesto la evolución constatada en tiempos históricos y actuales, puede ser muy rápida (unos cuantos años) y tendría como consecuencia un marcado aumento de la productividad biológica (Cendrero et al., 1981).

Las cifras comentadas ponen claramente de manifiesto que nos encontramos ante tendencias no deseables, que pueden dar lugar a un deterioro importante de la calidad ambiental en un lapso de tiempo muy corto, incluso desde el punto de vista de la historia humana. Análisis como el brevemente presentado aquí sirven para alertarnos con respecto a la necesidad de tomar medidas que sirvan para atajar las tendencias descritas. Evidentemente, como la causa fundamental de esos cambios geomorfológicos y de sus consecuencias es la actividad humana, las posibilidades de control son altas.

ACCIÓN HUMANA Y EVOLUCIÓN DEL RELIEVE

*“Misce stultitiam consilis brevem:
dulce est desipere in loco.”
(Mezcla la estupidez con la cordura:
es grato divagar en ocasiones.)*
Horacio. Odas.

Una de las principales manifestaciones de la actuación de los procesos geológicos sobre la superficie terrestre es la gradual denudación de la misma, con la consiguiente suavización del relieve. Esa lenta evolución del relieve es debida a la actuación del conjunto de los procesos geodinámicos externos, movidos por la energía solar y la gravedad, por medio del aire y del agua como agentes fundamentales. Estos procesos están actualmente muy afectados por las actuaciones humanas. Aunque la importancia de esa influencia humana se ha señalado desde hace tiempo (Marsch, 1877; Flawn, 1970, McKenzie & Utgard, 1972; Cendrero, 1980; Lüttig, 1992), son pocos los datos cuantitativos existentes que permitan establecer la magnitud y las implicaciones de la misma.

La importancia creciente de la intervención humana sobre los procesos geodinámicos externos y sus posibles consecuencias futuras se pueden ilustrar

por medio del estudio de los procesos de deslizamiento. Los movimientos de ladera constituyen uno de los principales mecanismos que determinan la evolución general del relieve en las regiones de clima templado-húmedo, en las que mayoritariamente se ubican las sociedades industrializadas, que son, lógicamente, las que tienen más capacidad de influencia sobre el medio.

Los deslizamientos en el pasado geológico reciente

Uno de los problemas con los que se enfrenta el intento de cuantificar el desarrollo de estos procesos en el pasado es la dificultad de determinar edades absolutas que permitan obtener tasas para los mismos. Un lugar en el que se ha podido establecer un número considerable de edades absolutas que han permitido caracterizar el desarrollo temporal de los deslizamientos es el valle del Magdalena-Pas, en Cantabria (González Díez, 1995; González Díez et al., 1996, 1999). En esa zona, por medio de una detallada cartografía geomorfológica, se pudo establecer una cronología relativa en la que se identificaron nueve grupos cronológicos de deslizamientos. Dicha cronología relativa fue posteriormente ratificada y traducida a edades absolutas por medio de 38 dataciones radiométricas y de algunas dataciones arqueológicas. Los lapsos temporales correspondientes a los grupos identificados son: >120.000 años antes del presente (BP), 120.000-50.000 BP, 50.000-30.000 BP, 30.000-15.000 BP, 15.000-5.500 BP, 5.500-3.000 BP, 3.000-200 BP, 200-25 años y <25 años. Como es habitual, la duración de los lapsos temporales establecidos aumenta a grandes rasgos con el tiempo pues, al igual que ocurre con la historia humana, cuanto más antigua es la época estudiada tanto más difícil es la obtención de información y, por tanto, mayores las dificultades para establecer una cronología o una sucesión de acontecimientos detallada.

La cartografía realizada y las observaciones sobre el terreno permitieron determinar los volúmenes movilizados en cada período considerado y, a partir de éstos, las 'tasas de movilización' por deslizamientos; esto es, el volumen promedio desplazado por los movimiento de ladera, por unidad de superficie y unidad de tiempo (o espesor promedio por unidad de tiempo, suponiendo una distribución uniforme del volumen deslizado en toda la zona de estudio). Las citadas dataciones han servido también para establecer la edad de varias superficies antiguas, que han permitido reconstruir el relieve en varios momentos del pasado y, a partir de esa reconstrucción, calcular las tasas de denudación que han determinado la evolución de dicho relieve. Las tasas así obtenidas se han contrastado con otras calculadas de manera independiente, para tiempos relativamente recientes, basándose en la acumulación de sedimentos en cuencas cerradas.

El conjunto de los resultados obtenidos muestra que las tasas de movilización y de denudación son de una magnitud comparable; es decir, el proceso general de evolución del relieve parece estar determinado fundamentalmente por los movimientos de ladera. Estos movimientos disgregan y preparan los materiales superficiales, de modo que son posteriormente arrastrados por la erosión hídrica y evacuados hacia las zonas de sedimentación.

Por otro lado, se observa un claro aumento de las tasas de movilización con el tiempo, con incrementos especialmente marcados en momentos que coinciden con la intensificación de las actividades humanas sobre el territorio, con los consiguientes cambios en la cobertera y en los usos. Esos momentos coinciden con la irrupción de los pobladores neolíticos, entre 6.000 y 5.000 BP, que trajo como consecuencia un fuerte incremento de las talas y quemas de bosques, (según se pone de manifiesto en los registros polínicos; Salas, 1993a) y con la revolución industrial, marcada en esta región por el fuerte auge de la construcción naval y de las ferrierías del siglo XVIII, que también dieron lugar a una importante deforestación.

Teniendo en cuenta los datos anteriores y el fuerte grado de intervención humana que actualmente experimenta el medio, a causa de los procesos de urbanización y de desarrollo de infraestructuras o cambios de uso del territorio, podemos extrapolar las tendencias observadas y aventurar que en las décadas venideras sería de esperar un aumento de las tasas de los procesos que determinan la evolución del relieve. Especialmente relevante desde el punto de vista humano es el previsible incremento en la frecuencia de los deslizamientos de tierras. Si, además, tenemos en cuenta el probable aumento en la irregularidad de las precipitaciones, como consecuencia del cambio climático (IPCC, 1995), y dado que las lluvias intensas son el principal agente desencadenante de esos movimientos, no parece arriesgado pronosticar que los problemas debidos a estos procesos deberían aumentar de forma significativa en un futuro no lejano.

La evolución en los últimos tiempos

Como hemos visto, el estudio de la evolución de los procesos de deslizamiento a lo largo de los últimos miles de años pone de manifiesto una tendencia al aumento de las tasas de dichos procesos, achacable a la influencia humana como causa más probable, y permite suponer que habrá de producirse un progresivo aumento de la frecuencia con el tiempo. Sin embargo, el análisis temporal realizado tiene una precisión limitada, que no supera el orden de siglos, por lo que resulta conveniente tratar de ver hasta qué punto las tendencias así identificadas se

confirman por medio de análisis más precisos, que cubran períodos más cortos y próximos, y por tanto más acordes con las preocupaciones humanas.

Ese tipo de análisis se ha llevado a cabo mediante el estudio de los deslizamientos ocurridos en el bajo Deva (Guipúzcoa) desde mediados de los años cincuenta (Remondo, 2001; Remondo et al., 2002c). El trabajo se ha basado en el examen detallado de fotografías aéreas de escalas entre 1:12.000 y 1:20.000, obtenidas en los años, 1954, 1970, 1983, 1985, 1991, 1993 y 1997, así como en el consiguiente trabajo de campo. Esto ha permitido elaborar un inventario de más de 2.500 movimientos de ladera, de los cuales aproximadamente el 80% son deslizamientos superficiales que afectan a los materiales de cobertera. La distribución temporal de estos deslizamientos superficiales, que se muestra en la Tabla 1, es muy ilustrativa.

Tabla 1. Distribución temporal de la frecuencia y tasas de los deslizamientos superficiales en el bajo Deva (Remondo, 2001).

Período	Frecuencia (Nº/km ² /año)	Tasa (mm/año)
<1954	?	?
1954-70	0,14	0,03
1970-83	0,15	0,04
1983-85	1,36	0,31
1985-91	0,44	0,10
1991-93	0,91	0,21
1993-97	1,07	0,25

Según se aprecia a partir de los datos presentados, en poco más de 40 años se ha producido un aumento de aproximadamente un orden de magnitud en la frecuencia y tasa del proceso, con una tendencia de tipo logarítmico. La única excepción es el lapso 1983-85, el más corto de los establecidos y coincidente con el episodio de intensas lluvias de agosto de 1983 que ocasionó graves inundaciones y muy numerosos deslizamientos en todo el Cantábrico oriental.

Aunque, como en el caso comentado, está claro el papel de las lluvias intensas como agente causal inmediato de los deslizamientos, la tendencia general del aumento que se observa no muestra relación con la evolución de las precipitaciones a lo largo del mismo período. Un análisis comparativo de las frecuencias y tasas citadas y las precipitaciones totales, nº tormentas/año y nº días/año con intensidades superiores a 50, 75 y 100 mm, no revela variaciones que puedan explicar tan fuerte aumento de las primeras. Tampoco otros posibles agentes causales, como la sismicidad, muestran variaciones (ni intensidad) que puedan explicar lo observado.

El otro agente causal que puede explicar las variaciones observadas en la frecuencia de los deslizamientos es la actividad humana. Las observaciones realizadas por Remondo (2001) revelaron que solamente el 7% de los deslizamientos inventariados muestran una relación clara con actuaciones humanas. Si se incluyen además aquellos movimientos en los que pudiera haber alguna influencia, aunque esta sea indirecta o dudosa, la proporción puede superar el 40%, apreciable pero también insuficiente para explicar el aumento constatado, que corresponde aproximadamente a un factor 10.

¿Qué otra explicación podría haber para el aumento observado? Dicha explicación puede encontrarse en la consideración del modelo *Fuerza motriz- Presión-Estado-Impacto-Respuesta* aplicado a los sistemas naturales (OECD, 1993, 1994; Mortensen, 1997; Moldan y Bilharz, 1997; Cendrero, 1997, Jiménez Beltrán, 2000). Existe una serie de *fuerzas motrices* que surgen del sistema socio-económico, que dan lugar a que se produzcan determinadas *presiones* sobre el medio; dichas presiones modifican el *estado* de algunas de las características del medio, lo que representa un *impacto*, que a su vez genera una *respuesta* por parte de los sistemas naturales para ajustarse a la nueva situación, pero también del sistema socio-económico, siempre que los impactos producidos sean lo suficientemente serios como para causar preocupación entre los agentes sociales.

En el caso que nos ocupa, la fuerza motriz que determina las presiones potenciales sobre el territorio sería la combinación: número de personas + capacidad de intervención 'per capita'. Esta, a su vez, es el resultado de tecnología + riqueza. En otras palabras, cuanto mayor sea la población existente sobre un territorio y mayor su nivel económico (que va unido a una mayor disponibilidad de tecnología), mayores serán en principio las presiones. Dichas presiones incluyen, por ejemplo, aumento de edificios o de infraestructuras de distinto tipo, cambios de uso del territorio, mayores consumos de agua y de otros recursos, la introducción de diferentes sistemas de cultivo, etc. Las actuaciones citadas deben causar modificaciones de diversos factores que afectan a la estabilidad del terreno, tales como pendiente, propiedades hidrológicas, cobertera, densidad de vías de comunicación, cohesión de la capa superficial, etc., que representan el estado del mismo. Los impactos sobre ese estado se manifestarían, entre otras cosas, en una respuesta geomorfológica del sistema, en forma de aumento de la frecuencia de deslizamientos y de la tasa de movilización por acción de los mismos. Si este razonamiento es correcto, tendríamos que la actuación humana ejercería una influencia indirecta y difusa, funcionando sobre todo como agente preparatorio que facilitaría y acentuaría los efectos desencadenantes de las lluvias intensas. Un dato que parece corroborar esto es que episodios de lluvias similares a los de 1983, ocurridos en los años 50 y 60, no produjeron deslizamientos comparables,

ni en número ni en volumen movilizado. En resumen, podríamos estar ante un sistema que recibe una señal de entrada (cambios en la fuerza motriz) que es procesada dentro del mismo y da lugar a una señal de salida, en forma de cambios en la tasa del proceso.

Con el fin de explorar la posibilidad de que el modelo citado sea aplicable al problema que nos ocupa, se analizó la variación del producto interior bruto (PIB) de la zona desde 1950 hasta la actualidad, en relación con la tasa de movilización. Se ha considerado que el PIB total puede ser un indicador adecuado de la conjunción personas + capacidad de intervención y, por lo tanto, un posible indicador de fuerza motriz. El aumento de ambas variables es similar en los dos casos, cercano a un orden de magnitud. Se ensayaron ajustes con distintos tipos de funciones; el mejor ajuste obtenido corresponde a la ecuación:

$$y=160436 \ln(x)+10^6; \quad R^2=0,7331.$$

Siendo: x =tasa de denudación en mm/año; y =PIB en millones de Ptas.

Aunque el número de datos (lapsos temporales) utilizados es limitado, el resultado obtenido sugiere que la relación entre ambas variables no es aleatoria y corresponde a una función de tipo logarítmico. Evidentemente, esto no quiere decir que exista una clara relación causa-efecto, pero sí indica que es poco probable que la correlación sea casual, y que tal vez el modelo propuesto sea una explicación plausible de lo que se observa. Suponiendo que el razonamiento sea válido, estaríamos todavía ante un modelo de tipo 'caja negra', en el que sabemos 'lo que entra' y 'lo que sale' en el sistema, aunque no comprendamos adecuadamente lo que ocurre en el interior de la caja; dicho de otra forma, todavía no conocemos con suficiente detalle los mecanismos causa-efecto encadenados que podrían dar lugar al resultado final observado.

Igualmente se analizó en esta zona la relación entre la tasa de movilización por deslizamientos y la tasa de denudación. Al igual que en los casos descritos por González (1995), González et al. (1999) y Cendrero y Dramis (1996), se encontraron valores no muy alejados de 1, indicativos de que el proceso general de denudación en estas zonas está controlado fundamentalmente por los movimientos de ladera, que actúan como agentes erosivos directos y también como agentes 'preparatorios', facilitando la posterior erosión hídrica de los materiales movilizados y disgregados. Esto es, la tasa general de denudación y la velocidad de evolución del relieve en la zona han experimentado un aumento de un orden de magnitud en menos de medio siglo.

