

**DISCURSO DE CONTESTACION**

**PORE EL**

**Hmo. Sr. D. Mateo Gutiérrez Elorza**

Excmo. Sr. Presidente,

Excmos. e Ilmos. Sres. Académicos,

Señoras y Señores.

Mi agradecimiento al Presidente de la Academia por encomendarme la honrosa labor de contestar al discurso del Profesor Don José Manuel González López, Catedrático de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Zaragoza.

Acepté con gran satisfacción personal este encargo por tratarse de un eminente científico, compañero de claustro y con el que me unen lazos de estrecha amistad y en ocasiones de trabajo investigador conjunto. En el nuevo Académico destaca su trabajo infatigable, su pasión investigadora y las continuas aportaciones a las labores académicas. Este conjunto de características se reflejan en un amplio *curriculum*, del que es difícil llevar a cabo una rápida semblanza sobre las principales contribuciones del beneficiario.

El Prof. González López nació en Granada y llevó a cabo sus estudios de Licenciatura en las Universidades Complutense y de Granada, donde obtuvo su titulación en 1966. Posteriormente, comienza su labor docente en 1967 como Profesor Ayudante de la Cátedra de Geología de la Universidad de Zaragoza, a la par que inicia su trabajo de Tesis Doctoral, bajo la ayuda y supervisión del Profesor Don Félix Arrese Serrano, al que tanto debe la Sección de Ciencias Geológicas de esta Universidad. Fue el Profesor Arrese el que le introdujo en el mundo de la investigación mineralógica.

Las primeras Investigaciones se centraron sobre la mineralogía y mineralogénesis del yacimiento de magnesitas de Asturreta (Navarra), que fueron objeto de su Tesis Doctoral, defendida en 1976 en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza y de la que se derivaron varias publicaciones. En 1978 obtuvo la plaza de Profesor Adjunto numerario y en 1988 la Cátedra de Cristalografía y Mineralogía de la Universidad de Zaragoza.



A partir de 1984 centra fundamentalmente sus trabajos en el campo de la mineralogía de las arcillas. Entre los que destacan sus brillantes aportaciones sobre los depósitos de sepiolita-palygorskita de la Cuenca de Almazán y Fosa de Calatayud, así como sus excelentes contribuciones a la diagénesis-metamorfismo de muy bajo grado en rocas cámbricas y ordovícicas de la Cordillera Ibérica.

No cabe duda que la producción científica del nuevo Académico es amplia y valiosa, así como su dilatada labor académica. En sus más de treinta años de intensa actividad han recibido sus enseñanzas un gran número de alumnos y también muchos investigadores universitarios se han visto favorecidos por la transmisión de sus ideas.

Los méritos presentados por el recipiendario obedecen a una fructífera labor, que justifica plenamente la elección de la Academia para que forme parte de la misma, incorporándose a su Sección de Naturales.

Una vez escuchado el brillante discurso de ingreso del nuevo Académico, en el que de manera tan acertada ha plasmado sus conocimientos, con un planteamiento sintético, sobre las numerosas aplicaciones de los minerales de la arcilla en diferentes campos de la actividad industrial, intentaremos contestarle acerca de la importancia que tienen los minerales de la arcilla en el origen de algunas formas del relieve y en los datos que aportan para la deducción de cambios climáticos.

Los procesos desencadenados por la existencia de arcillas hinchables, o expansivas, tales como la montmorillonita, en formaciones superficiales, fundamentalmente en zonas áridas y semiáridas, pueden originar, por cambios de volumen, las morfologías tipo gilgai, término australiano aplicado a ondulaciones de la superficie terrestre.

La topografía gilgai comprende una alternancia de pequeños montículos y depresiones, de unos 3 m. de diferencia de altura entre el techo del montículo y el fondo de la depresión. Cuanto mayor es esta dimensión mayor es la capacidad de hinchamiento de las arcillas y la saturación de sodio del complejo de cambio. Estas agrupaciones se clasifican morfológicamente, en función de la forma y orientaciones de las mismas.

