

Metodología de investigación de pizarra para cubiertas

J. Taboada⁽¹⁾, C. Ordóñez⁽¹⁾ y A. Saavedra⁽²⁾

(1) Dpto. de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente. Universidad de Vigo. Escuela de Ingenieros de Minas. Campus Lagoas-Marcosende 9, 36200 Vigo (España).
e-mail: jtaboada@uvigo.es

(2) Dpto. de Estadística e Investigación Operativa. Universidad de Vigo. Escuela de Ingenieros de Minas. Campus Lagoas-Marcosende 9, 36200 Vigo (España).

RESUMEN

La investigación de yacimientos de pizarra para cubiertas se ha basado tradicionalmente en métodos subjetivos dependientes de la experiencia de los técnicos responsables. Con este trabajo se trata de establecer una metodología que permita investigar dichos yacimientos de manera objetiva utilizando técnicas estadísticas. Para ello, en primer lugar, se definen los parámetros de explotabilidad y calidad de la pizarra para cubiertas. A continuación, se valoran las variables de calidad en un conjunto de sondeos de testigo continuo de un yacimiento. Después se aplican técnicas de estadística multivariante para definir un índice de calidad de la pizarra explotable. Este índice se constituye en la auténtica ley del yacimiento minero. Por último, utilizando técnicas geoestadísticas, se interpolan los valores del índice de calidad en los puntos muestreados obteniendo un mapa tridimensional de calidad de la pizarra. Este mapa es una herramienta básica de planificación minera ya que nos indica, en cada zona del yacimiento, la calidad del producto vendible, en este caso las placas de pizarra para cubiertas.

Palabras clave: calidad, cantera, geoestadística, pizarra.

Roof slate investigation methodology

ABSTRACT

Roofing slate deposits investigation has been traditionally based on subjective methods depending on the experience of the experts entrusted with carrying out the exploitation of the deposit. With this work we try to establish a methodology which allows to research the deposits objectively using statistics techniques. Firstly, exploitability and quality of the slate parameters are defined. Secondly, quality variables are estimated in a set of continuous core boreholes in the deposit. Thirdly, multivariate statistics techniques are applied to define a quality index of exploitable slate. This index is considered the real grade of the mining deposit. Finally, geostatistics techniques are applied to interpolate the quality index values on the sampled points to get a three dimensional map of the slate quality. This map is a basic tool for the mining planification which give us, on each deposit zone, the quality of the sold product, in this case the roofing slates.

Key words: geostatistics, quality, quarry, slate.

Introducción

En este trabajo se define una metodología para analizar la explotabilidad de un macizo de pizarra.

El estudio en profundidad de cualquier macizo es un hecho ciertamente complejo, ya que partiendo de datos superficiales, del conocimiento de las estructuras geológicas y de datos puntuales más profundos (zanjas, calicatas, sondeos), se deberá llegar a conclusiones en cuanto a material de desmonte, reservas, ratios, etc, debiéndonos permitir todo ello definir si el macizo es explotable desde el punto de vista económico y cual es el mejor método para su explotación. A todo esto deberemos añadir las complicaciones

que representa la definición espacial de un yacimiento de pizarra, fijando los volúmenes explotables, sus contactos, y su continuidad.

Es precisamente en la gran complejidad de definir todos estos datos, donde la estadística, y sus aplicaciones en el campo de la informática, pueden permitirnos un mayor aprovechamiento de los datos, contribuyendo a un mejor dimensionamiento y delimitación de los volúmenes, tanto los no explotables como los que sí lo son.

Por todo ello, cualquier técnica que surja y se introduzca para aumentar o, al menos, facilitar dichos conocimientos será, obviamente, favorable para el sector de la pizarra.

Metodología

En el yacimiento de pizarra sobre el que hemos trabajado, ubicado en el ayuntamiento de Benuza, provincia de León, se procederá a la selección de los parámetros geotécnicos y de calidad adecuados que determinan la recuperación de roca en el banco de explotación y la calidad de esa roca para el uso ornamental a que está destinada. Dichos parámetros dependen del yacimiento escogido y de los problemas y defectos más habituales que presente la pizarra en esa zona. Dentro de estos parámetros, los hay de naturaleza geotécnica, normalmente ligados a la red de discontinuidades geológicas que afecta al yacimiento, pero también los hay de naturaleza estética, que no intervienen en el comportamiento mecánico de la roca, sino en su valor ornamental, lo que puede hacer que el yacimiento sea viable o inviable.

El estudio de los parámetros se ha realizado sobre los testigos de un conjunto de sondeos tomando una muestra cada cincuenta centímetros. Una vez finalizada la toma de datos en los testigos se realiza un análisis estadístico con el fin de obtener índices de calidad y explotabilidad del macizo rocoso.