Si el modelo propuesto (relación entre PIB como fuerza motriz y aumento de las tasas de deslizamiento y denudación como respuesta geomorfológica del

sistema) es válido cabría esperar, como consecuencia lógica, que hubiera un reflejo en las tasas de sedimentación, y esto en cualquier valle de la región, dado que el aumento en la fuerza motriz es común para toda ella. Con el fin de comprobar esto se han llevado a cabo determinaciones de las tasas de sedimentación en dos puntos de la Ría de Urdaibai (o Ría de Guernica), por medio de los métodos Cs-137 y Ra-226/Pb-210 (Soto et al., 2002, Remondo et al., 2002c). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Variación de la edad con la profundidad en sedimentos de dos puntos de la Ría de Urdaibai.

Urdaibai E	
Profundidad (cm)	Fecha
1	1994
2	1985
3	1977
4	1966
5	1951
6	1929
7	1875
Urdaibai W	
Profundidad (cm)	Fecha
5	1997
10	1996
15	1983
20	1978
25	1953
30	1936

Según se aprecia, el tiempo necesario para que se deposite un espesor dado de sedimento es en la actualidad mucho menor que hace cincuenta años; esto es, las tasas de sedimentación también han aumentado de forma considerable en las últimas décadas.

Los momentos de fuerte aumento en las tasas de denudación antes indicados (Neolítico y Revolución Industrial, González, 1995; González et al., 1999) también corresponden, evidentemente, a incrementos marcados del PIB. Dado que dicho aumento es también de un orden de magnitud –aunque con tasas absolutas diferentes– nos encontramos con que, muy probablemente, las tasas de los procesos que determinan la evolución del relieve han experimentado un crecimiento de dos órdenes de magnitud como consecuencia indirecta de la influencia humana sobre los mismos.

Ahora bien, si el modelo propuesto es válido (algo todavía por comprobar), no hay razón para pensar que no esté funcionando en otras zonas del mundo, especialmente en los países industrializados. En ese caso sería de esperar que ‘respuestas geomorfológicas’ de este tipo fueran algo generalizado.

Metabolismo urbano y procesos geomorfológicos

Pero hay otro tipo de efectos que debemos considerar en relación con la influencia humana en la evolución del relieve: los derivados de los procesos de formación y evolución de las áreas urbanas. Las aglomeraciones urbanas son un tipo de formación o unidad geomorfológica que apareció en la Tierra hace unos pocos milenios y que no tuvo una presencia significativa sobre el planeta hasta prácticamente el pasado siglo. Puede que esta consideración de las ciudades como unidad geomorfológica resulte algo sorprendente a primera vista, pero si reflexionamos un poco advertiremos que comparten todos los rasgos propios de las unidades geomorfológicas naturales (Cendrero et al., 1987 a). En efecto, una unidad geomorfológica se caracteriza por unas formas, unos materiales superficiales y unos procesos, propios de la misma y diferentes de los que presentan unidades de otro tipo. Las ciudades presentan sin duda formas, materiales superficiales y procesos característicos, si bien, a diferencia de lo que ocurre con la mayoría de las unidades geomorfológicas, las áreas urbanas son el resultado de la acción de organismos vivos: los seres humanos. Existen otras unidades geológicas o geomorfológicas que también se deben a la acción de organismos, (arrecifes coralinos, algunos tipos de formaciones tobáceas, rocas organógenas), aunque ninguna de ellas se debe a una única especie. Los entornos urbanos son las partes del planeta en las que la importancia cualitativa y cuantitativa del ser humano como agente geodinámico externo es más patente. Es algo comparable a lo que ocurre, por ejemplo, con la acción glaciaria en los climas fríos o la de los organismos bioconstructores en las zonas litorales cálidas.

La génesis y la evolución de las ciudades implican, como en el caso de otras unidades geomorfológicas, flujos de materiales que proceden de unas áreas fuente, en las que predomina la denudación, y su consiguiente transporte a áreas de depósito, donde predomina la acumulación. En el transcurso de ese proceso dichos materiales experimentan transformaciones físicas y/o químicas. El conjunto de estos procesos constituye una especie de ‘metabolismo urbano’, que implica la obtención de materia y energía del medio circundante para alimentar los procesos de funcionamiento y crecimiento de las ciudades, y que da lugar a la producción de distintos tipos de residuos que son finalmente expulsados al exterior.

Este 'metabolismo urbano' tiene una considerable influencia sobre la evolución del relieve (Archer et al., 1987). La construcción de edificios e infraestructuras y la actividad industrial propias de las áreas urbanas requieren una gran cantidad de materiales geológicos, extraídos en zonas próximas o lejanas, transformados y depositados en las ciudades, y parcialmente eliminados en forma de residuos. Se puede comparar el sistema 'montaña-río-cuenca de sedimentación', que de manera simplificada resume el funcionamiento del principal agente geomorfológico natural, el agua, con el sistema 'mina/cantera-carretera/ferrocarril-ciudad' (Sánchez de la Torre, 1983), que resume la actuación humana desde el punto de vista geomorfológico. Aunque existen pocos datos al respecto, los indicios disponibles apuntan a que en la actualidad el segundo sistema supera al primero en volúmenes transportados.

Un análisis realizado en una zona de Cantabria, la cuenca del río Besaya (Rivas et al. 2002), ha puesto de manifiesto que la excavación directa debida a actividades extractivas y de construcción en ella representa el equivalente de una 'denudación promedio', para el conjunto de la cuenca, de aproximadamente 10 mm/año. Se ha estimado que la 'denudación indirecta' producida como consecuencia de la perturbación de la cobertera y la disgregación de los materiales superficiales que dichas actividades implican es del orden de 0,1 mm/año. Lógicamente, las actividades citadas se desarrollan en la actualidad con una intensidad muy superior a la que tenían hace algunas décadas, no digamos en siglos anteriores.

Es interesante comparar las cifras anteriores con las correspondientes a procesos naturales. Las tasas de denudación obtenidas en zonas adyacentes para el Pleistoceno-Holoceno (González et al., 1996) oscilan entre 0,04 y 0,2 mm/año, similares a las halladas por parte de diversos autores en distintas zonas morfoclimáticas (Corbel, 1964; Selby, 1982; Goudie, 1995; González et al., 1996).

Las cifras presentadas corresponden a una zona concreta, pero probablemente son bastante representativas de las condiciones existentes en los valles de la Cordillera Cantábrica. Dichas cifras, aunque sólo son estimaciones aproximadas, indican que la 'denudación directa' debida a las actividades humanas relacionadas con el metabolismo urbano, más la denudación indirecta producida sobre las áreas perturbadas por aquéllas, podría ser en la actualidad dos órdenes de magnitud superior a la causada por los agentes naturales. Análisis preliminares llevados a cabo en tres áreas urbanas de Argentina (Rivas et al., 2002), han puesto de manifiesto efectos similares a los descritos, si bien de magnitud menos acusada.

Teniendo en cuenta que los procesos de expansión urbana son algo generalizado a nivel mundial y aunque no dispongamos de cifras fiables, no es descabellado pensar que este tipo de efectos deben darse en amplias zonas del planeta.

* * *

Los dos tipos de efectos geomorfológicos considerados –los producidos sobre los procesos de deslizamiento y los ocasionados de forma directa e indirecta por las excavaciones y acumulaciones debidas a actividades relacionadas con el metabolismo urbano– parecen haber incrementado en tres o más órdenes de magnitud las tasas de movilización de materiales geológicos en la Cordillera Cantábrica, en comparación con las tasas existentes antes de que la influencia humana en la zona fuera significativa, hace algo más de 5.000 años. ¿Sería muy aventurado suponer que el cambio cuantitativo descrito puede no ser muy diferente en muchas otras zonas del planeta?

Los procesos de expansión urbana y las actividades relacionadas con ellos se deben claramente a la fuerza motriz antes indicada: el aumento del número de personas y de su capacidad económica y tecnológica ‘per capita’. A pesar de las evidentes desigualdades existentes en la situación económica entre distintas regiones del mundo, ese crecimiento del producto bruto (habitantes más producto por persona) se viene produciendo de manera paulatina (aunque irregular en el tiempo) a lo largo de los últimos siglos, tanto a nivel global como en la gran mayoría de los países, y lo mismo ocurre, incluso de forma más acusada, con el crecimiento de las áreas urbanas. Podemos por tanto suponer que el aumento del PIB total muy probablemente está produciendo en el conjunto del planeta una ‘respuesta geomorfológica’ que se manifiesta tanto en la aceleración de los procesos erosivos, como en los relacionados con la expansión urbana, más directos y localizados, que implican en conjunto un fuerte aumento de las tasas de transporte de materiales, así como de las tasas de sedimentación.

Siguiendo con estas consideraciones, dado que es muy probable que esa tendencia al aumento del PIB global continúe en el futuro próximo, es de esperar que las tasas de movilización sigan aumentando también a ritmos similares, salvo que se produzcan, además de la ‘respuesta geomorfológica’, algunas ‘respuestas sociales’ encaminadas a contrarrestar los efectos descritos.

El análisis presentado nos permite conocer mejor el desarrollo de los procesos geomorfológicos, a través de lo que podemos considerar el resultado principal de la actuación del conjunto de los mismos, la transferencia de materia sólida sobre la superficie terrestre y la consiguiente modificación del relieve. También

nos ayuda a comprender el papel que la intervención humana directa e indirecta puede estar representando en dicha evolución. En los razonamientos anteriores hay sin duda una parte de especulación, pero acudiendo de nuevo a la aplicación prospectiva del Principio del Actualismo, podemos intentar entrever el futuro: de ser válido el modelo presentado y generalizables las tendencias descritas en el funcionamiento de los procesos analizados, el ritmo de éstos podría incrementarse de nuevo uno o más órdenes de magnitud a lo largo del presente siglo.

A grandes rasgos y simplificando una realidad compleja e insuficientemente conocida, podríamos tal vez distinguir dos grandes ‘modelos geomorfológicos’, cualitativa y cuantitativamente distintos y correspondientes a dos épocas de la historia de la Tierra y de la Humanidad. En primer lugar, el modelo propio de la etapa pre-industrial, en el cual los agentes fundamentales de la denudación eran el agua y la gravedad, responsables de la mayoría de los procesos geomorfológicos. En el segundo modelo, que habría empezado a funcionar con la revolución médica e industrial y que continuaría en la actualidad, el agente fundamental serían las actividades humanas –directas e indirectas– y se caracterizaría por tasas de movilización varios órdenes de magnitud superiores. Esto es, estamos ante lo que parece ser una ‘dimensión geomorfológica del cambio global’. Las consecuencias de este cambio no son fáciles de anticipar, pero sin duda se trata de un fenómeno que merece ser analizado con más profundidad.

¿PODEMOS COMPROBAR NUESTRAS PREDICCIONES?

*“Deplorable is man’s ignorance in
natural science and modern
philosophers, like those who dream in
darkness, need to be aroused
and taught the uses of things...”*

William Gilbert. De Magnete (1600).

¿Hasta qué punto es posible utilizar este tipo de análisis retrospectivo y las extrapolaciones derivadas de él para hacer pronósticos más cuantitativos y precisos, para lapsos temporales que se puedan relacionar con los procesos humanos de planificación y toma de decisiones?

Cuando se intenta predecir el futuro sobre la base del comportamiento pasado, es importante tener presentes dos cosas. A) Si no existe un control del desarrollo temporal del proceso en términos cuantitativos, no será posible hacer estimaciones de la probabilidad de ocurrencia de determinados acontecimientos en el futuro; B) la suposición de funcionamiento estrictamente actualista o, más bien,

uniformista (esto es, que los procesos se van a seguir produciendo de la misma manera) tiene ciertas limitaciones; si las condiciones ambientales de las décadas venideras difieren de las existentes en las pasadas (cosa particularmente probable en lo que se refiere al clima y a la actuación humana) el comportamiento de los procesos analizados presentará también diferencias aunque, lógicamente, factores causales similares deberán seguir dando resultados análogos.

Para intentar responder a estos interrogantes es preciso llevar a cabo análisis con mayor poder de resolución, utilizando una 'ventana temporal' más fina. Dado que los plazos normales para la planificación de actividades humanas son de unas pocas décadas, resulta apropiado realizar análisis retrospectivos con una duración de ese orden, a fin de hacer extrapolaciones para lapsos similares.

Modelos predictivos

Este tipo de aproximación ha sido la empleada por Remondo (2001) para aplicar el análisis retrospectivo de los deslizamientos a la elaboración de mapas de susceptibilidad, que representan la plasmación cartográfica de la aplicación del Principio del Actualismo hacia el futuro. Estos mapas de susceptibilidad, amenaza o riesgo se han venido elaborando desde hace bastante tiempo y por distintos procedimientos (Valentini, 1967; Brab et al., 1972; Panizza, 1973; Carrara y Merenda, 1974; BRGM, 1975, 1979; Stevenson, 1977; Nilsen et al., 1979; Hansen, 1984; Cendrero et al., 1987b; Corominas, 1992; Chacón et al., 1992; van Westen; 1993; Hutchinson, 1995; Irigaray, 1995; Wu et al., 1996; Jefferies et al., 1996; Zêzere, 1997; Santacana, 2001, entre otros) y, aunque hayan aplicado esquemas metodológicos diferentes, prácticamente todos ellos se basan en una hipótesis en general no explícitamente formulada, que se podría resumir como: el comportamiento pasado del territorio con respecto a los procesos de deslizamiento, comparado con las características de dicho territorio, permite predecir el comportamiento futuro del mismo. Los mapas de susceptibilidad, amenazas, riesgo, etc., que en general existen son lo que podríamos considerar la expresión gráfica de dicha hipótesis. Los niveles de 'amenaza' (o peligrosidad) que se representan para distintas zonas se establecen por medio de comparaciones o correlaciones entre la distribución de los deslizamientos ocurridos en el pasado y los diferentes factores condicionantes de la inestabilidad de las laderas. Ahora bien, en casi todos los casos esos mapas tienen el significado de una hipótesis no contrastada (aunque sin duda razonable) y no se conoce la capacidad predictiva de los mismos.