Los gilgai se generan en áreas con alternancia de estaciones húmedas y secas. Los periodos secos, que agrietan la superficie, alternan con otros húmedos donde domina el hinchamiento. El microrrelieve resulta de empujes hacia arriba producidos por el hinchamiento del subsuelo húmedo. El gilgai se localiza fundamentalmente en áreas de vertisuelos (suelos arcillosos negros expansivos). El hinchamiento obedece a la presencia de arcillas expansivas y a la existencia de elevados contenidos de porcentaje de sodio intercambiable. Señales de esta expansividad, que da origen a los gilgai, pueden observarse en los perfiles de estos suelos, donde son relativamente frecuentes pequeños espejos de falla y planos cabalgantes. Igualmente, estacas introducidas en el suelo quedan basculadas o incluso expulsadas después de un año. Si los materiales hinchables nunca se secan, el movimiento en la vertical es mínimo y no se forma el gilgai. Esto nos indica que para la generación del gilgai se necesitan climas con alternancias de estaciones húmedas y secas. En estas últimas los materiales se contraen y en las estaciones húmedas las grietas sirven de vías de penetración del agua en el subsuelo, necesaria para la introducción en la red cristalina de las arcillas hinchables con la consiguiente expansividad. En este microrrelieve solo un pequeño porcentaje del terreno es apto para el cultivo. Por eso, estos subsuelos potencialmente fértiles deben utilizarse como pasto. Si nivelamos con maquinaria este microrrelieve, vuelve a generarse en el plazo de unos tres años.

Este hinchamiento puede afectar a estructuras realizadas por el hombre y al desarrollarse puede generar presiones importantes, que originan movimientos diferenciales del terreno con hinchamientos y asentamientos que afectan a las estructuras que soportan (agrietamiento de edificios, rotura de conducciones, deformación de pavimentos y taludes, etc.). Algunos daños pueden enfatizarse por la rotura de colectores, que suministran agua al sistema. Las presiones generadas pueden alcanzar valores de hasta  $10 \text{ kp/cm}^2$ . En Estados Unidos se construyen anualmente más de 250.000 casas sobre suelos expansivos y alrededor de un 10% de las mismas han sufrido daños significativos. En España un 32% de las formaciones geológicas contienen arcillas expansivas y un 67% del territorio se encuentra bajo climas en los que pueden producirse los fenómenos de hinchamiento y contracción. Un incremento de volumen del 3% produce daños, en cuyo caso se requieren cimentaciones especiales. Es muy importante conocer la profundidad a la que afecta la expansividad para llevar a cabo cimentaciones. Esta zona de variaciones volumétricas se denomina por los geotécnicos capa activa.

Otras microformas de gran incidencia en Hidrología y Geomorfología son el *piping* o *tunnelling*, muy frecuente en medios semiáridos. Se puede definir como el desarrollo natural de un drenaje subsuperficial en rocas clásticas y consiste en la movilización de partículas sólidas que se transportan en suspensión por el agua. El *piping* se localiza preferentemente en áreas cuyos climas presentan fuertes contrastes estacionales y sobre todo una gran variabilidad en la precipitación, tales como los climas mediterráneos. El *piping* resulta de una compleja combinación de muchos factores.

El agrietamiento por desecación es uno de los factores más importantes en la generación del *piping* y alcanza una gran intensidad con la existencia de arcillas hinchables. En verano, los materiales se contraen y con las lluvias de tormenta se rellenan las grietas y las arcillas pueden dispersarse. Con un gradiente hidráulico adecuado llegan a moverse. De esta forma, las grietas al ensancharse se convierten en *pipas*. Estos se encuentran en zonas aplanadas, incididas por la red fluvial, y en las laderas. Cuando existe un gran contraste de relieve pueden generarse grandes galerías y pseudodolinas por colapso, que asemejan un paisaje kárstico. Los continuos hundimientos del techo de las galerías producidas por *piping* pueden dar lugar a la generación de barrancos, cuyo origen lo atestiguan la presencia de arcos naturales en materiales detríticos. Estos colapsos también incrementan la velocidad de retroceso de las cabeceras de los barrancos. Por otra parte, el *piping* crea inestabilidad en las laderas y coadyuva a la generación de deslizamientos.

Ya hemos indicado que la presencia de arcillas hinchables es un factor muy importante en el desarrollo del *piping*, pero no es imprescindible su presencia para que se produzca hinchamiento. En ambientes ricos en sodio, las illitas y otros minerales de la arcilla también se hinchan, llegando a producirse hinchamientos del 10-12%. Pero la principal propiedad que controla la susceptibilidad al *piping* es el contenido de cationes de  $\text{Na}^+$  disueltos en el agua de los poros, con respecto a la suma de los cationes de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Estos valores se obtienen calculando las cantidades existentes de estos cationes en el extracto de pasta saturada. Una vez conocidos se calcula el porcentaje de sodio intercambiable (ESP) o la relación de absorción de sodio (SAR). Las arcillas con un ESP superior a 15, o un SAR por encima de 5, son muy susceptibles al *piping* y presentan pH básicos (valores entre 8 y 10). Además, los suelos con elevado contenido en sodio facilitan la dispersión de las arcillas. El diagrama de Sherard establece la diferenciación de campos dispersivos en relación con el contenido en sodio. Los puntos situados en el campo

de la dispersión son susceptibles al piping. El estudio de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los materiales es importante en ingeniería civil, sobre todo en la construcción de presas de tierra, ya que algunas se han desintegrado por piping. Si el SAR es elevado, sus valores pueden reducirse con la adición de calcio, bajo la forma de yeso o cal, con lo que se dificultan los procesos de piping.

