

# Ley de distribución de planos de debilidad en la Sierra de Atapuerca (Burgos): aplicación al drenaje del karst

*Weakness planes distribution law in Atapuerca (Burgos): Application of karst drainage*

A. Eraso (\*), M.C. Domínguez (\*\*), A.I. Ortega (\*\*\*), M.A. Martín (\*\*\*), C.J. Gavilán (\*), C. Paredes (\*\*\*\*), N. Gallego (\*\*\*\*\*), S. Giralt (\*\*\*\*\*)

(\*) Dept. de Ingeniería Geológica. Universidad Politécnica de Madrid. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid.

(\*\*) Dept. de Matemática Pura y Aplicada. Universidad de Salamanca. Plaza de la Merced 1-4. 37008. Salamanca.

(\*\*\*) Grupo Espeleológico EDELWEIS. Exma. Diputación de Burgos. Burgos.

(\*\*\*\*) Dept. de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos. U.P.M. C/ Ríos Rosas, 21. 28003. Madrid.

(\*\*\*\*\* C/ Vega, 11. Villadiego. Burgos.

(\*\*\*\*\* C/ Josep Anselm Clavé, 4 - 3ª. 08002. Barcelona.

## ABSTRACT

*In this work, we apply a method, which has been widely verified, of the study and use of the microtectonic data gathered in the field (parameters used are strike, dip and sense of dip of tectoglyphs: stylolite plans, mineral veins and fault plans), for analysis and quantification of the directional anisotropy in the lime outcrop of Atapuerca.*

*We obtain four main drainage directions: N 117°-120°, N 93°, N 156° and N 6° with 14,8%, 10,9%, 10,8% and 8,6% probabilities respectively. Each with its own normal distributions overlapping to themselves. The contrast of the drainage prediction and conduit directions polymodals shows that the maximum error between prediction modes and the found in the direction of the caves is 3,9%.*

**Key words:** karst, distribution law, endorrheic drainage, Atapuerca.

Geogaceta 23 (1998), 43-46  
ISSN: 0213683X

## Introducción

La Sierra de Atapuerca situada a unos 17 km al E de Burgos está formada por un afloramiento calizo del Cretácico superior de apenas 10 km de extensión. Se trata de un "monadnock" que emerge entre los sedimentos terciarios por los que discurre el río Arlanzón, al sur del referido afloramiento.

De gran complejidad estructural, este pequeño afloramiento, ha cobrado gran importancia en la última década por la existencia en él de un importante yacimiento arqueológico ubicado en los sedimentos pleistocenos que fosilizan el complejo kárstico desarrollado en el flanco SW de la citada sierra, donde se ha definido, entre otros hallazgos, la presencia de Homo antecesor de 800.000 años de antigüedad (Bermúdez de Castro *et al.*, 1997), que obliga a revisar algunos conceptos de la historia de los albores de la evolución humana.

El karst, ya conocido desde algunas décadas (Martín *et al.*, 1981) tiene su

principal exponente en las cavernas topografiadas, entre las que destacan:

Cueva Mayor.....1795 mts.  
Cueva del Silo..... 688 mts.  
Cueva del Compresor..... 200 mts.  
Cueva Peluda ..... 197 mts.

siendo posible explorar las dos últimas, gracias a la existencia de una trinchera del antiguo ferrocarril minero ya abandonado.

Dicha trinchera ha permitido también el acceso a los importantes rellenos kársticos de la denominada Gran Dolina (que en realidad se trata de un amplio conducto kárstico totalmente colmatado), Galería, Penal y Elefante (Carbonell *et al.*, 1995), que junto con la Sima de los Huesos de Cueva Mayor (Arsuaga *et al.*, 1993), constituyen los principales yacimientos donde se trabaja actualmente.

El acceso al karst y a las excavaciones arqueológicas se realiza desde la localidad de Ibeas de Juarros (sita en la carretera N-120 Burgos-Logroño), donde se emplaza el Museo "Emiliano Aguirre" dedicado monográficamente a las excavaciones del yacimiento arqueológico de Atapuerca.