Es por tanto conveniente buscar procedimientos que permitan validar la hipótesis de forma independiente, lo que al mismo tiempo ayudaría a establecer la validez de la aplicación del 'Principio del Actualismo inverso' para hacer pre-

dicciones con significado cuantitativo. El trabajo de Remondo (2001) ha ido encaminado precisamente a la propuesta, aplicación y contraste de ese tipo de procedimientos. Basándose en un inventario de más de 2.500 deslizamientos producidos entre 1954 y 1997 en la zona del valle del Deva (Guipúzcoa) antes indicada, ha elaborado numerosos modelos de susceptibilidad, cuyas predicciones ha validado por procedimientos diversos.

Para la obtención de mapas de susceptibilidad ha utilizado técnicas de análisis de datos espaciales a través de un sistema de información geográfica, aplicando distintos tipos de modelos probabilísticos. Estos modelos se basan en la utilización de distintas ‘funciones de favorabilidad’ (Chung y Fabbri, 1993, 2000; Fabbri y Chung, 1996; Chung et al., 2000; Fabbri et al., 2002; Remondo et al., 2002 a, b), que sirven para expresar la susceptibilidad (o probabilidad espacial relativa) de cada punto del territorio a experimentar deslizamientos en el futuro. Los citados modelos se basan en las siguientes suposiciones:

- Los deslizamientos futuros ocurrirán bajo circunstancias similares a las que los han producido en el pasado.
- Todos los factores condicionantes son conocidos y han sido incluidos en el análisis.
- Todos los deslizamientos ocurridos en el pasado han sido identificados e incluidos en el análisis
- Además, varias de las técnicas matemáticas descritas requieren que las variables sean continuas, normales, independientes, etc.

Estas suposiciones no son del todo correctas, por lo que los distintos modelos que se obtengan, expresados en forma de mapas de susceptibilidad, son sólo una aproximación a la realidad, a la verdadera susceptibilidad. La capacidad predictiva de los citados modelos tendrá que establecerse por medio de una validación independiente.

Esa validación puede realizarse de acuerdo con distintas estrategias (Remondo, 2001, Remondo et al., 2002a, b): A) espacial, dividiendo la zona de estudio en dos partes, una que se utiliza para elaborar el modelo y la otra para comprobar la predicción; B) aleatoria, dividiendo la población total de deslizamientos analizados en dos conjuntos seleccionados de manera aleatoria, uno de análisis y otro de control; C) temporal, en la que los deslizamientos producidos en un cierto período se emplean para elaborar el modelo y los de otro período, normalmente posterior, sirven para validar la predicción. Aunque cualquiera de los procedimientos indicados puede servir para validar los modelos y, por tanto, la hipótesis en que se basan, la última estrategia es la que verdaderamente permite tener una idea de la capacidad de los modelos para predecir el futuro, y también la que puede permi-

tir contrastar la validez de la suposición de tipo actualista. Para ello, es necesario conocer con bastante detalle la evolución del proceso en el pasado, lo cual solo es posible si se tiene un control cronológico razonablemente bueno.

El análisis llevado a cabo por Remondo (2001) se ha basado en la utilización de una serie de variables relacionadas con la geometría del terreno, sus características hidrológicas, distribución de las precipitaciones, litología del substrato, formaciones superficiales y cobertera vegetal. Dichas variables se han correlacionado con la distribución de los deslizamientos ocurridos durante el período estudiado, aplicando diferentes funciones de favorabilidad, obteniéndose un número considerable de modelos (mapas) de susceptibilidad, la cual se representa en doscientas clases o niveles, cada uno de ellos equivalente al 0,5% del área de estudio.

Los resultados obtenidos tras la validación de los distintos modelos han mostrado que, a grandes rasgos, el 20% del territorio ocupado por las clases de más alta susceptibilidad predice adecuadamente el 60% de los deslizamientos producidos. Además, se identifican también adecuadamente las zonas que se pueden considerar seguras, esto es, en las que no se producirán deslizamientos en el período de predicción y que representan aproximadamente el 35% de territorio analizado. En otras zonas, donde las condiciones son más favorables (Santacana, 2001; Remondo, 2001), la capacidad de predicción es más alta; con el 20% de la zona se predice correctamente el 80% de los movimientos y se identifican como zonas seguras aproximadamente el 50% del territorio.

Pero hay otros resultados de interés que nos llevan al eje central de lo que aquí se comenta: la posibilidad de aplicar el razonamiento actualista a la realización de pronósticos y de análisis prospectivos. Remondo (2001) ha llevado a cabo la validación de los modelos elaborados con deslizamientos ocurridos entre los años cincuenta y ochenta, comparándolos con distintos grupos temporales de movimientos, de los años ochenta y noventa. Los resultados obtenidos han sido prácticamente iguales en todos los casos, a pesar de que, como se ha señalado antes, la frecuencia de los movimientos ha experimentado un aumento de aproximadamente un orden de magnitud a lo largo del período analizado. Esto pone de manifiesto que la suposición inicial de comportamiento actualista es esencialmente cierta, aunque eso no implica, evidentemente, un desarrollo uniforme de los procesos a lo largo del tiempo.

Aplicaciones: análisis de amenazas, riesgos e impactos

Las posibilidades que ofrece este tipo de análisis tienen otras ramificaciones interesantes para el trabajo en Geología, como por ejemplo una mejor com-

prensión de los procesos estudiados o la posibilidad de desarrollar instrumentos de análisis que mejoren nuestra capacidad de observación de los rasgos del terreno. La elaboración de curvas de validación para cada una de las variables por separado, y para distintas combinaciones de las mismas (distintos modelos de susceptibilidad), permite establecer cuáles son las que influyen en mayor medida en la aparición de deslizamientos y, por tanto, ayudan a concentrar el esfuerzo en las variables más significativas, aumentando la eficiencia de los análisis.

Un resultado sorprendente (a primera vista) del trabajo del citado autor es que utilizando únicamente variables de tipo geométrico o topográfico, derivadas del modelo digital de elevaciones (MDE), la calidad de la predicción es casi tan buena como la que se logra incorporando, además, otras variables en principio más significativas, como la litología, el espesor del material de cobertera o la vegetación. Esta aparente contradicción se explica porque dichas variables no son independientes; la forma del terreno es el resultado de la actuación de procesos pasados, sobre determinados materiales y estructuras, en un contexto climático dado, los cuales han dado lugar a ciertos materiales de cobertera y suelos, y a cierta vegetación. Por tanto, las variables que reflejan la geometría del terreno tienen una importante carga de información sobre las variables estrictamente geológicas o geomorfológicas y son en parte redundantes con ellas. Dado que las técnicas de elaboración de modelos digitales de elevaciones y de tratamiento de datos espaciales por medio de sistemas de información geográfica (SIG) han avanzado de forma muy importante, se están alcanzando unos niveles de precisión en la representación de las variables geométricas y de profundidad en el análisis de las mismas que no es posible en el caso de las variables geológicas.

Por citar solamente un ejemplo: la existencia de vegetación y de materiales de cobertera hace imposible, en muchos casos, la determinación precisa de los límites entre formaciones geológicas, la estructura de detalle o el espesor exacto de los depósitos superficiales. El error en la determinación de esas variables, salvo que se dedique a la obtención de las mismas un esfuerzo ímprobo, imposible en la práctica, difícilmente va a permitir el análisis para 'pixels' (celdas) de 10x10 m, cosa perfectamente abordable para los rasgos puramente morfométricos. Las variables derivadas del MDE se caracterizan por su gran objetividad, por ser de obtención automática y muy económica. Esto es, el MDE puede servir como herramienta de teledetección, que permita derivar información útil sobre la constitución geológica o el desarrollo de ciertos procesos. Así, el análisis retrospectivo del proceso y la proyección hacia el futuro de los resultados de dicho análisis abren también la posibilidad de desarrollar nuevos instrumentos que pueden servir para aumentar nuestra capacidad de observación de los rasgos geológicos.

Además, al disponer de datos sobre la frecuencia de los deslizamientos en diferentes lapsos temporales, resulta posible transformar los mapas de susceptibilidad (que tiene el significado de una probabilidad espacial) en mapas con significado de probabilidad espacio-temporal o mapas de amenazas. Esto es, siguiendo con los resultados anteriores, no solo se puede decir que los 'pixels' o celdas del territorio con susceptibilidad superior al 80% más alto experimentarán el 60% de los deslizamientos que ocurran en la zona en los próximos 10 años, sino que se podrá especificar la probabilidad de que en cada uno de ellos tenga lugar un deslizamiento durante dicho período.

Según se desprende de lo anterior, con los procedimientos descritos se obtienen modelos que no son ni mucho menos perfectos, pero que tienen una razonable capacidad de 'predecir el futuro'. Dicho de otra forma, la aproximación de tipo actualista permite hacer predicciones con un grado de fiabilidad conocido y determinado de forma independiente, y con un significado comparable, en cierto modo, al de las predicciones meteorológicas.

También se pueden aplicar el razonamiento y la metodología aquí descritos a la elaboración de mapas de riesgos en sentido estricto; es decir, mapas que representen los daños probables en el futuro, como consecuencia de la actuación del proceso analizado. Para ello (Weischelgartner y Bertens, 2000; Weischelgartner, 2001) se deben considerar tanto variables físicas como socio-económicas, estas últimas indicativas de los factores que determinan la vulnerabilidad de vidas y bienes humanos ante el proceso correspondiente. Como en el caso anterior, la fiabilidad de los modelos habrá de establecerse a través de la validación independiente de las predicciones realizadas a partir del mismo.

El Principio del Actualismo posibilita, sobre la base de un análisis retrospectivo de carácter empírico, la elaboración de modelos probabilísticos que permiten la formulación de pronósticos con una capacidad predictiva comprobada y acotada de forma cuantitativa. Esta posibilidad de establecer de forma cuantitativa y contrastada la capacidad de un modelo para predecir el futuro es algo muy poco frecuente en Geología y constituye una novedad prometedora.

Las predicciones derivadas de los análisis de tipo retrospectivo/prospectivo que se comentan aquí tienen también aplicación en otros ámbitos, como son las evaluaciones de impacto ambiental (EIA). Una evaluación de impacto ambiental implica la realización de predicciones sobre las modificaciones que experimentarán los distintos rasgos o procesos del medio como consecuencia de cambios introducidos en el mismo por actuaciones humanas concretas (Leopold et al., 1971); igualmente requiere evaluar (es decir, emitir un juicio) hasta qué punto las citadas modificaciones representan una alteración grave o aceptable de las condiciones ambientales.

Dichas predicciones, lógicamente, tienen siempre un cierto margen de incertidumbre y pueden abordarse (Bertens et al., 2000) basándose en modelos determinísticos (cuando existen y se pueden obtener suficientes datos sobre las variables implicadas) o en modelos de tipo probabilístico de base empírica. El análisis del funcionamiento de los procesos en el pasado y de su respuesta a los cambios que hayan sufrido permite plantear escenarios realistas de las situaciones futuras. Así, sobre la base de los mapas de susceptibilidad antes descritos, se pueden analizar los efectos probables de distintas rutas alternativas para la construcción de una autopista (González-Díez et al., 2000; Remondo, 2001; Bonaechea et al., 2002) y evaluar de forma comparativa los impactos. La superposición de la traza de la autopista sobre el mapa de susceptibilidad permitirá determinar con facilidad que alternativa afectará a mayor número de 'pixels' o celdas con alta susceptibilidad y, por tanto, producirá mayor impacto sobre los procesos de inestabilidad de laderas. Pero, además, también hace posibles algunas predicciones de los efectos esperables. Determinando la proporción de 'pixels' de alta susceptibilidad afectados en el pasado por deslizamientos –con y sin influencia humana– así como las dimensiones y alcance de estos, se pueden hacer simulaciones que planteen supuestos 'optimistas', 'promedio' o 'pesimistas' del comportamiento futuro. Se obtienen así imágenes realistas (no predicciones seguras) de la previsible situación futura y, por tanto, se pueden evaluar las consecuencias de la actuación propuesta.

A MODO DE RECAPITULACIÓN

"Naturam expellas furca, tamen usque recurret"
(Puedes expulsar a la Naturaleza con una horca,
pero siempre regresará.)

Horacio, Epístolas.

A lo largo de este discurso he tratado de ilustrar el doble ejercicio de análisis del pasado e intento de predicción del futuro en el que las ciencias geológicas se ven cada vez más implicadas. Para ese ejercicio, como hemos visto, resulta de gran utilidad el Principio del Actualismo. Este sencillo y bien conocido principio ha ayudado a construir el grueso del cuerpo doctrinal de la Geología desde sus inicios como ciencia y, desde que se abrió la posibilidad de cuantificar la dimensión temporal de los procesos geológicos, ha hecho también posible la realización de extrapolaciones hacia el futuro. El planteamiento descrito permite al mismo tiempo adquirir un mejor conocimiento de lo que representa actualmente la interacción entre la actividad humana y los procesos geológicos en la superficie terrestre o, de una manera más amplia, algunas de las facetas del

complejo entramado de interrelaciones que se producen entre los diferentes sistemas abiertos que constituyen el sistema terrestre.

En algunos casos la relación de las actividades humanas con el funcionamiento del sistema terrestre es fundamentalmente pasiva; el conocimiento que podemos adquirir sobre el funcionamiento de los procesos en el pasado nos ayuda a pronosticar el futuro, pero todavía no nos proporciona las herramientas adecuadas para influir sobre el mismo. Es el caso de la mayoría de las erupciones volcánicas o de los grandes colapsos de edificios volcánicos antes comentados, y también de casi todos los procesos ligados a la dinámica interna del planeta. Ante este tipo de procesos sólo son posibles, hoy por hoy, estrategias adaptativas, encaminadas a reducir la vulnerabilidad de las sociedades ante los procesos geológicos, pero la posibilidad de influir sobre éstos es todavía prácticamente nula. El avance del conocimiento sobre el desarrollo de dichos procesos en el pasado, y el consiguiente aumento en la fiabilidad de los pronósticos, sin duda ayudarán a mejorar esas estrategias.