Los factores que inciden en la generación de los deslizamientos son muy numerosos: propiedades mecánicas de las rocas y del regolito, precipitación, vegetación, pendiente, sismicidad, acción antrópica, etc. Por consiguiente, es preciso comprender el papel de estos factores, de cara a conocer la susceptibilidad de un área para que en ella se desencadenen deslizamientos. Uno de estos factores son las propiedades físicas de los suelos, que están fuertemente influenciadas por su mineralogía, textura y fábrica. Muchas de estas propiedades físicas se expresan por índices, obtenidos mediante ensayos de laboratorio y/o campo. Estas propiedades varían con el tiempo, contenido en agua y porosidad. También fluctúan especialmente en su mineralogía y estructura, a veces en unos pocos metros. Por todo ello, es necesario el conocimiento de las propiedades físicas del suelo. En nuestro caso, nos detendremos en el papel que juegan los minerales de la arcilla en el desencadenamiento de deslizamientos.

Las caolinitas existentes en el regolito tienen un límite de contracción bajo, de manera que no se agrietan en épocas secas. Sin embargo, la presencia de minerales de la arcilla hinchables da lugar a una retracción importante con la generación de fisuras, que permiten una rápida infiltración y la obtención de un estado de liquidez, lo que favorece la generación de deslizamientos. Por otra parte, los saprolitos caoliníticos presentan unos elevados límites de plasticidad y liquidez, mientras que en los saprolitos con montmorillonita son más bajos. Por lo tanto, cuando se producen importantes lluvias, y se alcanza el límite de liquidez, se desencadenan gran cantidad de deslizamientos de distintos tipos. Cuando las pendientes de las laderas son importantes, predomina la disección y los minerales de la arcilla existentes son del tipo 2:1, ya que la caolinita necesita para generarse un periodo de tiempo importante. La presencia de cantidades significativas de arcillas hinchables acentúa el proceso de levantamiento y además disminuye la resistencia al cizallamiento del material de la ladera. Por otra parte, cuando el buzamiento de las formaciones sedimentarias presenta valores similares a los ángulos de la ladera, se facilita el desencadenamiento de deslizamientos traslacionales, muchas veces a favor de estratos arcillosos.

Se reconocen dos factores fundamentales que contribuyen a la disminución de la resistencia al cizallamiento en suelos arcillosos. Por un lado, la absorción de agua y el hinchamiento resultante y, por otro, el intercambio iónico, que suele actuar simultáneamente. En los minerales de la arcilla, los iones con enlace débil se reemplazan por otros al ponerse en contacto con una disolución salina. Estas pérdidas de resistencia al cizallamiento conducen a la generación de deslizamientos.

Los deslizamientos más peligrosos en suelos arcillosos se producen por comportamiento tixotrópico. En un sistema de minerales de la arcilla y agua tenemos una resistencia débil, que puede distorsionarse por pequeñas influencias mecánicas que traen como resultado una reducción de la resistencia al cizallamiento, aproximándose a cero. A veces, el suelo alcanza la licuefacción y fluye a grandes distancias, incluso con pequeñas pendientes.

Este tipo de arcillas tixotrópicas, denominadas arcillas rápidas (*quick clays*), se localizan en sedimentos de origen marino, que después de la regresión del mar y del rebote glacioisostático ocupan áreas de escasa pendiente, que se sitúan a varios cientos de metros sobre el nivel del mar, sobre todo en Escandinavia y Canadá. La reducción del contenido salino por lixiviación del sodio existente entre las láminas de arcilla, da lugar a una progresiva disminución de la resistencia de estos sedimentos y a una reducción del límite de liquidez. Estas circunstancias producen deslizamientos de las arcillas, que se comportan como un fluido viscoso. Alcanzan velocidades de hasta 3 m/seg., de aquí que los noruegos las denominan arcillas rápidas.

Estos deslizamientos se desencadenan sobre todo por las intensas vibraciones asociadas con terremotos, aunque también las explosiones y el tráfico pesado pueden ser la causa de su iniciación. El deslizamiento, de tipo traslacional, más importante tuvo lugar en Anchorage (Alaska) el 27 de Marzo de 1964, en el que se registraron valores de 8,4-8,6 en la escala Richter. Este terremoto constituye el más importante de los registrados en Norteamérica. Los efectos del deslizamiento sobre la ciudad de Anchorage fueron catastróficos, con grandes pérdidas humanas y materiales.