## Objetivos y fundamentos del método utilizado

Dada la circunstancia de que el yacimiento arqueológico de Atapuerca, aparece en los sedimentos que rellenan el karst del SW de la sierra, parece imprescindible conocer tanto la génesis como la evolución de dicho karst (Carbonell *et al.*, 1997).

Dicha investigación comprende varias fases:

1ª.- Definición de la preparación tectónica del karst, que conlleva:

- Inventariado de planos extensionales o de debilidad.
- Cuantificación direccional (en porcentaje de probabilidad) de la anisotropía del macizo rocoso.
- Distribución estadística de los planos extensionales o de debilidad donde se establece el acuífero kárstico.

2ª.- Estimación de las paleovelocidades y sentidos de circulación del agua en el acuífero kárstico.

3ª.- Establecimiento tanto del número de fases de reactivación hídrica del

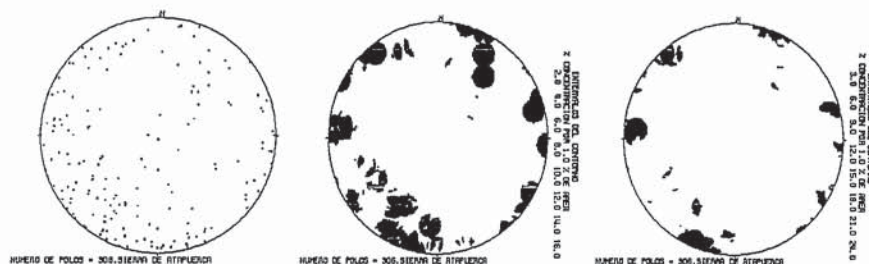


Fig. 1.- Distribución de los polos de los planos extensionales en red de Schmidt: todos los planos en primer lugar y con intervalos del 2% y del 3% después. Salidas graficas obtenidas con el programa GEODRE.

Fig. 1.- Distribution of extensional planes' poles in Schmidt's net: first, all poles, and after with intervals of 2% and of 3%. Graphic outputs obtained by the programme GEODRE.

acuífero kárstico como de su cronología.

4ª.- Estudio detallado de la sedimentología tanto freática como vadosa o subaérea.

En el presente trabajo, nos ocuparemos de una manera general de la primera fase de investigación.

El método aplicado (Eraso, 1985 ; Paredes *et al.*, 1993) va enfocado a predecir las direcciones principales de drenaje en el karst, y se apoya en dos hipótesis.

La primera, de índole cualitativa dice que: «Existe una preparación tectónica del karst que prefigura la disposición de la red tridimensional de conductos de drenaje, constitutiva del acuífero kárstico, en función de su historia geológica».

La segunda, de índole cuantitativa afirma que: «Las direcciones más probables de drenaje se organizan dentro de los planos que contienen a las componentes máxima ( $\sigma_1$ ) e intermedia ( $\sigma_2$ ) de cada elipsoide de esfuerzos, es decir que dichos planos ( $\sigma_1, \sigma_2$ ), son ortogonales a la componente menor ( $\sigma_3$ ) o extensional del elipsoide en cuestión».

Sobre la base de dichas hipótesis, se leen en campo únicamente las huellas permanentes o tectoglifos generados por la historia tensional sufrida por el macizo, que son:

- los estilolitos (E) o planos de interpenetración, perpendiculares a la componente mayor o comprensiva ( $\sigma_1$ ) del elipsoide de esfuerzos, que contienen a las componentes menor ( $\sigma_3$ ) e intermedia ( $\sigma_2$ ), es decir al plano ( $\sigma_2, \sigma_3$ ).

- las venas o diques (V) o planos extensionales, perpendiculares a la componente menor ( $\sigma_3$ ) del elipsoide, que contienen al plano ( $\sigma_1, \sigma_2$ ). (Ver fotografía Fig. 6).

- las fallas (F), que en el plano de fractura contienen a ( $\sigma_2$ ), y si se aprecian estrías de fricción, su dirección es perpendicular a la citada componente intermedia ( $\sigma_2$ ).