En otros casos el papel humano es sobre todo activo, habiendo llegado a suplantar a los agentes naturales y condicionando en la actualidad el funcionamiento de muchos de los procesos que constituyen la dinámica externa. El análisis retrospectivo y la determinación de tendencias a partir del mismo nos permiten señalar que la revolución industrial parece constituir, además de una nueva etapa en la historia humana, una época sin precedentes en la historia de la Tierra, en lo que se refiere al funcionamiento de los procesos geomorfológicos. Los cambios en el sistema humano se están reflejando de manera muy importante en el funcionamiento del ciclo geodinámico externo, afectando al proceso general de evolución del relieve. No es fácil anticipar todas las consecuencias que este cambio en el 'modelo de evolución geomorfológica' puede tener en el futuro, pero los datos presentados hacen suponer que la transformación señalada se hará más acusada en un futuro no lejano.

Si el 'acoplamiento' que parece existir entre los cambios en la fuerza motriz de esta cadena de procesos y la respuesta geomorfológica que el sistema da a aquéllos se mantiene, debemos esperar que efectos como los que aquí he descrito pasen a ser, incluso dentro del presente siglo, mucho más marcados. Algunos de esos efectos, como he intentado mostrar, son en gran medida previsibles; el análisis retrospectivo aplicado con carácter prospectivo nos permite hacer en ciertos casos pronósticos bastante fiables y nos proporciona ciertas herramientas que ayudan a contrarrestar o a anticiparnos a algunos efectos no deseados. La puesta en marcha de medidas preventivas, paliativas o correctivas es posible en la mayoría de estos casos, ya que, como hemos visto, los procesos correspondientes están fuertemente sujetos a influencia humana y son por tanto controlables. La aplicación generali-

zada de esas medidas, que representaría una ‘respuesta social’ del sistema, probablemente permitiría producir un ‘desacoplamiento’ de la relación que parece existir actualmente en el sistema entre la fuerza motriz social y la respuesta geomorfológica. Hasta qué punto seremos capaces de dar ese tipo de respuesta o cuáles serán las consecuencias de no hacerlo es algo sobre lo que no me atrevo a especular. Sí pienso que la concepción y diseño de esas respuestas debería tener presente la frase de Francis Bacon (*Novum Organum*, 1620): “Nature, to be comanded must be obeyed.” (La Naturaleza, para ser dominada ha de ser obedecida).

Lo que sí parece claro, en todo caso, es que un funcionamiento equilibrado de los distintos ‘subsistemas’ que constituyen el sistema terrestre, perturbándolos en la menor medida posible, resulta fundamental para la conservación de nuestro medio. Como hemos visto, ciertas variaciones en uno de esos sistemas pueden producir efectos sobre procesos o rasgos de otros sistemas que a primera vista parecerían no tener relación con el primero.

A lo largo de la dilatada historia de la Tierra y de la vida han sido los factores ambientales abióticos los principales condicionantes de la evolución de los seres vivos, incluidos los seres humanos. En el momento actual podríamos estar entrando en una época en la cual los seres humanos pasen a determinar el desarrollo y evolución de los procesos geológicos superficiales, con consecuencias a medio y largo plazo difíciles de prever y que dependerán en gran medida de la sensatez con la que apliquemos nuestras crecientes capacidades de intervenir sobre la Naturaleza. Esas capacidades son consecuencia del desarrollo tecnológico que marca el progreso experimentado por la Humanidad, aunque no estaría de más contemplar este progreso con un poco de humildad. Señalaba Bertrand Russell (1987): “La vida, dicen, se ha desarrollado del protozoo al filósofo, y ese desarrollo, aseguran, es sin duda un progreso. Por desgracia, todo esto lo asegura el filósofo, no el protozoo”. ¿Representaremos nosotros para el planeta un progreso tan abierto a la duda como el que lleva desde el protozoo al filósofo?

He dicho.

REFERENCIAS

- ABDEL MONEM, A., WATKINS, N. D., GAST, P. W., 1971. Potassium-argon ages, volcanic stratigraphy and geomagnetic polarity history of the Canary Islands: Tenerife, La Palma and Hierro. *Am. J. Sci.*, 271: 490-521.
- ABDEL MONEM, A., WATKINS, N. D., GAST, P. W., 1972. Potassium-argon ages, volcanic stratigraphy and geomagnetic polarity history of the Canary Islands: Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria and La Gomera. *Am. J. Sci.*, 272: 805-825.
- ANCOCHEA, E., FÚSTER, J. M., IBARROLA, E., CENDRERO, A., COELLO, J., HERNÁN, F., CANTAGREL, J. M., JAMOND, C., 1990. Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of new K-Ar data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 44: 231-249.
- ANCOCHEA, E., HERNÁN, F., CENDRERO, A., CANTAGREL, J. M., FÚSTER, J. M., IBARROLA, E., COELLO, J., 1994. Constructive and destructive episodes in the building of a young oceanic island; La Palma, Canary Islands, and genesis of the Caldera de Taburiente. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 60 (3-4): 243-262.
- ANCOCHEA, E., BRÄNDLE, J. L., CUBAS, C. R., HERNÁN, F., HUERTAS, M. J., 1996. Volcanic complexes in the eastern ridge of the Canary Islands: the Miocene activity of the Island of Fuerteventura. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 70: 183-204.
- ANCOCHEA, E., HUERTAS, M. J., CANTAGREL, J. M., FÚSTER, J. M., ARNAUD, N., 2000. Cronología y evolución del edificio Cañadas; Tenerife, Islas Canarias. *Bol. Geol. y Minero*, 111(2-3): 3-16.
- ANGUITA, F. & HERNÁN, F., 1975. A propagating fracture model versus a hot spot origin for the Canary Islands. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 27: 11-19.
- ANGUITA, F., GARCÍA CACHO, L., COLOMBO, F., GONZÁLEZ CAMACHO, A., VIEIRA, R., 1991. Roque Nublo caldera: a new stratocone caldera in Gran Canaria, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47: 45-63.
- ARAÑA, V., 1971. Litología y estructura del edificio Cañadas, Tenerife (Islas Canarias). *Estudios Geol.*, 27:95-135.
- ARCHER, A. A., LÜTTIG, G., SNEZHKO, L. L., 1987. Man's dependence on the Earth; the role of Geosciences in the environment. UNEP-UNESCO, E. Schweizerbart'sche Verlag., Stuttgart.
- BERGER, A. R. & IAMS, W. J. (eds.), 1996. Geoindicators; assessing rapid environmental changes in earth systems. Balkema, Rotterdam.

- BERTENS, J., TAMÉS, P., CENDRERO, A., VAN ASCH, T., 2000. Hydrological models for the assessment of impacts of infrastructures on water-driven geomorphological processes. *Int. Archives on Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII; CD-7/1.
- BOGAARD, P. Van den & SCHMINCKE, H. U., 1998. Chronostratigraphy of Gran Canaria. *Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results*, 157: 127-140.
- BONAECHEA, J., BRUSCHI, V. M., REMONDO, J., GONZÁLEZ, A., SALAS, L., BERTENS, J., CENDRERO, A., OTERO, C., GIUSTI, C., FABBRI, A., GONZÁLEZ LASTRA, J. R., ARAMBURU, J. M., 2002. *An approach for the incorporation of geomorphological factors into EIA of transportation infrastructures; a case study in northern Spain*. *Geomorphology* (submitted).
- BRAB, E. E., PAMPEYAN, E. H., BONILLA, M. G., 1972. Landslide susceptibility in San Mateo County, California. *U.S. Geol. Survey Miscellaneous Field Studies Map*, MF-360.
- BRGM, 1975. Carte ZERMOS à 1:20.000. Zones exposées a des risques liés aux mouvements des sols. Feuille n° 4, La Grave, Région de Valloire (Savoie). Bureau des Recherches Géologiques et Minières. Paris.
- BRGM, 1979. Carte ZERMOS à 1:25.000. Zones exposées a des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol. Region les Orres (Hautes Alpes). Bureau des Recherches Géologiques et Minières. Paris.
- BRUUN, P., 1962. Sea level rise as a cause of shore erosion. *J. Waterways & Harbors Div., Proc. Am. Soc. Civ. Eng.*, 88:117-130.
- BRUUN, P., 1980. The Bruun rule; discussion on boundary conditions. *Proc. Of Bruun Symp., Newport, R. I., Nov. 1979. Int. Geogr. Union*.
- CANTAGREL, J. M., CENDRERO, A., FÚSTER, J. M., IBARROLA, E., JAMOND, C., 1984. K-Ar chronology of the volcanic eruptions in the Canarian Archipelago: Island of La Gomera. *Bull. Volcanol.*, 47-3: 597-609.
- CANTAGREL, J. M., ARNAUD, N., ANCOCHEA, E., FÚSTER, J. M., HUERTAS, M. J., 1999. Repeated debris avalanches on Tenerife and genesis of las Cañadas caldera wall (Canary Islands). *Geology*, 27 (8): 739-742.
- CARRACEDO, J. C., 1979. Paleomagnetismo e historia volcánica de Tenerife. *Aula de Cultura del Cabildo Insular de Tenerife*; Tenerife, 82 pp.
- CARRACEDO, J. C., 1994. The Canary Islands: an example of structural control on the growth of large oceanic-island volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 60: 2225-241.
- CARRACEDO, J. C., 1999. Growth, structure, instability and collapse of Canarian volcanoes and comparisons with Hawaiian volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 94 (1-4): 1-19.
- CARRACEDO, J. C., 2001. Ciencia: utilidad social o pesadilla. *El País, Supl. Futuro*, 5, sept. 2001.

- CARRACEDO, J. C., DAY, S. J., GUILLOU, H., PÉREZ TORRADO, F. J., 1999. Giant Quaternary landslides in the evolution of La Palma and El Hierro, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 94 (1-4): 169-190.
- CARRARA, A. & MERENDA, L., 1974. Metodologia per un censimento degli eventi franosi in Calabria. *Geologia Applicata e Idrogeologia*, 10: 237-255.
- CENDRERO, A., 1971. Estudio geológico y petrológico del complejo basal de la isla de La Gomera, Canarias. *Estudios Geológicos*, 27: 3-73.
- CENDRERO, A., 1980. Geología ambiental; bases doctrinales y metodológicas. I Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, Santander. Vol. Ponencias: 1-62.
- CENDRERO, A., 1997. Indicadores de desarrollo sostenible para la toma de decisiones. *Naturzale* 12: 5-25.
- CENDRERO, A., 2000. Una mirada al estado del sistema terrestre, ¿qué sabemos del cambio global? In: *Horizontes Culturales, las fronteras de la Ciencia*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid: 163-186.
- CENDRERO, A. & DOUGLAS, I., 1996. Earth surface processes, materials use and urban development; project aims and methodological approach. Abstracts with programs, GSA Annual Meeting, Denver: A-79.
- CENDRERO, A., DRAMIS, F., 1996. The contribution of landslides to landscape evolution in Europe. *Geomorphology*, 15: 191-211.
- CENDRERO, A., ELÍZAGA, E., GALLEGO, E., 1987 a. Los problemas de la integración de las áreas metropolitanas en los análisis y cartografía geoambientales. *Actas III Reunión Nac. Geol. Amb. y Ord. Territorio*, Valencia; tomo I: 49-56.
- CENDRERO, A., DÍAZ DE TERÁN, J. R., FERNÁNDEZ, O., GARROTE, R., GONZÁLEZ LASTRA, J. R., INORIZA, I., LÜTTIG, G., OTAMENDI, J., PÉREZ, M., SERRANO, A., 1987 b. Detailed geomorphological hazard mapping for urban and rural planning in Vizcaya (northern Spain). In: F. C. Wolff (ed.), *Geology for environmental planning*. Geol. Survey of Norway, Sp. Publ. 2, Trondheim: 25-41.
- CENDRERO, A., DÍAZ DE TERÁN, J. R., SALINAS, J. M., 1981. Environmental economic evaluation of the filling and reclamation process in the Bay of Santander, Spain. *Environmental Geology*, 3: 325-336.
- CHACÓN, J., IRIGARAY, C., FERNÁNDEZ, T., 1992. Metodología para la cartografía regional de movimientos de ladera y riesgos asociados mediante un SIG. III Simposio Nacional de laderas y taludes inestables, vol. 2: 121-133.
- CHUNG, C.-J. F. & FABBRI, A., 1993. The representation of geoscience information for data integration. *Nonrenewable Resources*, 2: 122-139.