En primer lugar procederemos a calcular un índice de calidad del yacimiento como combinación lineal de todos los parámetros que intervienen. Este trabajo se hace por técnicas de estadística multivariante (análisis discriminante), estableciendo dos funciones discriminantes que se constituyen en índices de calidad, al igual que la ley de un yacimiento metálico nos determina su calidad. A partir de los valores de los índices y de los datos de calidad tomados durante la testificación, se establecen tres intervalos de viabilidad de la explotación en función de la calidad del yacimiento:

- Primera calidad (1).
- Segunda calidad (2).
- No explotable (3).

La segunda fase consiste en obtener un modelo continuo de cada sondeo para finalmente realizar la extrapolación de los valores de los índices calidad a todo el yacimiento a partir de los valores en los puntos y sondeos muestreados, empleando técnicas geoestadísticas (krigeado).

La fiabilidad del método se determina comparando el modelo con los valores reales de la explotación minera del macizo en estudio (Taboada *et al.*, 1997).

Geología y explotabilidad de las pizarras

La pizarra para cubiertas se define como una roca metamórfica de grado bajo o muy bajo, grano fino

(una metalutita desde el punto de vista sedimentológico), compuesta principalmente de filosilicatos, y que posee una esquistosidad primaria muy penetrativa. En la definición dada se pueden incluir otro tipo de rocas que no son consideradas pizarras para uso en cubiertas de edificación, jugando un papel muy importante otros factores geológicos que condicionan su explotabilidad.

La composición mineralógica de la roca es poco variable. Como minerales mayoritarios se presentan las micas blancas tipo sericita (silicato hidratado de aluminio y potasio de la familia de las moscovitas) y clorita. El cuarzo puede alcanzar hasta el 45% de la roca en algunos tipos de pizarra gruesa. Además, pueden contener, generalmente como accesorios;

- Moscovita
- Plagioclasa (u otro mineral detrítico accesorio como circón)
- Materias carbonosas
- Rutilo
- Óxido de titanio
- Turmalina
- Compuestos diversos de hierro
- Calcopirita
- Calcita y dolomita
- Óxido de circonio
- Esfalerita
- Arcillas metamórficas

Las rocas metamórficas, y en particular la pizarra como roca perteneciente a este grupo, deben su naturaleza a tres procesos geológicos que han intervenido en su formación: sedimentación, deformación y metamorfismo. La calidad de la pizarra y su modo de yacer se basan en procesos anteriores que determinan una serie de factores estratigráficos, estructurales y metamórficos que son los que controlan las características de las rocas y las características del yacimiento (Taboada *et al.*, 2001).

Características de los yacimientos de pizarra

Dependen fundamentalmente de la estructura geológica (disposición geométrica de las capas y otros elementos como la esquistosidad (Fig. 1) y sobre todo del estado de fracturación del macizo rocoso (diaclasas y otras discontinuidades) y de la presencia de deformaciones continuas como los kink – bands. Cabe también mencionar otras características como: estructura, potencia de las capas, diques de cuarzo, metamorfismo de contacto, presencia de esquistosidades secundarias o de bandeo tectónico.

Todas las características anteriores están estrechamente interrelacionadas. En función de estas caracte-