Aplicando las técnicas de geología estructural y de la proyección estereográfica, se definen los correspondientes elipsoides ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ), mediante las conjunciones encontradas en campo de dos tipos diferentes de tectoglifos:

estilolito-vena : E-V

estilolito-falla : E-F

vena-falla : V-F

utilizando también el caso de fallas conjugadas  $F_1 - F_2$  (tectoglifos del mismo tipo) o el de falla con estría o falla única  $F_u$ , ya que ambas opciones también definen elipsoides ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ).

Como el objetivo perseguido por el método utilizado no es el realizar un análisis estructural del macizo, una vez conocidos los elipsoides, se definen los planos extensionales ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) mediante haces de círculos máximos en red de Wulff o nubes de polos en red de Schmidt. Dichos planos extensionales, se definen tanto de los elipsoides como directamente de las venas, que como vimos, contienen a ( $\sigma_1, \sigma_2$ ).

El análisis de dicha información se realiza aplicando los programas GEODRE y GEOPOL de que dispone el método utilizado, resolviendo la ley de distribución de planos de debilidad aplicando estadística espacial.

### Trabajos de campo

Para realizar la lectura de datos en campo, se han seleccionado los lugares de la Sierra de Atapuerca donde la roca aparece desnuda, bien antropogénicamente (canteras y trincheras de ferrocarril) o bien naturalmente (cuevas), seleccionando un total de 5 estaciones:

- Estación 1. Cueva Mayor: Consta de 60 lecturas distribuidas de la siguiente manera:

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| Conjunciones       | E-V.....8          |
|                    | E-F.....2          |
|                    | F-V.....4          |
|                    | $F_1 - F_2$ .....7 |
| Fallas con estrías | $F_u$ .....2       |
| Venas              | .....37            |
| Total.....         | 60                 |

- Estación 2. Trinchera: Consta de 67 lecturas cuya distribución es:

|                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| Conjunciones       | E-V.....0           |
|                    | E-F.....10          |
|                    | F-V.....9           |
|                    | $F_1 - F_2$ .....20 |
| Fallas con estrías | $F_u$ .....15       |
| Venas              | .....13             |
| Total.....         | 67                  |

- Estación 3. Canteras Las Torcas: Consta de 29 lecturas con la siguiente distribución:

|                    |                    |
|--------------------|--------------------|
| Conjunciones       | E-V.....1          |
|                    | E-F.....6          |
|                    | F-V.....3          |
|                    | $F_1 - F_2$ .....0 |
| Fallas con estrías | $F_u$ .....0       |
| Venas              | .....19            |
| Total.....         | 29                 |

| Clases | Intervalos | Cueva del Silo | Galería Silo | Galería Estatuas | Galería del Sílex | Cueva Peluda | Cueva del Compresor | Total Cuevas |
|--------|------------|----------------|--------------|------------------|-------------------|--------------|---------------------|--------------|
| 1ª     | 0°-15°     | 80             | 68           | 20               | 143               | 0            | 37                  | 348          |
| 2ª     | 15°-30°    | 174            | 20           | 62               | 39                | 32           | 31                  | 358          |
| 3ª     | 30°-45°    | 41             | 67           | 15               | 15                | 12           | 0                   | 150          |
| 4ª     | 45°-60°    | 26             | 14           | 10               | 96                | 4            | 13                  | 163          |
| 5ª     | 60°-75°    | 68             | 27           | 6                | 37                | 0            | 17                  | 155          |
| 6ª     | 75°-90°    | 33             | 29           | 35               | 21                | 16           | 15                  | 149          |
| 7ª     | 90°-105°   | 76             | 10           | 40               | 129               | 0            | 0                   | 255          |
| 8ª     | 105°-120°  | 39             | 0            | 60               | 67                | 0            | 55                  | 221          |
| 9ª     | 120°-135°  | 16             | 31           | 34               | 0                 | 0            | 8                   | 89           |
| 10ª    | 135°-150°  | 28             | 77           | 41               | 5                 | 110          | 0                   | 261          |
| 11ª    | 150°-165°  | 39             | 0            | 56               | 32                | 16           | 14                  | 157          |
| 12ª    | 165°-180°  | 68             | 66           | 40               | 9                 | 7            | 10                  | 200          |

|             |     |     |     |     |     |     |      |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Total (mt.) | 688 | 409 | 419 | 593 | 197 | 200 | 2506 |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|

Tabla 1.- Datos de las exploraciones de las cuevas.