- CHUNG, C.-J. F. & FABBRI, A., 2000. Prediction models for landslide hazard using fuzzy set approach. In: M. Marchetti & V. Rivas (eds.), *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*. Balkema, Lisse: 31-47.
- CHUNG, C.-J. F., FABBRI, A., BAUER, B., CENDRERO, A., 2000. A strategy for sustainable development of natural resources based on prediction models. *Int. Archives on Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII; CD-7/1.
- CNUMAD (Comisión de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo), 1987. *Nuestro futuro común*. Alianza Editorial, Madrid.
- COELLO, J., 1973. Las series volcánicas de los subsuelos de Tenerife. *Estudios Geol.*, 29(6): 491-512.
- COELLO, J., CANTAGREL, J. M., HERNÁN, F., FÚSTER, J. M., IBARROLA, E., ANCOCHEA, E., C. Casquet, JAMOND, C., DÍAZ DE TERÁN, J. R., CENDRERO, A., 1992. Evolution of the eastern volcanic ridge of the Canary Islands based on K-Ar data. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 53: 251-274.
- CORBEL, J., 1964. L'érosion terrestre; étude quantitative (méthodes, techniques, résultats). *Ann. Geogr.*, 73: 1281-1286.
- COROMINAS, J., 1992. Landslide risk assessment and zoning. In: Cendrero, A., Lüttig, G. & Wolff, F. C. (eds.), *Planning the use of the earth's surface*. Springer-Verlag, Berlin: 141-173.
- DAY, S. J., CARRACEDO, J. C., GUILLOU, H., 1999. Age and geometry of an aborted rift flank collapse: San Andrés fault, El Hierro, Canary Islands. *Geol. Mag.*, 134 (4): 523-537.
- DE LA NUEZ, J., 1983. El complejo intrusivo subvolcánico de la Caldera de Taburiente, La Palma. Tesis Doctoral, Univ. Complutense, Madrid.
- DELIBES, M., 1979. *Un mundo que agoniza*. Plaza y Janés, Barcelona.
- E.E.A., 1998. *Europe's environment: the second assessment*. European Environment Agency. Office for Official Publications of the European Communities-Elsevier.
- European Commission, 1998. *Caring for our future. Action for Europe's environment*. Office for Official Publications of the European Communities.
- FABBRI, A. & CHUNG, C.-J. F., 1996. Predictive spatial data analysis in the geosciences. In: M. Fisher, H.J. Scholten & D. Unwin (eds.), *Spatial analytical perspectives on GIS in the environment and socio-economic sciences*. Taylor & Francis, London: 147-159.
- FABBRI, A., CHUNG, C.-J. F., CENDRERO, A., REMONDO, J., 2002. Is prediction of future landslides possible with a GIS? *Natural Hazards* (submitted).
- FLAWN, P. T., 1970. *Environmental geology; conservation, land-use planning and resource management*. Harper & Row, N. York.
- FUNNELL, B. M. (ed.), 1974. *Prediction of geological hazards*. *Geol. Soc. London Miscellaneous Paper n° 3*.

- FÚSTER, J. M., 1975. Las Islas Canarias. Un ejemplo de evolución espacial y temporal del volcanismo oceánico. *Estud. Geol.*, 21: 181-198.
- FÚSTER, J. M., 1981. Evolución geológica del Archipiélago Canario. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid.
- FÚSTER, J. M., FERNÁNDEZ SANTÍN, S., SAGREDO, J., 1968 a. Geología y volcanología de las Islas Canarias: Lanzarote. Instituto Lucas Mallada, CSIC, Madrid.
- FÚSTER, J. M., CENDRERO, A., GASTESI, P., IBARROLA, E., LÓPEZ RUIZ, J., 1968 b. Geología y volcanología de las Islas Canarias: Fuerteventura. Instituto Lucas Mallada, CSIC, Madrid.
- FÚSTER, J. M., HERNÁNDEZ-PACHECO, A., MUÑOZ, M., RODRÍGUEZ BADIOLA, E., GARCÍA CACHO, L., 1968 c. Geología y volcanología de las Islas Canarias: Gran Canaria. Instituto Lucas Mallada, CSIC, Madrid.
- FÚSTER, J. M., ARAÑA, V., BRÄNDLE, J. L., NAVARRO, J. M., APARICIO, A., 1968 d. Geología y volcanología de las Islas Canarias: Tenerife. Instituto Lucas Mallada, CSIC, Madrid.
- FÚSTER, J. M., HERNÁN, F., CENDRERO, A., COELLO, J., CANTAGREL, J. M., ANCOCHEA, E., IBARROLA, E., 1993. Geocronología de la isla de El Hierro (Islas Canarias). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.)*, 88: 85-97.
- GONZÁLEZ DÍEZ, A., 1995. Cartografía de movimientos de ladera y su aplicación al análisis del desarrollo temporal de los mismos y de la evolución del paisaje. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- GONZÁLEZ DÍEZ, A., REMONDO, J., BRUSCHI, V. M., DE LA PEDRAJA, A., RIVAS, V., CENDRERO, A., OTERO, C., 2000. Methods for the assessment of impacts on geomorphological resources; application to a case study in Guipúzcoa. *Int. Archives on Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII; CD-7/1.
- GONZÁLEZ, A., REMONDO, J., DÍAZ DE TERÁN, J. R., CENDRERO, A., 1999. A methodological approach for the analysis of the temporal occurrence and triggering factors of landslides. *Geomorphology*, 30: 95-113
- GONZÁLEZ, A., SALAS, L., DÍAZ DE TERÁN, J. R., CENDRERO, A., 1996. Late Quaternary climate changes and mass movement frequency and magnitude in the Cantabrian region, Spain. *Geomorphology*, 15 (3-4): 291-310.
- GOUDIE, A., 1995. *The changing Earth. Rates of geomorphological processes.* Blackwell, Oxford.
- GUILLOU, H., CARRACEDO, J. C., PÉREZ TORRADO, F., RODRÍGUEZ BADIOLA, E., 1996. K-Ar ages and magnetic stratigraphy of a hotspot-induced, fast grown oceanic island: El Hierro, Canary Islands. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 73: 141-155.

- GUILLOU, H., CARRACEDO, J. C., DAY, S. J., 1998. Dating the upper Pleistocene-Holocene volcanic activity of La Palma using the unspiked K-Ar technique. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 86: 137-149.
- GUTIÉRREZ ELORZA, M., 2001. *Geomorfología climática*. Omega, Barcelona.
- HANSEN, A., 1984. Landslide hazard analysis. In: D. Brunsten & D. B. Prior (eds.); *Slope instability*, Wiley, Chichester: 523-602.
- HERNÁNDEZ-PACHECO, A., 1973. Sobre el significado de las rocas granudas gabroides de los complejos basales de Fuerteventura, La Palma y La Gomera (Archipiélago Canario). *Estudios Geol.*, 29: 549-557.
- HERNÁNDEZ-PACHECO, A. & IBARROLA, E., 1973. Geochemical variation trends between the different Canary Islands in relation to their geological position. *Lithos*, 6: 389-402.
- HUTCHINSON, J. N., 1995. Landslide hazard assessment. Keynote address. In: *Landslides-Glissements du terrain. VI International Symposium on Landslides*. Christchurch, New Zealand. Vol 3. Balkema, Rotterdam: 1805-1841.
- HUTTON, J., 1788. *Theory of the Earth; or an Investigation of the Laws Observable in the Composition, Dissolution and Restoration of Land upon the Globe*. Transactions of the Royal Society, Edinburgh.
- HUTTON, J., 1795. *Theory of the Earth, with Proofs and Illustrations* (vols. I-II; vol. III Publ. 1899). Geological Society of London.
- Hutton Commentaries, The, 2001. Could giant waves hit the Atlantic shores? <http://www.Huttoncomentaries.com/ECNews/GntWavesHitAtlantic.html>.
- IBARROLA, E., 1969. Variation trends in basaltic rocks of the Canary Islands. *Bull. Volcanol.*, 33: 729-777.
- IBARROLA, E., 1970. Variabilidad de los magmas basálticos en las Islas Canarias orientales y centrales. *Estudios Geol.*, 26: 337-399.
- IPCC, 1995. *IPCC-Segunda evaluación; Cambio climático 1995. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. OMM-PNUMA, Ginebra-Nairobi.
- IRIGARAY, C., 1995. *Movimientos de ladera; inventario, análisis y cartografía de susceptibilidad mediante un sistema de información geográfica. Aplicación a las zonas de Colmenar (Málaga), Rute (Córdoba) y Montefrío (Granada)*, Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- JEFFERIES, M., HALL, D., HINCHCLIFF, L. F., AIKEN, M., 1996. Risk assessment: where are we and where are we going? In: S.P. Bentley (ed.), *Engineering Geology of waste disposal*. *Geol. Soc. Eng. Geol. Sp. Publ. No. 12*: 341-359.
- JIMÉNEZ BELTRÁN, D., 2000. Los indicadores ambientales como instrumento al servicio de la política ambiental y para el desarrollo sostenible, y de participación y control público. In: *Estadística y medio ambiente*. Inst. Estadística de Andalucía, Sevilla: 11-27.

- KING, C. A. M., 1976. Landforms and Geomorphology; concepts and history. Dowden, Hutchinson & Ross, Stroudsburg.
- KRASTEL, S., SCHMINCKE, H. U., JACOBS, C. L., RIHM, R., LE BAS, T. P., ALIBÉS, B., 2001. Submarine landslides around the Canary Islands. *J. Geophys. Res.*, 106 (B3): 3977-3997.
- LEOPOLD, L. B., CLARKE, F. E., HANSHAW, B. B., BALSLEY, J. R., 1971. A procedure for evaluating environmental impact. USGS Circular 645. USGS, Reston, Va.
- LOMOSCHITZ, A., 1999. La depresión del Barranco de Tirajana, Gran Canaria. Cabildo Insular de G. Canaria, Las Palmas.
- LÓPEZ RUIZ, J., 1969. Le complexe filonien de Fuerteventura (Iles Canaries). *Bull. Volcanol.*, 33: 1166-1185.
- LÜTTIG, G. (ed.), 1992. *Geology and the environment*, vol. 3. UNESCO-UNEP, Paris-Nairobi
- LYELL, C., 1830 (reedición 1991). *Principles of Geology*. University of Chicago Press, Chicago.
- MARCHETTI, M. & RIVAS, V. (eds.), 2001. *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*. Balkema, Lisse (NL)
- MARSCH, G. P., 1877. Destructiveness of Man; Human and Brute Action compared. Physical improvement and limits of Human Power. In: *The Earth as modified by human action (a new edition of Man and Nature)*. Scribner, Armstrong & Co., N. York.
- MCDUGALL, I., SCHMINCKE, H. U., 1976. Geochronology of Gran Canaria, Canary Islands: age of shield-building volcanism and other magmatic phases. *Bull. Volcanol.*, 40 (1): 57-77.
- MCKENZIE, G. D. & UTGARD, R. O., 1972. *Man and his physical environment*. Burgess, Minneapolis.
- MOLDAN, B. & BILLHARZ, S. (eds.), 1997. *Sustainability indicators*. Wiley, Chichester-N. York.
- MOÑINO, M., 1986. Establecimiento y cartografía de los niveles de rasas litorales existentes en Cantabria. Tesis de Licenciatura, Universidad de Cantabria.
- MOÑINO, M., DÍAZ DE TÉRAN, J. R., CENDRERO, A., 1988. Pleistocene sea level changes in the Cantabrian coast, Spain. In: S. Singh & R. C. Tiwari (eds.); *Geomorphology and environmental management*; Allahabad Geogr. Soc., Allahabad, India: 351-364.
- MORTENSEN, L. F., 1997. The driving force-state-response framework used by the CSD. In: B. Moldan and S. Billharz (eds.); *Sustainability indicators*. Wiley, Chichester-N. York: 47-53.
- MUÑOZ, M., 1969. Ring complexes of Pájara in Fuerteventura, Canary Islands. *Bull. Volcanol.*, 33: 840-861.

- MURCK, B. W., SKINNER, B. J., POTTER, S. C., 1996. Environmental geology. Wiley, N. York.
- NEPA (1970) National Environmental Policy Act. Pub. L.91-190, 42 USC, 4321-4347, January.
- NILSEN, T. H., WRIGHT, R. H., VLASIC, T. C., SPANGLE, W., 1979. Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region, California. U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 944. Washington, D.C.
- OECD, 1993. OECD core set of indicators for environmental performance reviews. OECD, Paris.
- OECD, 1994. Environmental indicators. OECD, Paris.
- PANIZZA, M., 1973. Proposta di legenda per carte della stabilità geomorfologica. Società Geologica Italiana.
- PANIZZA, M., FABBRI, A., MARCHETTI, M., PATRONO, A. (eds.), 1996. Geomorphologic analysis and evaluation in environmental impact assessment; European Commission. ITC Publ. No. 32
- PELLICER, M. J., 1977. Estudio volcanológico de la isla de El Hierro, (Islas Canarias). Estudios Geol., 33: 181-197.
- PELLICER, M. J., 1979. Estudio geoquímico del volcanismo de la isla de El Hierro, Archipiélago Canario. Estudios Geol., 35: 15-30.
- PÉREZ TORRADO, F. J., CARRACEDO, J. C., MANGAS, J., 1995. Geochronology and stratigraphy of the Roque Nublo cycle, Gran Canaria, Canary Islands. J. Geol. Soc., 152: 807-818.
- PNUMA, 2000. Perspectivas del medio ambiente mundial. PNUMA-Mundi Prensa, Madrid.
- QUINTANA, A. & LOMOSCHITZ, A., 2000. Landslides as a determining geomorphologic factor of the Barranco de Tirajana basin, Gran Canaria. Int. J. of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2: 3-8.
- REMONDO, J., 2001. Elaboración y validación de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante técnicas de análisis espacial. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo.
- REMONDO, J., GONZÁLEZ-DÍEZ, A., DÍAZ DE TERÁN, J. R., CENDRERO, A., 2002 a. Quantitative landslide susceptibility models by means of spatial data analysis techniques; a case study in the lower Deva valley, Guipúzcoa (Spain). Natural Hazards (accepted).
- REMONDO, J., GONZÁLEZ-DÍEZ, A., DÍAZ DE TERÁN, J. R., CENDRERO, A., FABBRI, A., CHUNG, C.-J. F., 2002 b. Strategies for landslide susceptibility mapa validation; some examples and applications. Natural Hazards (accepted).
- REMONDO, J., GONZÁLEZ-DÍEZ, A., SOTO, J., CENDRERO, A., 2002 c. Human impact on geomorphic processes and hazards in mountain areas. Geomorphology (submitted).