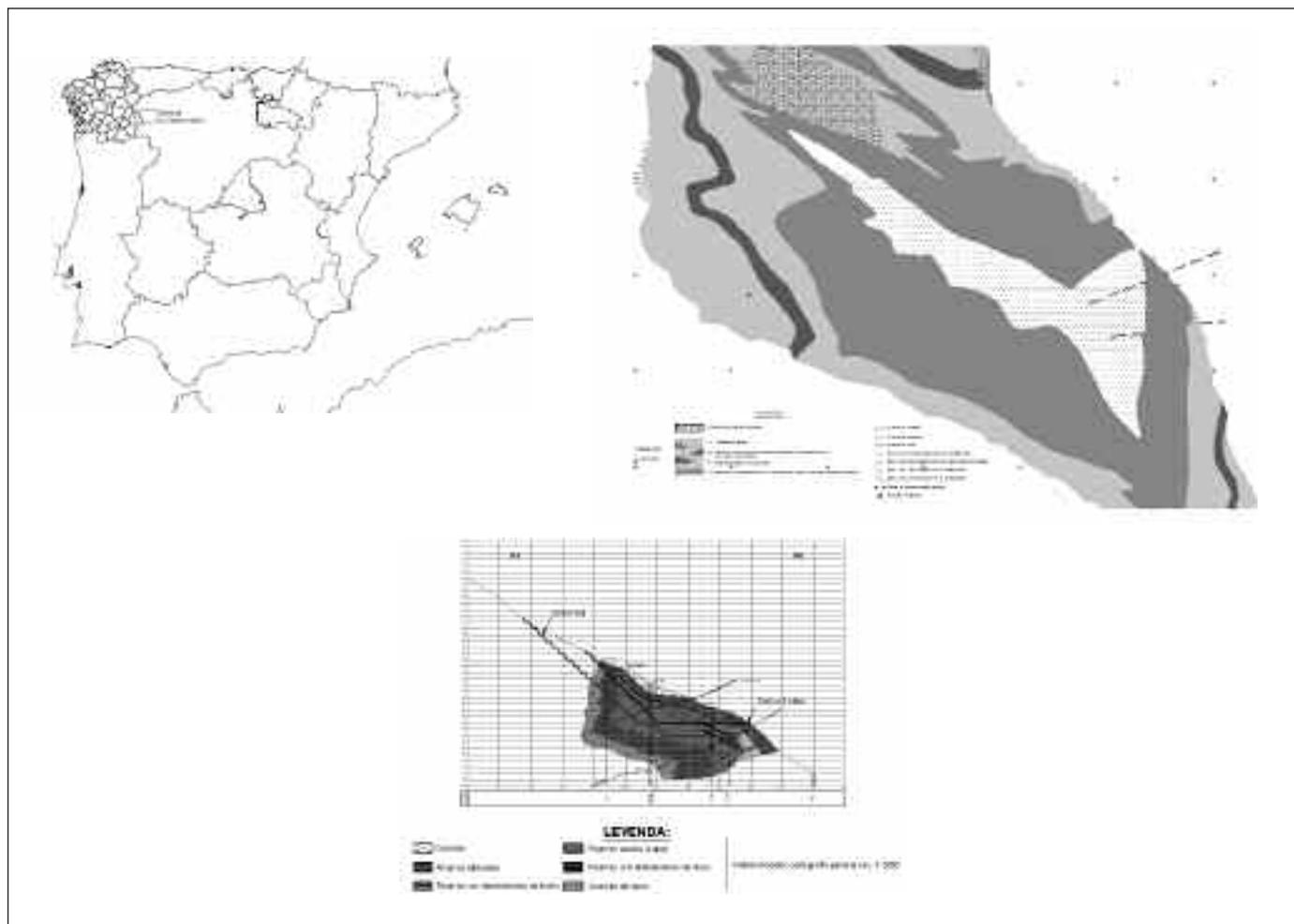


Fig. 1: Situación, plano y perfil geológico del yacimiento
 Fig. 1: Situation map, map and geologic profil of deposit

rísticas se puede determinar, en las primeras fases de la investigación, la explotabilidad de una capa o yacimiento concreto. En una primera fase se evalúan una serie de parámetros básicos; por orden de importancia, la fisilidad alta, ausencia de minerales metálicos "de visu", tamaño de grano fino, color, ausencia de crenulación, lineaciones y laminaciones arenosas (García Guinea *et al.*, 1998).

Otros factores necesarios para definir la pizarra como de buena calidad son: potencias de capa altas, ausencia de kink – bands y macizos rocosos poco fracturados.

El factor que más frecuentemente condiciona la explotabilidad de un determinado yacimiento es el estado de fracturación del macizo rocoso, incluyendo en este apartado no sólo las diaclasas y fallas, sino

también otros tipos de discontinuidades como los kink – bands. Una alta densidad de fracturas impide la extracción de bloques con el volumen mínimo que se considera rentable. La definición del volumen medio y las formas del bloque – tipo que se extraerá de un determinado macizo se pueden determinar aplicando cuidadosamente métodos de análisis estructural tales como representaciones estereográficas y en rosa y mapas de densidad de fracturación.

De lo anteriormente expuesto se desprende que las bases metodológicas fundamentales de la investigación de "pizarras para cubiertas" son geológicas. La geología y sus técnicas usuales constituyen la herramienta más importante, barata y rápida que el explotador tiene a su alcance para localizar nuevos yacimientos y para aumentar la rentabilidad de los

que ya están en explotación. La gran variabilidad de los factores geológicos y el gran número de estos impide que dichos métodos puedan aplicarse de forma homogénea en todos los yacimientos, teniendo que dar más importancia a uno u otro según avanza la investigación. A pesar de ello, una investigación cuidadosamente planeada y ejecutada permite disminuir notablemente la incertidumbre inherente a toda explotación minera.

Parámetros de calidad de la pizarra

A continuación pasamos a describir los parámetros geotécnicos que afectan al banco de explotación y que condicionan su explotabilidad, ya que la recuperación de la pizarra en el banco de arranque va a depender de las discontinuidades que afectan al macizo rocoso en explotación (Fig. 2). El término discontinuidad hace referencia a todas las estructuras con geometría más o menos planar que rompen la continuidad de una masa rocosa tales como fallas, diaclasas, kink – bands, bandas de cizalla, laminaciones, diques y venas (González *et al.*, 1994).

Las discontinuidades más comunes son las diaclasas. Estas tienen una influencia decisiva en la explotabilidad de los yacimientos y en el rendimiento de las canteras de rocas ornamentales.

Las variables que se han escogido para estimar la calidad del yacimiento son las siguientes:

- RQD (rock quality designation)

Es un parámetro geotécnico que nos da una idea general de la fracturación del macizo. Se define como el porcentaje de testigo continuo recuperado en trozos mayores de 10 cm de longitud, respecto a la longitud total perforada.

En las formaciones pizarrosas es muy fácil que los

testigos se rompan por los planos de esquistosidad ante cualquier golpe en su manejo, por lo que es muy importante distinguir entre roturas debidas a discontinuidades naturales y las debidas a la propia estructura pizarrosa o a la manipulación de los testigos.