Table 1.- Data of explorations of the caves.

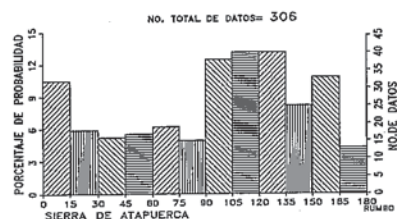


Fig. 2.- Polimodal de probabilidad direccional del Método de Predicción obtenida por el programa KOLMO.

Fig. 2.- Directional probability polimodal of Prediction Method obtained by the programme KOLMO.

- **Estación 4. Cantera Rubena:** Consta de 47 lecturas distribuidas de la siguiente manera:

|                    |                                         |
|--------------------|-----------------------------------------|
| Conjunciones       | E-V.....5                               |
|                    | E-F.....1                               |
|                    | F-V.....3                               |
|                    | F <sub>1</sub> - F <sub>2</sub> .....10 |
| Fallas con estrías | F <sub>u</sub> .....6                   |
| Venas              | .....22                                 |
|                    | Total.....47                            |

- **Estación 5. Cantera Cueva del Mirador:** Consta de 103 lecturas distribuidas de la siguiente manera:

|                    |                                        |
|--------------------|----------------------------------------|
| Conjunciones       | E-V.....8                              |
|                    | E-F.....12                             |
|                    | F-V.....23                             |
|                    | F <sub>1</sub> - F <sub>2</sub> .....7 |
| Fallas con estrías | F <sub>u</sub> .....4                  |
| Venas              | .....49                                |
|                    | Total.....103                          |

Es decir, que la información obtenida en campo contiene 306 lecturas con definición de planos de debilidad, de las que 260 corresponden al establecimiento de elipsoides, y las 146 restantes a venas que contienen planos ( $\sigma_1, \sigma_2$ ).

Los resultados obtenidos (Fig. 1 y Fig. 2) por los programas GEOPOL y KOLMO son respectivamente:

- En red de Schmidt, los polos de planos de debilidad con intervalos del 2% y del 3% (Fig. 1).

- En histograma de dos dimensiones, relacionando en ordenadas el porcentaje de probabilidad (izquierda) y número de datos (derecha) y en abscisas el rumbo (sobre norte magnético) en 12 clases estadísticas de 15° de intervalo (Fig. 2).

En dicha figura se observa la existencia de cuatro modas direccionales que prefiguran el desarrollo del karst en Atapuerca, con las siguientes características:

- Tres modas principales:
- N 105°-135° con 13,1% de probabilidad.
- N 150°-165° con 10,8% de probabilidad.

| Clases | Intervalos | Conductos |           |         | Predicción |           |         | Error |
|--------|------------|-----------|-----------|---------|------------|-----------|---------|-------|
|        |            | Metros    | Porcen. % | Acumul. | Planos     | Porcen. % | Acumul. |       |
| 1ª     | 0°-15°     | 348       | 13,887    | 13,887  | 32         | 10,458    | 10,458  | 0,990 |
| 2ª     | 15°-30°    | 358       | 14,286    | 28,172  | 18         | 5,882     | 16,340  | 3,416 |
| 3ª     | 30°-45°    | 150       | 5,986     | 34,158  | 16         | 5,229     | 21,569  | 3,634 |
| 4ª     | 45°-60°    | 163       | 6,504     | 40,662  | 17         | 5,556     | 27,124  | 3,908 |
| 5ª     | 60°-75°    | 155       | 6,185     | 46,848  | 19         | 6,209     | 33,333  | 3,901 |
| 6ª     | 75°-90°    | 149       | 5,946     | 52,793  | 15         | 4,902     | 38,235  | 4,203 |
| 7ª     | 90°-105°   | 255       | 10,176    | 62,969  | 38         | 12,418    | 50,654  | 3,555 |
| 8ª     | 105°-120°  | 221       | 8,819     | 71,788  | 40         | 13,072    | 63,725  | 2,327 |
| 9ª     | 120°-135°  | 89        | 3,551     | 75,339  | 40         | 13,072    | 76,797  | 0,421 |
| 10ª    | 135°-150°  | 261       | 10,415    | 85,754  | 25         | 8,170     | 84,967  | 0,227 |
| 11ª    | 150°-165°  | 157       | 6,265     | 92,019  | 33         | 10,784    | 95,752  | 1,077 |
| 12ª    | 165°-180°  | 200       | 7,981     | 100,000 | 13         | 4,248     | 100,000 | 0,000 |