- RIVAS, V., 1991. Evolución de litoral cantábrico desde la transgresión flandriense a la actualidad y evaluación de las consecuencias ambientales de la actividad humana. Tesis Doctoral, Universidad de Murcia.
- RIVAS, V. & CENDRERO, A., 1991. Use of natural and artificial accretion in the north coast of Spain; historical trends and assessment of some environmental and economic consequences. *J. Coastal Res.* 7(2): 491-507.
- RIVAS, V. & CENDRERO, A., 1993. Transformación de espacios litorales naturales en espacios humanizados. *Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales*. Vol. I (3ª Epoca)-98: 533-552.
- RIVAS, V. & CENDRERO, A., 1995. Human influence in a low-hazard coastal area; an approach to risk assessment and proposal of mitigation strategies. *J. Coastal Res.*, Special Issue No. 12: 289-298.
- RIVAS, V., CENDRERO, A., HURTADO, M., CABRAL, M., GIMÉNEZ, J., FORTE, L., DEL RÍO, L., CAMINO, M., CANTÚ, M., BECKER, A., 2002. Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina (en preparación).
- RUSSELL, B., 1987. *Misticismo y lógica*. Edhasa, Barcelona.
- SALAS, L., 1993 a. Análisis de las variaciones climáticas holocenas en la región cantábrica a partir de estudios palinológicos; influencia de la degradación diferencial del polen en las interpretaciones paleoclimáticas. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza.
- SALAS, L., 1993 b. Correlación entre el clima y la transgresión marina holocena en el Cantábrico. *Actas 3ª Reunión do Quaternario Iberico*, Coimbra: 309-313.
- SALAS, L., REMONDO, J., MARTÍNEZ, P., 1996. Cambios del nivel del mar durante el Holoceno en el Cantábrico, a partir del estudio de la turbera de Trengandín. IV Reunión Nacional de Geomorfología; A. Grandal d'Anglade y J. Pagés Valcarlos (eds.). Sociedad Española de Geomorfología. O Castro, La Coruña.
- SÁNCHEZ DE LA TORRE, L., 1983. Problemas ambientales derivados de los recursos de carbón. II Reunión Nac. Geol. Amb. y Ord. Territorio, Lérida. Vol. Ponencias: 59-147.
- SANTACANA, N., 2001. Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos, mediante el uso de sistemas de información geográfica; aplicación a la cuenca alta del Río Llobregat. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- SCHMINCKE, H. U., 1981. Volcanic and chemical evolution of the Canary Islands. In: V. Von Rad et al. (eds.), *Evolution of the passive margin of NW Africa*. Springer, Heidelberg, pp. 273-306.
- SELBY, M. J., 1982. *Hillslope materials and processes*. Oxford Univ. Press, Oxford.
- SINGER, S. F. (ed.), 1975. *The changing global environment*. Reidel, Dordrecht (NL).

- SOTO, J., GÓMEZ, J., GONZÁLEZ, A., REMONDO, J., DÍAZ DE TERÁN, J. R., CENDRERO, A. y ALCAIDE, J., 2002. Evolución de los deslizamientos de ladera mediante su caracterización con Cs-137. *Rev. Cuaternario y Geomorfología*, 16 (1-4): 73-81.
- SOTO, J., SOTO, J. A. y DEL CORRAL, D., 2002. Evolución del aporte de sedimentos y de contaminantes a la ría de Urdaibai (en preparación).
- STANNERS, D. & BOURDEAU, P., 1995. Europe's environment, the Dobbris Assessment. European Environment Agency, Copenhagen.
- STAUDIGEL, H., FÉRAUD, G., GIANNERINI, G., 1986. The history of intrusive activity on the island of La Palma (Canary Islands). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 27: 299-322.
- STEVENSON, P. C., 1977. An empirical method for the evaluation of relative landslide risk. *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.*, 16: 69-72.
- UNEP (United Nations Environment Program), 1997. *Global Environment Outlook*. Oxford Univ. Press, N. York-Oxford.
- VALENTINI, G., 1967. Un modello statistico nello studio della franosità nel quadro morfologico, geologico e geotecnico nella media valle del F. Fortore. *Geologia Applicata e Geomorfologia*, II, Bari.
- VAN WESTEN, C. J., 1993. Application of geographical information systems to landslide hazard zonation. ITC Publ. No. 15, Enschede (NL).
- WARRICK, R. A., BARROW, E. M., WIGLEY, M. L. (eds.), 1993. *Climate and sea level change; observations, projections and implications*. Cambridge University Press, Cambridge.
- WEISCHELGARTNER, J., 2001. Disaster mitigation; the concept of vulnerability revisited. *Disaster Prevention and Management*, 2: 85-94.
- WEISCHELGARTNER, J., BERTENS, J., 2000. Natural disasters: acts of God, Nature or Society? On the social relation to natural hazards. In: Andretta, M. A. (ed.) *Risk analysis II*. WIT Press, Southampton, S. 3-12.
- WU, T. H., TANG, W. H., EINSTEIN, H. H., 1996. Landslide hazard and risk assessment. In: A. K. Turker & R. L. Schuster (eds.) *Landslide investigation and mitigation. Special Report 247*, Transportation Research Board, NRC, Washington, D.C.: 106-117.
- ZÉZERE, M. L., 1997. *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na região o norte de Lisboa*. Tesis Doctoral, Universidade de Lisboa.

**DISCURSO DE CONTESTACIÓN
DEL
EXCMO. SR. D. ADRIANO GARCÍA-LOYGORRI RUIZ**

Excelentísimo Señor Presidente

Excelentísimos Señores Académicos

Señoras y Señores

La gentileza que la Academia ha tenido conmigo al darme la oportunidad de participar en este solemne acto, encargándome la contestación al discurso de quien a partir de hoy será ya compañero nuestro de Corporación, es causa más que suficiente para que comience mi intervención mostrando mi gratitud a quienes para esta misión me designaron. Y ello, no solamente por la distinción que para quien les habla representa su presencia en esta tribuna y con este motivo, sino también por el agrado que supone recibir en nombre de esta Casa a la relevante personalidad científica del Profesor Cendrero y de responder a su muy actual e interesante discurso.

Señores Académicos, señoras y señores, permítanme ustedes que antes de exponer algunas consideraciones que me han traído a la mente las palabras que acabamos de escuchar, dedique unos minutos a destacar algunos de los hechos que han jalonado la vida profesional del nuevo Académico, porque, sin duda, sería vano por mi parte insistir, por innecesario, en un más prolijo encomio de las cualidades científicas de una persona y de una ejecutoria, por bien conocidas y valoradas que ya son de todos ustedes.

Madrileño de origen y nacido en 1941, la que luego sería una brillante carrera profesional tuvo como sobresaliente arranque la obtención de sendos Premios Extraordinarios, con ocasión de su licenciatura y doctorado en Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de su ciudad natal, en 1965 y 1970, respectivamente.

Su formación como investigador se centró inicialmente en la geología, la petrología y dentro de esta última, en los procesos volcánicos de las Islas Canarias, al igual que lo hiciera toda su vida su profesor, maestro y amigo, Don José María Fúster, querido miembro que fue de esta Real Academia, y al que precisamente ahora sucede, ocupando el sillón que tristemente dejó vacío hace poco tiempo.

Tras su actividad docente e investigadora desarrollada en la Universidad Complutense, en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas y en el Dartmouth College de los Estados Unidos durante los años que dedicó para la obtención del título de Doctor, así como en la Universidad de Sulaimaniyah en Irak como joven doctor ya, enseguida partió para Santander, desde cuya Universidad ha venido desplegando lo más principal de su actividad científica.

Aunque hasta comienzos de los años 90, el ejercicio de la investigación estuvo dirigido principalmente al estudio de los procesos endógenos, desde los primeros años de la década de los 70, particularmente tras su permanencia en la Universidad de Texas como Fullbright Fellow con los profesores Flawn y Fisher, fue interesándose gradualmente por las cuestiones medioambientales y su relación con las interacciones entre las actividades humanas, los procesos terrestres superficiales y los riesgos naturales, especialmente los geomorfológicos y los litorales, como un importante punto de partida para una evaluación, planificación y gestión ambiental integradas.

Esta labor sobre geología ambiental le llevó a impulsar el desarrollo de esta disciplina en Europa en colaboración con las figuras más significadas del momento, como los Doctores Lüttig, de Alemania, Wolff, de Noruega, o De Mulder, de Holanda. Fruto de esa actividad fue la creación en 1990 de la Comisión sobre Geología y Planificación Ambiental, de la International Union of Geological Sciences (COGEOENVIRONMENT), de la que fue su primer Vicepresidente, así como su contribución al nacimiento en el ámbito internacional de otros relevantes organismos, entre los que cabe destacar el Centro Europeo sobre los Riesgos Geomorfológicos, del Consejo de Europa (CERG, 1989), el Centro Internacional de Estudios Políticos y Jurídicos sobre el Ambiente (CISPEGA, 1990), o el Centro de Actividades de Investigación Multidisciplinar y de Estudios sobre el Litoral (EURO-COAST, 1992). Merece también destacarse su nombramiento, en 1996, como miembro del Comité Directivo del Sistema Global de Observación Terrestre, programa de ámbito mundial auspiciado por varios organismos de Naciones Unidas. Otras importantes participaciones en el ámbito internacional se han extendido al desarrollo y evaluación de proyectos auspiciados por varios programas europeos, incluyendo una decena de contratos para proyectos de investigación de distintos programas comunitarios, a asesorías de instituciones extranjeras, como la prestada al Instituto Geológico de Polonia, y, por último, a las intensas relaciones que viene manteniendo con diversos países de Iberoamérica, muy particularmente en Argentina, país en el que actualmente pasa buena parte de su tiempo y cuya Universidad Nacional de La Plata acaba de nombrarle Profesor Honorario. Señalemos finalmente su reciente nombramiento como miembro del Comité Científico de Medio Ambiente, por parte del ministerio correspondiente en España.

Resultado de toda esa actividad científica, lo constituyen las más de 200 publicaciones, muchas en colaboración con el Profesor Fúster, dedicadas a la geocronología de las Islas Canarias, y las relativas al diseño y aplicación de nuevos procedimientos de cartografía geoambiental y su aplicación al establecimiento de esquemas de ordenación territorial, de las que algunas de ellas lo fueron en cooperación con el Profesor Ramos, otro y también muy querido miembro de esta Real Academia, que desgraciadamente tampoco se encuentra ya entre nosotros y al que también quiero dedicar desde aquí un recuerdo muy sentido.

No debo dejar de subrayar la puesta en práctica de relevantes aplicaciones, que fueron pioneras, de los sistemas de información geográfica, aún no empleados en la segunda mitad de los 70, o de las referentes al análisis de la influencia humana en la evolución de determinadas zonas costeras y en los riesgos naturales consiguientes, las dedicadas al desarrollo temporal de los deslizamientos de ladera y su relación con los cambios climáticos o con la actividad humana, o las relativas al desarrollo de procedimientos automáticos de evaluación ambiental o de riesgos de deslizamientos.

Creo que con lo hasta aquí expuesto queda plenamente justificado el por qué de la interesante exposición que nos ha hecho el Profesor Cendrero acerca de la comprensión de la historia geológica de la Tierra, y del análisis y predicción de determinadas interacciones entre los seres humanos y el medio natural, como reza el título de su discurso de ingreso.

* * *

En torno y relación con su contenido, tal como les anunciaba al inicio de esta intervención, me voy a atrever ahora a hacerles partícipes de algunos comentarios y reflexiones que aquéllos han suscitado en mí en el día de hoy.

Es la primera, la que se refiere al protagonismo y permanente servicio que las ciencias geológicas han prestado desde siempre para el progreso de los pueblos y, en particular, al que ofrecen en el día de hoy para el mantenimiento de un mundo habitable para las generaciones del futuro, apoyando la lucha contra la degradación del medio ambiente.

Sabido es que desde un principio y a lo largo de muchos siglos, la razón de ser de la geología y su progreso estuvieron estrechamente ligados a la exploración de los recursos minerales y a la minería, a la que siempre mucho auxilió y de la que también mucho se sirvió. En un comienzo fueron los minerales metálicos los que atrajeron la atención de exploradores y naturalistas, como queda puesto de manifiesto, tanto por los descubrimientos y las explotaciones de las mate-

rias primas minerales que había que saber encontrar y que desde la más remota antigüedad desarrollaron griegos, fenicios y romanos, como por diversos testimonios escritos, ya más próximos a nosotros, de los que podemos recordar algunos muy afamados, como fueron, por ejemplo, las obras de Georgius Agrícola en el siglo XVI y de A. G. Werner en el XVIII, estudiosos, ambos, de los filones metalíferos de Sajonia, que del arte de la minería fueron poco a poco haciendo nacer una verdadera ciencia geológica.

Fue precisamente en el último tercio del siglo de la Ilustración, con el nacimiento de la revolución industrial, cuando comenzó a abrirse una nueva era para la geología, como se puede deducir también del creciente número de geólogos dedicados al estudio de la Tierra que fue surgiendo, así como del acelerado florecimiento que empezó a producirse en los estudios y teorías a lo largo del siglo XIX. Ello se debió en buena medida a la apertura de nuevas vías de comunicación y al impulso que tuvieron las obras públicas y la minería a finales de siglo, las cuales, junto con la mejora de los medios de transporte, permitieron explorar grandes territorios, ensanchando así el horizonte tan restringido de observación de que disponían los primeros geólogos, haciendo posible extender las exploraciones geológicas más allá de los límites de las cercanías de los lugares de trabajo, a las que hasta entonces se hallaban constreñidas.

En el progreso de la geología a lo largo del tiempo, tuvo un relevante protagonismo el beneficio del carbón de piedra, como pilar del desarrollo industrial que se fue generalizando a partir del último tercio del siglo XVIII, el cual, junto con el de otros recursos minerales, multiplicó la necesidad de la ayuda geológica para la localización de yacimientos, al tiempo que abrió el acceso de los geólogos de la época a muchas labores subterráneas, ampliando así la posibilidad de obtener nuevas y más frescas observaciones que ofrecían una inapreciable continuidad para la información del investigador. No resulta por tanto aventurado afirmar que la explotación de los yacimientos de carbón constituyó desde aquellos tiempos uno de los mayores soportes de que disfrutó el avance de la geología, en general, y de la estratigrafía, en particular, a la vez que una favorable consecuencia de los resultados que progresivamente ésta última fue proporcionando.

Pero como aplicación necesaria de un conocimiento geológico cada vez más preciso, a la minería se unió poco después el quehacer de las obras públicas. Y poco después, la búsqueda de las aguas para la vida, y la agricultura, y las artes, y la industria.

De ahí que hace ya más de 150 años, bajo el reinado de Isabel II se decidiera crear la que entonces se denominó “Comisión para la Carta Geológica de Madrid y General del Reino”, origen del actual Instituto Geológico y Minero de España.