En los estudios de Ciencias de la Tierra son muy clásicos los trabajos concernientes con la meteorización y minerales de la arcilla resultantes, así como con la relación de estos minerales de neoformación con el clima reinante en el momento de su generación. La humedad y la temperatura son los dos aspectos más importantes del clima que controlan las propiedades del suelo. El primero, influye linealmente en la meteorización y en el grado de lixiviación y, la temperatura, afecta

exponencialmente a la velocidad de los procesos químicos y bioquímicos. Como consecuencia, estos factores climáticos influyen en el contenido de arcillas en el suelo.

Los estudios sobre la meteorización de basaltos en Hawaii señalan un aumento del porcentaje de arcillas con el incremento de la precipitación, así como cambios en la mineralogía. La montmorillonita es un mineral característico de bajas precipitaciones, que en condiciones de mayor lixiviación da paso a la caolinita y cuando la precipitación es más elevada el suelo se desilicifica y se forman los oxihidróxidos de hierro y aluminio.

A partir de los productos de alteración dominantes se pueden distinguir en los trópicos distintas zonas de meteorización:

1.- Zona de bisialitización con formación de minerales de la arcilla de tipo 2:1 (montmorillonita) en áreas con precipitaciones inferiores a 500 mm.

2.- Zona de monosialitización con minerales de la arcilla de tipo 1:1 como mineral predominante en el regolito, en zonas con precipitación de 500-1200/1500 mm .

3.- Zona de alitización en la que la gibbsita ( $Al(OH)_3$ ) se encuentra junto con la caolinita en regiones con más de 1500 mm. de precipitación.

El papel de la temperatura en la generación de los minerales de la arcilla viene dado por el contenido de arcillas en regolitos de rocas básicas. Este es función directa de la temperatura. A  $10^{\circ}C$  de temperatura media anual tenemos un 15% de arcilla en el suelo y a  $16^{\circ}C$  un 50%.

El tipo y la cantidad de minerales de la arcilla varían por lo general en profundidad, aunque algunos perfiles no presentan cambios substanciales. Estas variaciones deben estar relacionadas con la intensidad de la lixiviación, que moviliza a muchos iones y a la sílice hasta importantes profundidades. Esta modificación es bastante frecuente. De este modo, la gibbsita en superficie pasa hacia abajo a caolinita o cuando ésta se encuentra en superficie el tránsito es a montmorillonita. Estas secuencias pueden estar en equilibrio con las condiciones ambientales, pero pueden cambiar. Si el perfil se erosiona, la montmorillonita forma parte de los afloramientos superficiales, pero si el clima es agresivo se produce la transformación de montmorillonita en caolinita en superficie. Si el descenso superficial, resultante de



la denudación, es lento y se compensa con la velocidad de generación de caolinita, el perfil modifica su distribución mineralógica.

La formación y transformación de los minerales de la arcilla en el perfil de meteorización son procesos lentos. Por consiguiente, el estudio de los minerales de la arcilla puede ser útil para llevar a cabo investigaciones paleoclimáticas. Ya se ha señalado que la montmorillonita se forma en zonas de escasa precipitación, mientras que la caolinita y la halloysita se generan en regiones de gran lixiviación. Si encontramos caolinita en los suelos de un medio árido, debemos de interpretar que en ese área existieron en el pasado climas tropicales húmedos. Por el contrario, cuando tiene lugar en una zona árida, con montmorillonita en el perfil, un cambio climático hacia condiciones de gran lixiviación la montmorillonita generada en ese clima se transforma en caolinita. De esto se deduce que podemos detectar un cambio climático de húmedo a seco, pero no al contrario. Para que tengan lugar estos cambios de fase mineral es preciso que el cambio climático tenga una larga duración, ya que los cambios mineralógicos son lentos y si el cambio climático es breve no se producen modificaciones detectables. En los volcanes situados en zonas tropicales húmedas, la edafogénesis es relativamente rápida, pero queda frecuentemente interrumpida por nuevas emisiones volcánicas que fosilizan los suelos. En esas circunstancias la actividad endógena exhalativa es mucho más rápida que la edafogénesis y si tuviera lugar algún cambio climático no quedaría registrado en el suelo.

En fin, no sé en qué medida he podido atender la solicitud que nos hizo la Academia al indicarnos que elaboráramos el discurso de contestación del Profesor González López. En nombre de los académicos y en el mío propio le expreso nuestra satisfacción por su ingreso en esta Institución, que obedece a las numerosas aportaciones llevadas a cabo a lo largo de su vida académica e investigadora. Creo interpretar el agrado que experimenta la Academia al contar con un nuevo Académico de méritos tan relevantes.