$$\text{Error Maximo : } \Sigma_{\max} \leq \frac{|\Sigma_{\text{con}} - \Sigma_{\text{pre}}|}{\sqrt{n^{\circ} \text{ de clases}}} \leq 4,203$$

$$\text{Acierto Estadístico : } 100 - \Sigma_{\max} \geq 100 - 4,203 = 95,797\%$$

Tabla 2.- Test de Kolmogorov entre ambas polimodales kársticas.

Table 2.- Kolmogorov's test between both karstic polimodals.

- N 0°-15° con 10,5% de probabilidad.
- Y una secundaria:
- N 60°-75° con 6,2% de probabilidad.

## Resultados

En principio, los resultados expresados en Fig. 1 y Fig. 2 corresponden a la ley de distribución de planos de debilidad del macizo calcáreo de la Sierra de Atapuerca y definen la polimodal que expresa su anisotropía direccional en porcentaje de probabilidad. Dicho resultado refleja, según el método aplicado, la predicción de las direcciones de drenaje que deberían seguir las galerías del karst de Atapuerca.

Para estimar el grado de acierto de dicha predicción, deberíamos contrastar su correspondiente polimodal con la polimodal relativa a la topografía de las cuevas, utilizando para ambas las mismas clases, mediante un test estadístico que permita conocer el porcentaje de error en cada una de las clases.

Para ello, partiendo de las poligonales de la topografía de las cuevas cedida por el Grupo Edelweis (Tab.1), hemos aplicado el test de Kolmogorov, en este caso en dos dimensiones, al histograma que define nuestra predicción.

Los resultados obtenidos se representan en la (Tab. 2), donde aparecen los datos correspondientes al contraste estadístico realizado. El histograma correspondiente de las cuevas y de la predicción, así como el error asociado para cada clase estadística (de 15°) aparecen en la (Fig. 3).

En la (Fig. 4) se aprecian las acumuladas de ambas polimodales, que permite estimar el error en cada clase.

Para las direcciones de las cuevas se aprecia:

- Una moda según N 15°-30° con el 14,3% de probabilidad.
- Otra moda según N 45°-60° con el 6,5% de probabilidad.
- Una tercera según N 90°-105° con el 10,2% de probabilidad.
- Y una cuarta moda según N 135°-150° con el 10,4% de probabilidad.

Analizando los resultados del test estadístico se puede observar lo siguiente:

- Todas las modas de ambos histogramas son contiguas, pero no coincidentes.
- Los errores por clase están comprendidos entre 0,2% y el 4,2%.
- El máximo error ( 4,2% ) se sitúa en la clase 6ª, donde no existe ninguna moda ni de la predicción ni de las direcciones de las cavernas.

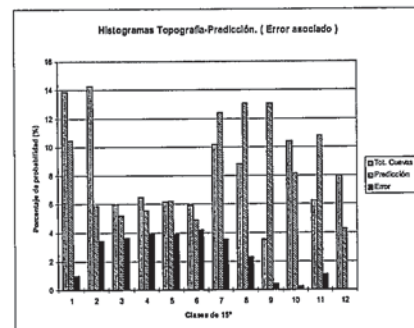


Fig. 3.- Comparación entre ambas polimodales de probabilidad direccional (exploración y predicción).

Fig. 3.- Comparison between both directional probability polimodals (exploration and prediction).

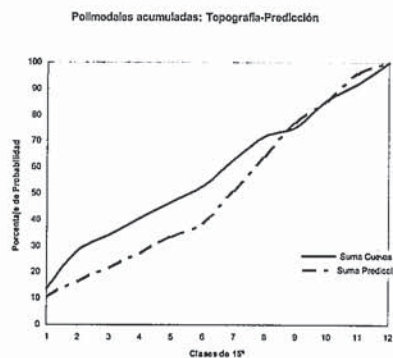


Fig. 4.- Valores acumulativos de ambas polimodales (exploración-predicción), para estimar el grado de precisión por el test de Kolmogorov.