Porque precisamente ese organismo se constituyó para el progreso de la geología aplicada a aspectos que hasta nuestros días han venido constituyendo importantes cimientos de nuestro desarrollo. De ello da buena muestra el Real Decreto de constitución de 12 de julio de 1849, cuyo texto bien puede considerarse ejemplar para muchos de los que se publican hoy en día en el Boletín Oficial, porque mostró una clara visión de las posibilidades que las ciencias geológicas abrían para dar respuesta a buena parte de las necesidades humanas, por su aplicación a la búsqueda de criaderos minerales útiles y materiales de construcción para su empleo en las industrias y las artes, a la caracterización de los suelos para las obras públicas y para la agricultura y también a la búsqueda y aprovechamiento de las aguas subterráneas. Como compendio de los nuevos horizontes abiertos para la geología, cabe recordar unas breves líneas de la exposición de motivos del mencionado Real Decreto, que no me resisto a transcribir ahora:

“Dedicadas principalmente las ciencias naturales al conocimiento del Globo que habitamos y de los diferentes objetos que encierra, no poseerá el hombre todos los elementos de su bienestar, mientras no lleve ese conocimiento al mayor grado de perfección posible, sobre todo en aquella parte del suelo en que Dios le ha hecho nacer y ha circunscrito su existencia”.

Pero no hace aún muchos años, en el último tercio del siglo XX es cuando se da un nuevo y gran paso adelante al producirse una llamada a la contribución de la geología para dar cobertura a una también nueva exigencia del hombre, como es la concerniente a la ordenación territorial y a la preservación del medio ambiente.

De ello dan fe los estudios y publicaciones que, relacionadas con este tema, eran ya frecuentes en la pasada década de los setenta. También cabe recordar cómo en la nueva estructura que se dió en 1979 al Instituto Geológico y Minero de España se introdujo entre los sectores propios de su actividad, la Geología Aplicada a la Ordenación del Medio Natural, con una mención específica a la Geología Territorial y Ambiental. Y, cómo no, la celebración en 1980 en Santander, de la I Reunión Nacional de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio, a la que nuestro nuevo Académico presentó una señalada contribución, aportando las bases doctrinales y metodológicas de la Geología Ambiental. De entonces acá, cada vez viene siendo mayor la contribución de la ciencia geológica al Medio Ambiente y buena prueba de ello la tenemos muy cerca con la presencia del Profesor Cendrero, tan interesado en estas cuestiones desde hace casi treinta años.

* * *

A las actividades que se relacionan directamente con la explotación y consumo creciente de recursos naturales, –energía, materias primas, agua y suelo–,

en que se apoya el desarrollo, se añaden los serios efectos que se están derivando de la producción de residuos y de la contaminación, originando todos ellos unas importantes alteraciones en el medio físico, que resulta preciso prevenir o corregir para no atentar contra la salud y el bienestar de la generación actual y no hipotecar el futuro de las que nos habrán de suceder.

Al término “ecología” de Haeckel, –que contempla las interacciones entre el medio natural y la vida–, Margat añadió a comienzos de los años setenta del pasado siglo, el de “ecogeología”, como el estudio de las interacciones entre las actividades humanas y el medio geológico, porque la actividad humana origina importantes impactos en el entorno en que se mueve, alterando su evolución geológica natural, y dando con ello lugar a nuevas situaciones que, de no prevenirse, pueden acabar resultando, en mayor o menor medida, desfavorables para la comunidad: hundimientos debidos a las obras subterráneas; inestabilidades de laderas y taludes ocasionados por vertederos, desmontes y grandes movimientos de tierra; modificaciones de los procesos erosivos naturales ocasionadas por las variaciones introducidas en los cursos de agua o en la configuración del paisaje, por las desforestaciones, por las explotaciones agrícolas, por los incendios de grandes extensiones de bosques, así como por su progresiva desaparición, y por las contaminaciones y alteraciones climáticas, etc.

Estos riesgos se acentúan y concentran cada día más debido al gradual crecimiento que desde hace ya tiempo muestran las aglomeraciones humanas por las migraciones que se están registrando hacia las ciudades y cuyo incremento se está revelando como imparable en todo el mundo. En efecto, según informaciones de Naciones Unidas y del Banco Mundial, la tasa de crecimiento de la población urbana se viene situando en el entorno de cuatro veces más de como lo hace la total mundial. Así, mientras que hace unos treinta años, apenas poco más de una tercera parte de los ciudadanos del mundo vivían en las ciudades, se estima que para el año 2025 el número de habitantes en ciudades duplicará al del pasado 1990, alcanzando en ese momento los 5.000 millones, lo que representará casi dos tercios de la población mundial de entonces, siendo prácticamente equivalente a la total que existe en el mundo en nuestros tiempos.

Otro hecho relevante es el crecimiento del tamaño de las ciudades. En 1950 sólo dos de ellas, Londres y Nueva York, superaban los 8 millones de habitantes. En 1995 su número había ascendido a 23, y para el próximo 2015 se prevé que haya 36 de estas megalópolis, la mayor parte de las cuales estarán concentradas en el continente asiático.

Es conocido el hecho de que las ciudades han constituido el motor del crecimiento económico de los países, siendo su producto interior bruto claramente

superior al medio de los Estados de los que forman parte. Las oportunidades económicas, junto con los mayores niveles de educación y cultura que con ello se brindan, hacen que por lo general las ciudades ofrezcan una mejor calidad de vida, —aunque no bien entendida o incluso frustrante a veces—, constituyendo un importante atractivo para la llegada de poblaciones procedentes de las áreas rurales. En los países más desarrollados de un mundo cada vez más interdependiente y globalizado, como son los de la Unión Europea, a este crecimiento urbano se está sumando con toda rapidez la inmigración que llega desde otras regiones del planeta con economías menos desarrolladas.

Las consecuencias que todo ello trae consigo se están poniendo rápidamente de manifiesto. A los mayores niveles de vida de las áreas urbanas, se suma una permanente exigencia de progreso en el bienestar social, que se extiende desde el ocio y la cultura, hasta el trabajo y la disponibilidad de unos servicios básicos de calidad. Pero al tiempo que todo ello refleja el afán de gozar de un ambiente cada vez más rico y saludable, las ciudades se configuran como los mayores focos de consumo de recursos, constituyendo la principal fuerza motriz de degradación del medio.

Efecto adverso, este último, que trae consigo una pérdida de la calidad de vida ciudadana, precisamente contraria a los valores reclamados por sus propios habitantes, que al propio tiempo son los responsables de esa degeneración. Y este hecho se da con notable mayor intensidad en las ciudades más ricas y desarrolladas, en las que al mayor gasto de recursos se añade una creciente producción de residuos que hay que eliminar.

Por configurar las ciudades sistemas abiertos, su impacto ambiental negativo es muy destacado, extendiéndose bastante más allá de sus propios límites geográficos, contribuyendo seriamente con ello al surgimiento y propagación de conflictos medioambientales a nivel global. Con el fin de aproximarse a una evaluación del impacto total generado en sus entornos por las ciudades, no hace mucho tiempo que se ha comenzado a valorar la importancia de la llamada “huella ecológica”, como indicador que permite apreciar la extensión del territorio, —donde sea que éste se encuentre—, necesario para producir los recursos con que satisfacer los consumos asociados a la alimentación y productos forestales, el gasto energético y la ocupación de terreno, incluyendo la superficie necesaria para la asimilación de los residuos producidos por la población.

Un reciente ensayo de valoración de la huella ecológica de la ciudad de Madrid, efectuado por su Ayuntamiento siguiendo la metodología expuesta en 1996 por Rees y Wackernagel, complementada con los criterios utilizados en el año 2000 por Chambers, Simmons y por el propio Wackernagel, ha dado como resultado una huella para la capital de España, de algo más de 3,7 ha. por habi-

tante, lo que lleva a una extensión total afectada de unos 108.000 km². Estudios similares realizados en distintos momentos para otros municipios, arrojan cifras de 3-3,5 ha. por habitante en el caso de Barcelona, de 3,5 ha. en el de Munich, o de 2,8 ha. para Londres. Aunque estos datos puedan no resultar estrictamente comparables entre sí, dadas las diferencias habidas en los cálculos seguidos en cada ocasión, lo cierto es que en todos los casos sus huellas ecológicas superan de largo en cien veces sus superficies respectivas.

Se puede argüir, y no sin razón, que estas cifras dan una sobreestimación de la huella por persona, porque los valores calculados para el consumo de bienes y la producción de residuos habrían de repartirse no solamente entre los ciudadanos censados, sino que a éstos debería añadirse el importante flujo de población flotante que diariamente acude a la ciudad. Ello, no obstante, pone de manifiesto de forma palpable la extraordinaria incidencia que las ciudades ejercen sobre amplias regiones, tanto más cuanto mayor es la densidad de su población y más alto su nivel económico y de desarrollo.

La tipología de las superficies productivas que se viene utilizando en las estimaciones de la huella ecológica se corresponde con zonas de pastos y cultivos, mar, bosques, terrenos urbanizados u ocupados por infraestructuras, incluidas las zonas de explotación de áridos y, por supuesto, las áreas de absorción de CO₂ asociadas al consumo energético directo, a la energía necesaria para la manufactura e importación de bienes, así como a las emisiones a la atmósfera de los gases procedentes del tratamiento de los residuos. De todos ellos, el factor que más incidencia muestra es la superficie necesaria para la absorción de CO₂ ya que, en Madrid, llega a representar cerca del 50% de la huella ecológica, lo que pone en evidencia, como no podía ser de otra manera, la especial incidencia que tiene la actividad humana en la producción de gases de efecto invernadero.

Pero paralelamente al cálculo de la huella, es preciso tomar en consideración también la extensión de las áreas disponibles para la producción de recursos, la ubicación de infraestructuras, la evacuación de residuos y los sumideros de CO₂, con que atender las demandas de la población dentro del territorio considerado, es decir, lo que se conoce como “capacidad de carga”; extensión que nuestra huella ecológica teóricamente no debería superar, si se admite que la Tierra constituye un sistema cerrado.

Se estima que la superficie productiva mundial se sitúa hoy en día, en torno a 1,75 ha. por habitante; medida que expresa la superficie de que podría disponer cada ser humano, si se repartieran equitativamente los recursos. Obvio resulta señalar que esa cifra irá haciéndose menor en la misma medida en que vaya creciendo la población del mundo.

Pese a que en los últimos tiempos la concienciación sobre estos extremos y una actitud más favorable se están extendiendo por distintos ámbitos de los países más avanzados, la situación actual no parece todavía halagüeña, porque un reciente estudio publicado por la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, pone de manifiesto cómo a partir de la década de los setenta en la que la demanda alcanzaba a la capacidad mundial de recuperación de los ecosistemas, en la siguiente ya la sobrepasaba, rebasándola en un 20% a finales del siglo pasado, y con perspectivas de tendencia creciente para el futuro. Como es cada vez más reconocido, evitar el derroche en el consumo de un bien tan necesario para la vida, pero tan escaso en muchas regiones del mundo, como es el agua; procurar el ahorro de energía y la consecución de mayores cotas en el empleo de fuentes renovables; alargar los ciclos de vida de otros recursos naturales, haciendo disminuir los patrones de producción y uso; reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, así como de contaminantes a la atmósfera; proteger las condiciones que favorezcan la biodiversidad, son caminos, todos ellos, que abrirán las posibilidades para quebrar esa tendencia de crecimiento de la huella. Pero para ello resulta precisa una modificación de políticas, tanto nacionales como las que sean fruto de acuerdos específicos a nivel supranacional, hoy por hoy aún difíciles de concretar, y esto teniendo a la vista, —como principal cuestión de fondo—, la necesidad de erradicar la extrema pobreza presente en muchos territorios de la Tierra.

Para poder comparar los esfuerzos a desarrollar en cada ocasión, creemos que el valor más fiable es, en todo caso, el de la huella por habitante, porque, por una parte, la huella total de una ciudad depende del número de sus habitantes, y por otra, el número de veces que representa en relación con la superficie del municipio, está íntimamente relacionado con esta última. Cuando un municipio es muy extenso, su propia capacidad de carga es mayor, y, por consiguiente, menor el número de veces que su huella supera a su extensión, lo que podría encubrir la importancia de los impactos individuales ocasionados por sus moradores, que son sobre los que hay que actuar. En cualquier caso, a efectos de la valoración del impacto total de una aglomeración urbana sobre la región en la que se asienta, el parámetro a tener más presente es el de la huella total.

Este indicador de la huella ecológica, aun con las limitaciones de que aún adolece en el día de hoy, está adquiriendo un creciente interés, pues da noticia de manera gráfica y fácilmente comprensible para todos, de las repercusiones ambientales de las grandes aglomeraciones urbanas, al tiempo que sirve como mecanismo de aviso para la seguridad a largo plazo de sus ciudadanos y, en consecuencia, para la aceptación por su parte de políticas de desarrollo sostenible,

que promuevan un paulatino cambio de hábitos de las personas, cuyo protagonismo tanto tiene de imperativa necesidad.

En la era industrial, el concepto dominante del bienestar radicaba en el nivel de renta, pero actualmente, y lo será cada vez más a medida que avance el siglo XXI, son unas condiciones ambientales favorables que garanticen la preservación del medio natural, lo que se va considerando como reflejo de la calidad de vida de las gentes. De ahí, la que ya está siendo generalizada utilización de la voz “desarrollo sostenible”, como imagen de un desarrollo armónico y equilibrado entre lo económico y lo social, dentro del debido respeto a lo medioambiental, tan distinto del “insostenible”, practicado durante la mayor parte de la pasada centuria en muchas de las regiones más desarrolladas.

Este concepto, que no excluye en modo alguno ir alcanzando cada vez mayores niveles de calidad de vida, exige gran cuidado en el aprovechamiento de todo tipo de recursos naturales, tanto de los que no sean renovables, como de los que sí lo son, para los que su explotación debiera ceñirse a las tasas de renovación con las que ésta se produce.