- Fallas

Las fracturas con desplazamiento que frecuentemente aparecen en los macizos de pizarra, hacen imposible su aprovechamiento en las zonas afectadas.

- Laminaciones arenosas

Son los niveles sedimentarios arenosos que cortan los planos de esquistosidad según la dirección de la estratificación, y que afectan negativamente a la fisilidad de la roca. Así una pizarra de grano fino (inferior a 25 μm) en la que quedan restos de laminaciones arenosas se hiende peor que otra pizarra de grano grueso (de 50 a 75 μm) de textura equigranular homogénea.

- Bandas de esquistosidad de crenulación

Esta esquistosidad, diferente a la de plano axial, se superpone a la esquistosidad principal, aumentando la rugosidad de las superficies de exfoliación de la pizarra y disminuyendo rápidamente su fisilidad, siendo desfavorable la explotación de la pizarra para cubiertas.

La crenulación leve se conoce en el argot minero como panilla y la muy penetrativa como rayela.

- Diaclasas

Los macizos de pizarra están surcados por una red de fracturas sin desplazamiento que, dependiendo de su intensidad, permite o no el aprovechamiento minero.

- Microfracturas

Son las fracturas de menor tamaño, apenas perceptibles a la vista, pero que pueden ocasionar la rotura de placas de espesor comprendido entre 3 y 5 mm.

- Kink-bands

Son micropliegues originados por deformaciones tardías del movimiento hercínico, muy frecuentes en la pizarra, que pueden condicionar su explotabilidad si su número es alto. En el argot minero se denominan bregadas.



Fig. 2: Banco de arranque
Fig. 2: Extraction bank

Métodos de caracterización de la pizarra

Sondeos

Debido a que los yacimientos de pizarra en afloramiento suelen estar afectados de una intensa alteración, para caracterizarlos no queda más remedio que

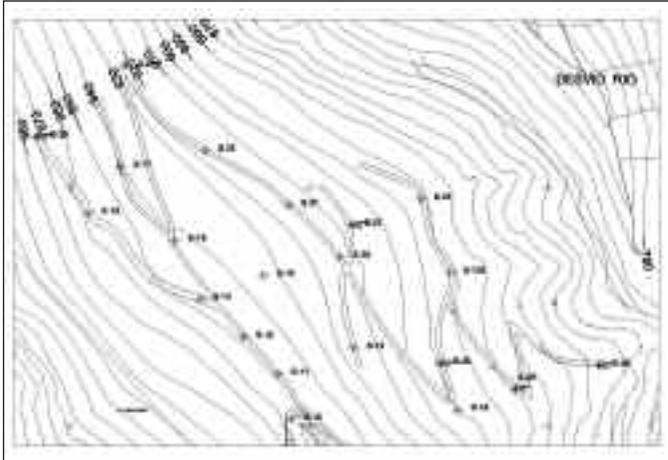


Fig. 3: Campaña de sondeos realizados en el yacimiento
Fig. 3: Drillings campaign carried out in the deposit

realizar sondeos de testigo continuo que permiten un análisis estructural del macizo sano, ya que los métodos indirectos de investigación profunda, como la geofísica, no diferencian las zonas explotables de las no explotables.

Para prospectar el yacimiento compuesto por piza-

rras de la Formación Agüeira, miembro medio-superior, situado en el sinclinal de Truchas, en la provincia de León, se realizó una campaña de diez sondeos mecánicos con recuperación continua de testigo (Fig. 3).

Por medio de la realización de los sondeos se pueden apreciar en profundidad parámetros que influyen en la determinación de la calidad de la pizarra y que a simple vista no se pueden analizar. La ubicación de los sondeos corresponde a sitios estratégicos y bien estudiados con anterioridad, según la estructura geológica del yacimiento de pizarra.

Todos los sondeos han sido inclinados debido fundamentalmente a la presencia de abundantes bandas de cizalla con cuarzos e intensas crenulaciones asociadas, que presentan una inclinación subparalela a la esquistosidad principal (S_1) de unos $70-80^\circ$ de inclinación por lo que, para evitar la realización de sondeos a lo largo de estas bandas, para determinar de modo aproximado el espaciado entre ellas y para cortar la serie, se decidió realizar la mayoría de los sondeos con una inclinación entre 45 y 60° y dirección NNE. La S_1 de los sondeos realizados presenta secciones elípticas claras, por lo que, dado el conocimiento de la dirección y buzamiento de la S_1 en el área sondeada, la orientación espacial de los testigos obtenidos no ofrece mayores problemas.