Fig. 4.- Cumulative values of both polimodals to estimate the accuracy by Kolmogorov's test.



Fig. 5.- Histograma refinado de la probabilidad direccional de predicción.

Fig. 5.- Refined histogram of the prediction directional probability

• El mínimo error 0,2% corresponde a la clase 10ª, donde existe una de las modas del histograma de las cuevas.

• El intervalo de errores para todas las modas de ambos histogramas está comprendido entre 0,2% para la clase 10ª y 3,9% para la clase 5ª.

Finalmente, como el objetivo de este trabajo consiste en definir la ley de distribución de los planos extensionales en la Sierra de Atapuerca, debemos proceder al refinado del correspondiente histograma con el objetivo de evitar el problema que generan los valores situados en la fronte-

ra entre dos clases estadísticas contiguas.

Los resultados obtenidos se expresan en la (Fig.5), en la que se observa lo siguiente:

• Las tres modas principales antes del refinado, son en realidad cuatro:

1.- N 117°-120° (clase 8ª) con 14,8% de probabilidad en esa clase.

2.- N 93° (clase 7ª) con 10,9% de probabilidad en esa clase.

3.- N 156° (clase 11ª) con 10,8% de probabilidad en esa clase.

4.- N 6° (clase 1ª) con 8,6% de probabilidad en esa clase.

y corresponden a sendas distribuciones normales solapadas entre sí.

• La presencia de un ruido de fondo que alcanza casi el 6% de probabilidad.

• La presencia de dos modas menores según N 27° (clase 2ª) y N 51° (clase 4ª), ambas con el 6,6% de probabilidad para

• N 117°-120° con 14,8% (clase 8ª)

• N 156° con 10,8% (clase 11ª)

2.- Tres de dichas modas, la segunda, tercera y cuarta (clases 2ª, 4ª y 7ª) son coincidentes con tres de las cuatro modas del histograma de direcciones topografiadas en las cavernas.

3.- La cuarta moda del histograma de direcciones de las cavernas (clase 10ª) es contigua a la moda sexta (clase 11ª) de la ley de distribución.

4.- Las otras dos modas, primera y quinta (clases 1ª y 8ª) de la ley de distribución son también contiguas a dos de las modas (clases 2ª y 7ª) del histograma de las cavernas.

5.- El error máximo, antes del refinado, entre modas de predicción (ley de distribución) y el encontrado en las direcciones de las cavernas es del 3,9%.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Grupo EDELWEIS de espeleología de la Exma. Diputación de Burgos por la cesión de las topografías de las diferentes cavernas de la Sierra de Atapuerca y por su colaboración prestada. También expresamos nuestro agradecimiento a los directores del yacimiento arqueológico de Atapuerca, por las facilidades y apoyos recibidos en todo momento.

## Referencias

- Arzuaga, J.L., Martínez, I., Gracia, A., Carretero, J.M. y Carbonell, E. (1993): *Nature*, 362: 534-537.
- Bermúdez de Castro, J.M., Arzuaga, J.L., Carbonell, E., Rosas, A., Martínez, I. y Mosquera, M. (1997): *Science*, 276: 1392-1395.
- Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arzuaga, J.L., Díez, J.C., Rosas, A., Cuenca-Bescós, G., Sala, R., Mosquera, M. y Rodríguez, X.P. (1995): *Science*, 269: 826-830.
- Carbonell, E., Bermúdez de Castro, J.M., Arzuaga, J.L., Eraso, A. (1997): *Tecnología Ambiente*, 73: 73-80. Sec. Enresa-Mundo Subterráneo.
- Eraso, A. (1985): *KOBIE*, nº XV (Serie Ciencias Naturales):15-165.
- Martín, M. A., Domingo S., Antón T. (1981): *Kaite*, 2: 41-76.
- Paredes, C., Eraso, A. y Chacón, E. (1993): *Espeleotemas*, 3: 3-16.