Pero para progresar en la puesta en práctica de lo que debe ser, no opcional sino imperativo, desarrollo sostenible, no basta la aplicación de medidas estrictamente medioambientales, sino que los criterios y fundamentos de ese desarrollo deben impregnar todas las políticas económicas y sociales de las Administraciones Públicas, así como las actitudes de los agentes económicos y, de modo primordial, las de la población, modificando hábitos y costumbres, cuando ello resulte preciso.

Por esa dirección camina precisamente el Programa de la Agenda 21, como Plan de Acción de Naciones Unidas, nacido en Río de Janeiro en 1992, que determina los cambios y las acciones a emprender por los gobiernos con el objetivo del desarrollo sostenible en el siglo que está comenzando.

El papel que han de desempeñar las autoridades locales en este proceso se reconoce en la Agenda 21, haciendo un llamamiento a las ciudades para que desarrollen su propia Agenda 21 Local. En respuesta a este mandato, en 1994 la Conferencia de Ciudades y Poblaciones Sostenibles, celebrada en Aalborg (Dinamarca) bajo el patrocinio de la Comisión Europea, definió en la conocida como Carta de Aalborg la filosofía básica del proceso a aplicar por las ciudades y pueblos de Europa y las líneas maestras para la elaboración de planes locales de acción a favor de la sostenibilidad. De esta conferencia surgió la Campaña de Ciudades y Poblaciones Sostenibles, a la que, a mediados del año 2002, se habían adherido ya cer-

ca de 1.650 autoridades locales procedentes de 38 países, de las que casi 600 correspondían a España.

* * *

Dentro de este contexto general, el Profesor Cendrero nos ha alertado de las serias consecuencias que puede traer la actividad del hombre sobre uno de los principales patrimonios con que cuenta, como es el suelo en que vive y de que se sirve, al haber pasado a ser, según su opinión, uno de los principales agentes responsables de la marcha del ciclo geodinámico externo, con una influencia en el modelado del relieve de dentro de determinadas áreas, de alcance y rapidez en ocasiones mayores que los que caracterizan a los procesos evolutivos naturales.

En función de sus orígenes, dos grandes grupos de modificaciones de la forma del relieve se contemplan en el análisis de nuestro nuevo compañero: por una parte, las ocasionadas por las erupciones volcánicas y los grandes colapsos de los edificios rocosos formados por los materiales expulsados del interior de la Tierra, y, por otra, las originadas directa o indirectamente por la mano del hombre.

En ambos casos la geología puede prestar una significativa contribución. En el primero, en el que la actuación humana ha de limitarse a la adopción de medidas cautelares sobre la planificación territorial, el mejor conocimiento del modo como tienen lugar los procesos geológicos, puede contribuir decididamente a la consecución de estos fines. Ejemplos sobresalientes son los que nos está aportando Cendrero, así como los que en su día nos fue dando Fúster sobre la historia volcánica de las Islas Canarias.

Sin embargo, en el segundo caso considerado la investigación geológica puede procurar una aún más valiosa ayuda para evaluar, antes de que se produzcan, los impactos negativos que la actividad humana llegue a ocasionar y, de este modo, impedir, o al menos prevenir y luego corregir, los efectos indeseables que aquéllos traigan consigo.

También en dos categorías se pueden agrupar las modificaciones ocasionadas por el hombre en la superficie terrestre, particularmente en las cercanías de las ciudades: las creadoras de nuevos relieves y las que destruyen los existentes. De las primeras cabe recordar principalmente las que se deben a la construcción de enormes vertederos donde acumular las formidables cantidades de residuos sólidos que las grandes aglomeraciones urbanas generan, mientras que las segundas tienen su origen en el imperativo de procurar el suministro de materias primas o de construir nuevos asentamientos y vías de comunicación, cada vez de mayor envergadura.

Para el tratamiento de los vertederos, afortunadamente se están imponiendo en Europa las normas que obligan a la realización de profundos análisis geológicos, hidrogeológicos y geotécnicos previos a su construcción, contemplando, de un lado, el impacto ambiental que pueda originar su implantación, su explotación y la pervivencia del depósito durante varios decenios, y, de otro, estableciendo las medidas preventivas y correctoras necesarias para impedir movimientos de taludes, no degradar la zona, evitar el escape a la atmósfera de metano, así como para eludir la contaminación de suelo y agua.

Para la prevención de las secuelas negativas ocasionadas por los movimientos de laderas, suplantación o modificación de cursos fluviales y demás accidentes morfológicos naturales causados por la mano humana en el desarrollo urbano, está también previsto el mecanismo administrativo del estudio y posterior declaración de impacto ambiental, que puede denegar las autorizaciones pertinentes o, en caso de aprobación, imponer las medidas defensivas o correctoras necesarias a fin de impedir potenciales consecuencias indeseables que más tarde lleguen a ser irreversibles. Pero especialmente en este último caso, se precisa progresar decididamente en cuanto al rigor exigible a los estudios de impacto, incorporando necesariamente las investigaciones geológicas previas vertidas en documentos y en mapas de vulnerabilidad, que ayuden a seleccionar acertadamente los lugares más adecuados como soporte físico de las grandes infraestructuras urbanas, para así rebajar el grado de inseguridad de las predicciones de lo que podría llegar a ocurrir.

Como punto de partida de tales investigaciones, el Profesor Cendrero recurre a la aplicación de la teoría uniformista de Lyell. Sin duda, se dan fenómenos del pasado que pueden explicarse a partir de los que actualmente nos es dado observar, como ocurre con determinados procesos de erosión, transporte y sedimentación, para los que en general el principio del Uniformismo ofrece pocas dudas, aunque no se debe olvidar que existen determinadas restricciones que hay que tener muy en cuenta a la hora de su aplicación a casos concretos, porque no sería nada extraño que los factores desencadenantes de los citados procesos no se hayan producido simultáneamente en todos los casos, que no hayan actuado con la misma intensidad o que cuando tuvieron lugar no lo hicieran bajo condiciones ambientales del medio semejantes a las actuales.

Estas se refieren principalmente a mutaciones producidas por causas o bajo condiciones ambientales diferentes de las actuales, como fueron las que tuvieron lugar cuando la composición de la atmósfera era distinta a la de la que ahora nos rodea, sin que pueda asegurarse tampoco que la química de los océanos haya mantenido siempre sus mismas características. En cualquier caso, debemos suponer que tales restricciones en cierto modo irán en disminución a medida que se vaya perfeccionando el conocimiento de los procesos de la dinámica externa, a

partir de nuevas observaciones, reconocimientos y estudios de casos concretos, junto con la aplicación de los progresos científicos y de las tecnologías de investigación cada vez más precisas y efectivas.

Resulta ocioso indicar que en el dominio de la dinámica interna causante, por ejemplo, de los fenómenos volcánicos, no existe, por el contrario, experiencia suficientemente precisa sobre el desarrollo de fenómenos actuales, que nos pueda guiar correctamente para interpretar los pasados de modo detallado, por ser mucho menos continuados y graduales que los de la dinámica externa y por intervenir factores que son inaccesibles a la observación humana.

Con ocasión de su ingreso en esta Academia, quien fuera mi profesor de Geología en la Escuela de Minas, don José María Ríos, señalaba en 1966 que la argumentación geológica en la interpretación de lo observado sigue normalmente un razonamiento inductivo, que se remonta del hecho a la causa, por cuanto que partiendo de datos singulares, infiere las causas que los han originado, efectuando sondeos intelectuales que, basados en la experiencia, arrancan del nivel de lo tangible para llegar al de lo inteligible.

Pero a este modo de pensamiento geológico se pueden añadir otros dos: el razonamiento analógico o comparativo, y el deductivo. En relación con el primero, se puede decir que el geólogo, en la práctica de su vocación, compara constantemente situaciones próximas y remotas. Las primeras, para poder apreciar la evolución de las circunstancias; las segundas, para apoyar en el precedente de cuestiones ya resueltas, posibles conclusiones obtenidas por semejanzas, para llegar a soluciones válidas aplicables al problema con el que se enfrenta. Pero en estas comparaciones resulta necesario actuar con extraordinaria prudencia, porque en geología es rara la ocasión en que dos cuestiones que se creen parecidas, en realidad lo son, y tienen por tanto conclusiones idénticas.

En la búsqueda de soluciones para llegar al “hacer” partiendo del “saber”, que es la función de la Ingeniería Geológica, determinados aspectos, como pueden ser los que se relacionan con los estudios de detalle para la prevención de riesgos naturales, precisan que el razonamiento inductivo dé paso al que se basa en la deducción, que es el que siguiendo un camino contrario al anterior, lleva de la causa al hecho. Combinado con el analógico, la predicción de lo que va a ocurrir se fundamenta en principios, generalizaciones y procesos ya conocidos, extrayendo de ellos, aunque sea con un cierto componente de incertidumbre, las consecuencias de lo que puede pasar. Se entra así en la llamada por Luttig “Geología Prospectiva”, que trasplanta los conocimientos de la evolución geológica del pasado a la previsión de la que en el futuro se ha de desarrollar, comparando efectos originados conocidos, con aquéllos a los que la nueva actividad pueda dar lugar.

Pero si existen limitaciones en la aplicación del Uniformismo para averiguar cómo se debieron desarrollar en el pasado determinados procesos, las hay también para predecir a qué situación se llegará en los cambios morfológicos ocasionados hoy, sea por una evolución natural, sea por causa de la actividad humana. Y ello, por las alteraciones que ya está ocasionando esta última en el medio físico, debidas principalmente a las emisiones de gases de efecto invernadero o a la formación del agujero de ozono, aunque parece que este último está ahora reduciendo sus dimensiones. A las primeras, con su secuela de modificaciones del clima y sus consecuencias metereológicas, aún no precisadas suficientemente en lo referente a sus impactos regionales o locales, pero a las que podrían atribuirse los fuertes temporales y precipitaciones causantes de las catastróficas inundaciones acaecidas en los últimos tiempos en algunas regiones del mundo, la disminución del espesor de las masas de hielo del Ártico y la retirada de glaciares en zonas no polares, la intensificación de la sequía en determinados territorios y la expansión de zonas desérticas, entre otros.

En lo que se refiere al análisis de las transformaciones de las formas de relieve ocasionadas por agentes externos, para paliar los inconvenientes apuntados el Profesor Cendrero manifiesta la conveniencia de recurrir al estudio de cambios acaecidos durante cortos períodos de tiempo y en épocas, que por poder ser mejor conocidas, sean lo más próximas posible a la época actual.

Afortunadamente no van siendo ya pocos los casos ocurridos que cumplen estos requisitos. Cendrero aporta ejemplos bien estudiados como los que han tenido lugar recientemente, tanto en el interior como en el litoral cantábrico, en los que se ve la labor de la naturaleza y la mano del hombre. Otras áreas de nuestro litoral cabría también traer a colación para interpretar procesos geológicos recientes bien conocidos que han tenido trascendencia para la ordenación del territorio en nuestro país. Tal es el caso de la evolución geodinámica natural que a lo largo de tres milenios ha tenido lugar en las desembocaduras de los ríos Guadalete y Guadalquivir, cuyos estuarios se han venido rellenando durante ese periodo de tiempo, que es corto cuando se mide con el reloj geológico. Para ello, felizmente se ha podido contar con la valiosísima información proporcionada por los testimonios históricos de la época de las dominaciones griega y fenicia que recogió en el siglo IV de nuestra Era, el geógrafo y poeta latino Rufo Festo Avieno en su poema "Ora Maritima", sobre la configuración que mostraba hace tres mil años la costa mediterránea de la Península Ibérica y, en particular, por su detalle, el litoral de la provincia de Cádiz.

Fue a partir de ese documento como quien también fuera miembro de número de esta Casa, don Juan Gavala, contrastó y completó una investigación geológica muy interesante que había comenzado en los años veinte del pasado siglo, sobre la evolución y relleno de la bahía de Cádiz y de los estuarios de ambos ríos.

Pero para ello, primero hubo de revisar la versión latina disponible en aquel momento, corrigiendo los errores advertidos, y logrando así otro texto más ajustado al que debió ser el primitivo, para traducirlo después e interpretarlo desde una perspectiva geográfica a la par que geológica. De esta manera, partiendo de los datos de Avieno, pudo refrendar su tesis acerca de la transformación de la costa gaditana hasta llegar a su estado actual, dando explicación a la formación y a la posterior desecación, –todavía en curso hoy en día–, de las amplias zonas marismas presentes en las dos márgenes del Guadalquivir, –nacidas a partir de un ancestral Lacus Ligustinus que ocupaba el centro de su estuario y llegaba hasta las proximidades de la ciudad de Sevilla–, y en la margen izquierda del Guadalete, separadas las primeras de esta última, por la tierra firme de la isla Cartare, representada principalmente hoy por la campiña jerezana. También dio explicación a la evolución de la bahía, con la desaparición del carácter insular de las ciudades de Cádiz y San Fernando, y a la transformación sufrida por diversos cauces, antiguos brazos de mar, –algunos de los cuales todavía pueden considerarse como tales–, y a muchas interesantes cuestiones más.

El conocimiento de todo este proceso nos permite deducir ahora cuál podrá ser el futuro comportamiento morfológico de este rincón andaluz. Dedución que, además deberá tomar muy en consideración los impactos sobre su litoral de la creciente presencia humana y del desarrollo industrial y agrícola que viene produciéndose en la actualidad. Salvaguarda de una parte importante de la zona, ha de ser el debido respeto en la conservación del Parque Nacional de Doñana, en lo que concierne a la margen derecha de la desembocadura del Guadalquivir, así como la preservación del recientemente declarado Parque Natural Bahía de Cádiz, que se extiende sobre el llano marismas ubicado en la margen izquierda del tramo más inferior del río Guadalete.

* * *

Y concluyo. He pensado que podría ser oportuno aportar en esta ocasión algunos apuntes sobre todas estas cuestiones, sin más afán que servir como marco de acompañamiento a la disertación con que nos ha regalado el Profesor Cendrero en su discurso de ingreso en esta Casa, en nombre de la cual, al tiempo que nos felicitamos por su incorporación y, con ella, por su valiosa contribución científica a la geología medioambiental, me es muy grato dar hoy nuestra más afectuosa bienvenida.

He dicho.

SERVICIO DE PUBLICACIONES

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Febrero, 2003