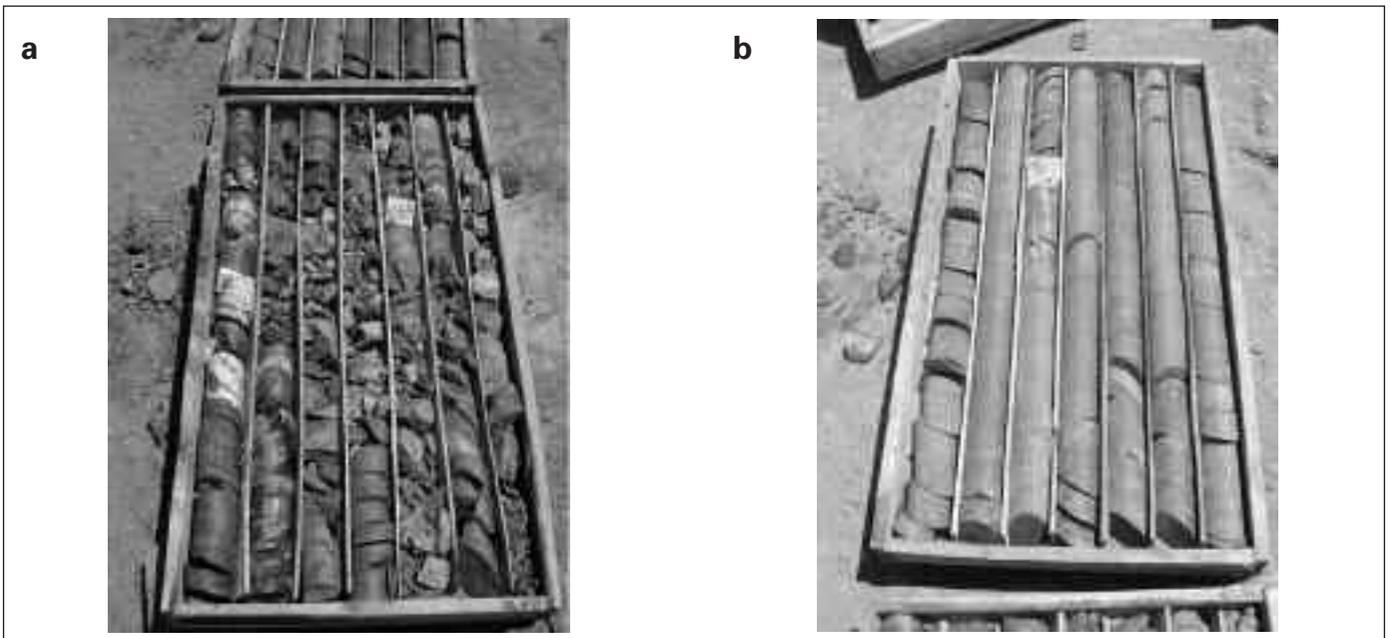


Fig. 4: a) testigos continuos muy fragmentados b) testigos continuos en buen estado
Fig. 4: a) continuous control very fragmented b) continuous control in good condition

Testificación de sondeos

Para testificar los sondeos se ha prestado especial atención a una serie de factores que determinan la explotabilidad potencial de los diferentes niveles de pizarra sondeados, y que pueden agruparse en dos (Fig. 4):

- Aspectos litológicos

En la mayor parte de los sondeos realizados, se atraviesan unos primeros metros correspondientes a los materiales terciarios, en los que se observan cantos de naturaleza silíceas embebidos en una matriz generalmente limo-arenosa.

Todos los sondeos realizados presentan una importante alteración, cuya profundidad varía entre 15 y 20 m. Esta alteración va a estar controlada por la presencia de discontinuidades estructurales, es decir, fracturas, diaclasas y, de forma secundaria, planos de esquistosidad (S_1 y S_3); todas ellas van a permitir la circulación de fluidos (agua y aire) a través del macizo rocoso, generando procesos de oxidación y lavado. La alteración se manifiesta muy claramente en las pizarras, por la presencia de pátinas de óxidos de hierro y procesos de decoloración debidos al lavado de los minerales arcillosos constituyentes.

Por debajo de los terciarios, y en discordancia con ellos, aparecen unos primeros metros de pizarras con tonos de alteración asalmonados. Estos colores de alteración son relictos de una antigua superficie erosiva expuesta a condiciones subaéreas en un ambiente de semiárido a árido.

En ocasiones, los procesos de meteorización son tan intensos que dan lugar a la presencia de niveles de arcillas y gravas que constituyen auténticos rellenos de alteración.

- Aspectos estructurales

Se realizan análisis de las estructuras sondeadas, determinando la presencia de pliegues, la posición de los niveles de pizarra explotable dentro de los pliegues, la presencia de fracturas y diaclasas, etc. El análisis de las laminaciones arenosas que se observan en los testigos nos permite determinar la estructura del área sondeada. De un primer análisis estructural de las columnas de sondeos se puede observar que en la mayoría de los casos se trata de un flanco normal ascendente hacia el NE, con unos buzamientos de la estratificación ligeramente inferiores a los de la esquistosidad, confirmando así las expectativas de cortar serie de techo a muro, con unas potencias más aproximadas a las reales que si los sondeos fuesen verticales.

Por otro lado, en el área del Permiso se observan abundantes bandas de crenulación, que en la

mayor parte de los casos son casi horizontales. Estas crenulaciones en su intersección con los planos de esquistosidad dan lugar a una lineación (L_3) denominada *panilla* en el argot minero. La presencia de estos defectos impide el labrado de la pizarra, limitando en gran medida su explotabilidad.

Tras tener en cuenta todo lo anterior, definiremos los pasos a realizar para la toma de datos de los testigos: en primer lugar nos detendremos en determinar la explotabilidad de la pizarra, y para ello determinaremos una serie de parámetros que con su presencia determinan el no aprovechamiento comercial de la pizarra:

- RQD
- Venas de cuarzo
- Rellenos Terciarios
- Fracturas
- Fallas
- Esquistosidad de crenulación muy marcada (rayela)
- Kink bands (bregadas)
- Alteración
- Laminaciones arenosas
- Cuarzita
- Oxidación

Una vez determinadas las muestras que sí son explotables, no pararemos ahí nuestra clasificación, ya que a pesar de que pueda ser explotable por la no existencia de grandes factores, como una falla o venas de cuarzo, estas mismas características, u otras a menor escala, repercuten en la calidad de la pizarra lo que conlleva a que una pizarra explotable inicialmente pueda tener distintas calidades, con la consiguiente repercusión económica sobre el precio de dichas pizarras, o incluso que no sea aprovechable. Para esta segunda toma de datos analizamos los siguiente parámetros:

- Nudos
- Venillas de cuarzo
- Crenulación débil (panilla)
- Microbregada
- Pizarra torcida
- Laminaciones arenosas
- Microfracturas
- Pirita
- Oxidación
- Pizarra poco fisible (brava en el argot minero)
- Pizarra blanda

Ambos estudios se realizaron tomando una muestra de testigo cada 50 centímetros, excepto el RQD, que vendrá definido por tramos homogéneamente fracturados.

Determinación de la calidad mediante análisis multivariante

Cada una de las variables consideradas está caracterizada por su dispersión global, medible a través de la varianza, y por su dispersión en cada una de las clases o agrupaciones de calidad establecidas, que en este caso son: primera calidad, segunda calidad y desechable. Para cada variable es posible considerar, frente a la dispersión global, la dispersión en cada una de las clases, y el promedio de éstas, que podemos denominar dispersión interna. Asimismo, existe una dispersión externa a las clases, determinada por los valores medios de la variable en las distintas clases y su distancia a la media global. Se verifica:

$$\text{Varianza global} = \text{Varianza interna} + \text{Varianza externa}$$

Cuando las clases están claramente identificadas, sin solapamientos, los elementos de cada clase estarán más próximos al centro de su clase que a los de las restantes, y la varianza interna será pequeña. Por el contrario, una varianza interna grande frente a la varianza externa representa una mala definición de las clases, y por lo tanto una gran dificultad en la asignación de los elementos (o identificación de la calidad).

Esta división de la dispersión (o de la varianza) en interna y externa, que aparece en múltiples procedimientos estadísticos de uso habitual (Análisis de la Varianza, Análisis Discriminante, etc), es válida para cualquier variable disponible, y también lo es para cualquier combinación lineal de las variables utilizadas. Consideremos la combinación lineal que minimiza la varianza interna, lo que es equivalente a maximizar la varianza externa, dado que la dispersión global es constante. Tal combinación lineal tiene la interesante propiedad de agrupar con la mínima dispersión a los elementos de cada una de las clases (o niveles de calidad), siendo máxima la separación entre clases. Es por lo tanto una variable adecuada para ser utilizada como índice de calidad, ya que tomará valores similares para muestras de la misma calidad, y distintos para muestras de diferentes niveles de calidad.

Con criterios técnicos, y a partir de los valores de las variables estudiadas en los testigos, se estableció el nivel de calidad asignado a cada una de las muestras de pizarra: primera calidad, segunda o desechable.

Se consideran de primera calidad las muestras que no tienen ningún defecto, ni geotécnico ni estético, y que constituirán placas vendibles de primera calidad en el mercado.

Las muestras de segunda calidad son las que tienen algún defecto, pero no los suficientes para no ser comerciales. Las placas fabricadas con estas características serán clasificadas como de segunda calidad, con un precio de mercado inferior a las de primera calidad.

Por último, son muestras desechables las que tienen defectos de tal importancia que no pueden constituir placas de cubierta aceptadas en el mercado.

En nuestro caso las variables cuantitativas independientes o explicativas son nudos, venillas de cuarzo, panilla, bregada, torcida, laminaciones arenosas, microfracturas, piritita, y oxidación mientras que la variable cualitativa dependiente o clasificativa es la calidad y pretendemos explicar la pertenencia de cada caso de los sondeos a uno u otro grupo de calidades, y comprobar su pertenencia o no al grupo preestablecido, intentando conseguir una variable cualitativa continua que modifique los datos de calidad actuales sustituyendo los valores de calidad primera (1), calidad segunda (2) y calidad no válida (3), por tres tramos que varíen entre 1 y 3. Además cuantificaremos el peso de cada una de las variables cuantitativas en la discriminación.

Con el proceso de datos obtenemos las dos funciones discriminantes canónicas en el análisis, definiendo cuantos casos son capaces de explicar cada una de las funciones escogidas. La finalidad de las funciones discriminantes es la de crear subespacios, en el espacio muestral de datos, que separen de forma óptima los grupos de calidad previamente establecidos. Si además se trabaja con variables

	Función	
	1	2
Nudos	1.298	-0.953
Venillas de cuarzo	1.947	0.176
Panilla	3.377	0.130
Torcida	3.747	-3.456
Laminaciones arenosas	3.303	1.622
Microfracturas	2.466	1.384
Piritita	3.918	-0.195
Pizarra Brava	3.122	5.098
Pizarra Blanda	3.560	2.366
Constante	-2.653	-0.187

Tabla 1. Funciones discriminantes
Table 1. Discriminate functions

			Grupo de pertenencia pronosticado		
			1	2	3
Original	Recuento	1	61	0	0
		2	0	45	2
		3	0	1	30
%		1	100.0	0.0	0.0
		2	0.0	95.7	4.3
		3	0.0	3.2	96.8

Tabla 2. Comprobación de resultados del análisis de calidad
 Table 2. Verification of results of the quality analysis

estandarizadas puede obtenerse la información adicional de cuáles son las variables que poseen mayor peso a la hora de clasificar en uno u otro grupo de calidad. Esto es así ya que los mayores valores de los coeficientes estandarizados señalan las variables determinantes en la clasificación. La primera función discriminante explica el 98.8% de los datos, mientras que la segunda el 1.2% de estos. Como podemos observar entre las dos explican el 100% de los casos, aunque quedándonos sólo con la primera de ellas casi podemos explicar o definir todos ellos (Ver Tabla 1).

El siguiente paso consistirá en comprobar la coincidencia entre la calidad de entrada y la obtenida (Tabla 2).

Como ya habíamos determinado con los valores de salida de la calidad, los grupos de pertenencia pronosticado coinciden con los originales casi al cien por cien, exceptuando tres casos.

Distribución de los valores del índice de calidad

Una vez determinados los valores del índice de calidad para cada testigo de los sondeos considerados y en base a los criterios ya mencionados, estamos interesados ahora en obtener estimaciones del índice en puntos no observados. Para esto utilizamos técnicas geoestadísticas, que son un conjunto de técnicas estadísticas que, al permitir un tratamiento direccional de los parámetros y la obtención de variogramas, se utilizan para determinar el comportamiento de un fenómeno natural en general.

Mediante el formalismo de funciones aleatorias podemos caracterizar entonces un fenómeno natural de interés, como puede ser el caso del índice de calidad, lo que conduce a varios tipos de aplicaciones.

Uno de los más importantes es la estimación, utilizando nuevamente metodología estadística. En la estimación se trata de aproximar el posible valor del fenómeno en estudio en puntos donde, por alguna razón, no se ha podido observar la variable de interés utilizando para ello el conjunto de medidas realizadas sobre los distintos soportes. La Geoestadística permite obtener además una medida de incertidumbre que nos indica la fiabilidad de las estimaciones obtenidas a partir de las mediciones.

La primera de las dos fases que completan el estudio geoestadístico, en el cual se modeliza la estructura espacial del fenómeno o variable de interés, se lleva a cabo ajustando el denominado semivariograma muestral, construido a partir del conjunto de medidas, a una función teórica llamado semivariograma teórico.

En una segunda fase se extrapolan los valores de la variable de interés, utilizando para ello alguna combinación lineal de las observaciones que garantice una medida de error cometido mínima.

Así pues, en un primer estudio analizamos el comportamiento espacial del índice de calidad a medida que profundizamos en cada uno de los sondeos. Para esto calculamos el semivariograma experimental

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (Q(x_i + h) - Q(x_i))^2$$

donde Q es el valor de calidad, x_i representa cada uno de los puntos en los que hemos calculado ese valor de Q y $n(h)$ es el número de observaciones disponibles que se encuentren a una distancia fija según un vector h. Esta función así calculada nos indica la variabilidad del índice Q a medida que profundizamos una distancia h en el sondeo.

El semivariograma experimental debe ajustarse ahora a una función continua denominada semivariograma teórico (Journel y Posa, 1990)

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Q(x+h) - Q(x))^2]$$

que será la que, en cálculos sucesivos, utilizaremos como función que represente el comportamiento espacial de la calidad.

Utilizando el método de ajuste por mínimos cuadrados encontramos la curva que mejor se ajusta al semivariograma experimental, que, en el caso que nos ocupa es la de la Figura 5.

A continuación realizamos una estimación utilizando técnicas de kriging tridimensional sobre la calidad del nivel pizarroso donde se encontraban los sondeos estudiados (García Pereira, 1994).

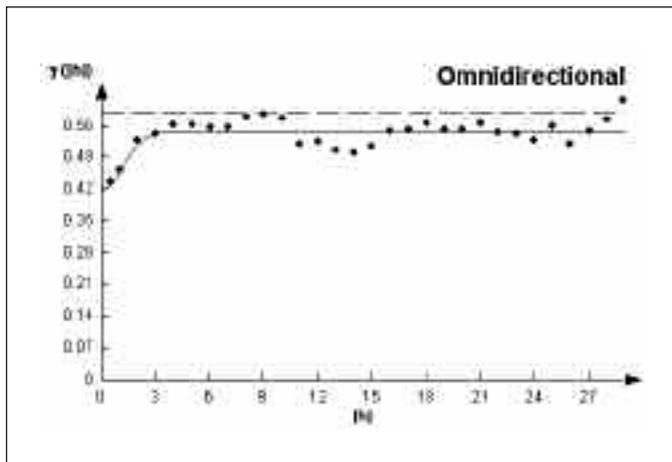


Fig. 5: Semivariograma experimental y teórico
Fig. 5: Experimental and theoretical semivariogramme

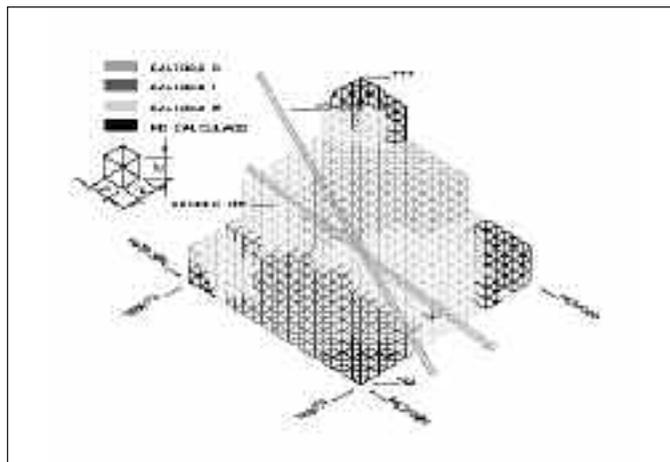


Fig. 6: Mapa de calidad de una zona del yacimiento
Fig. 6: Quality map of a region of deposit

En primer lugar, definimos un bloque unitario del yacimiento de lado 2 m, que será el soporte para nuestro análisis de calidad. Cada uno de los bloques será caracterizado por un valor de calidad, obteniéndose los mapas tridimensionales de calidad del yacimiento (Figura 6).

Conclusiones

A lo largo del artículo hemos utilizado algunas de las herramientas que nos aporta el Análisis Discriminante y la Geoestadística para modelizar, con resultados positivos, la capa productiva de un yacimiento de pizarra. Estas técnicas son ampliamente utilizadas y están sólidamente consolidadas en varios sectores de la minería..., pero todavía no se aplican de manera efectiva en la minería de las rocas ornamentales, y particularmente en la extracción de las pizarras de techar.

La peculiaridad de este tipo de explotaciones en las que se establecen las "leyes" de una forma visual y más bien cualitativa (bueno o malo, mejor o peor dentro de lo bueno); la dificultad de cuantificar en resultados concretos la combinación de la gran cantidad de factores que influyen en la calidad final de la pizarra; la dificultad de estimar los rendimientos medios de manera fiable hasta que la operación no está puesta en marcha; todas éstas pueden ser algunas de las causas de este retraso.

Técnicamente podemos concluir que:

- La evaluación de yacimientos de pizarra debe hacerse a partir de la testificación de sondeos de testigo continuo.

- La geoestadística permite estimar los recursos de pizarra si la malla de sondeos es lo suficientemente cerrada.
- Los paquetes informáticos y las técnicas de estimación que se emplean en yacimientos de las minerías clásicas (metálica y energética) son aplicables a las rocas ornamentales y especialmente a la pizarra, si tenemos en cuenta sus especificaciones particulares.
- Los modelos obtenidos se ajustan a los resultados reales de la cantera.

Referencias

- García-Guinea, J., Lombardero, M., Roberts, B. y Taboada, J., Peto, A. 1998. Mineralogía y microestructura de la pizarra de techar: comportamiento termoóptico y fisilidad. *Materiales de construcción*, 48, 251. 37-48. Madrid.
- García Pereira, H. 1994. Cálculo Geoestadístico de Reservas em Economia Mineira. *Geosistemas*, 3, 89-93. Lisboa.
- González, C., Ordieres, J.B., Menéndez, A. and Taboada J. 1994. Optimizing of Stripping in a Slate Bank. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 8, 17-22.
- Journel, A. and Posa, D. 1990. Characteristic Behaviour and Order Relations for Indicator Variograms. *Mathematical Geology*, 22 (8), 1011-1025.
- Taboada, J., Vaamonde, A., Saavedra, A. and Alejano, L. 1997. Application of geostatistical techniques to exploitation planning in slate quarries. *Engineering Geology*, 47, 269-277. Amsterdam.
- Taboada, J., Saavedra, A., and Vaamonde, A. 2001. Evaluation of a slate extraction bank. London. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A: Min. Technol.)*, 110, 40-46.

Recibido: Julio 2005

Aceptado: Agosto 2006