

# ESTUDIOS GEOLÓGICOS



**ESTUDIO ESTABILIDAD DE TALUDES  
TALUD 2  
CANTERA COMA DE S'AIGUA, (CAMPANET)  
Exp. 1304/06**

## INDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. GEOLOGÍA</b> .....	4
2.1 GEOMORFOLOGÍA .....	4
2.2 LITOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA .....	5
2.2.1 Marco geológico regional .....	5
2.2.2 Materiales constituyentes del talud.....	7
2.3 HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA.....	8
2.3.1 Climatología.....	8
2.3.2. Marco hidrológico e hidrogeológico regional.....	9
2.3.3. Hidrología e hidrogeología local.....	11
<b>3. TECTÓNICA</b> .....	13
3.1 Tectónica regional.....	13
3.1 Tectónica local .....	14
<b>4. SISMICIDAD</b> .....	15
<b>5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TALUD</b> .....	17
5.1 Características geométricas.....	17
5.2 Parámetros resistentes de los materiales.....	17
5.2.1 Matriz rocosa.....	17
5.2.2 Discontinuidades.....	18
<b>6. INESTABILIDAD DEL TALUD</b> .....	20
6.1 Tipología de las inestabilidades y causas potenciales de inestabilidad.....	20
6.2 Análisis de las inestabilidades.....	24
<b>7. RECOMENDACIONES SOBRE EL TALUD</b> .....	39
<b>8. ANEXO (figuras)</b> .....	43

**ESTUDIO ESTABILIDAD DE TALUDES**  
**TALUD 2**  
**CANTERA COMA DE S'AIGUA (CAMPANET)**  
**Exp. 1304/06**

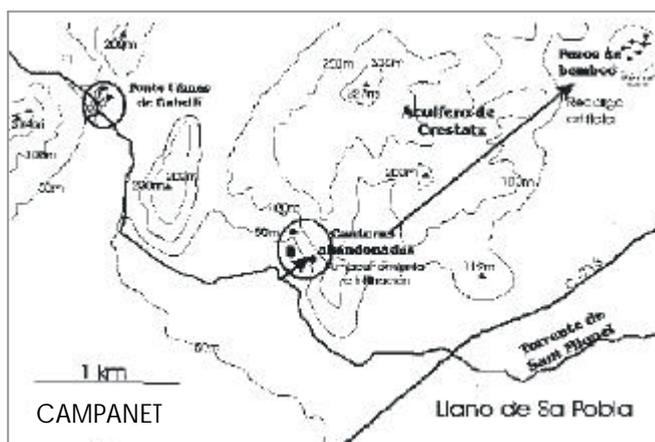
**1. INTRODUCCIÓN**

INCISA, como empresa encargada del proyecto de recarga artificial del acuífero de Crestax, ha solicitado la realización de un estudio de estabilidad del talud derecho de la cantera inactiva de Coma de S'aigua (talud 2), perteneciente al Término Municipal de Campanet.

Dicho proyecto contempla la realización de una serie de construcciones destinadas a la recogida, canalización, embalse y redistribución de agua, que será la que conforme la recarga artificial del acuífero citado, aprovechando el exceso de caudal drenado a través del torrente de Sant Miguel cuando entran en funcionamiento las Fonts Ufanes de Gabellí.

La captación de parte del caudal drenado por el torrente de Sant Miguel se realizará mediante un azud que derivará dicha agua hacia una zona de embalse cercana: la cantera de Coma de S'Aigua. Se trata de una antigua cantera de áridos, inactiva en la actualidad, con una capacidad de almacenamiento de 150.000 m<sup>3</sup>.

Esta cantera actuará de instalación auxiliar de sedimentación y almacenamiento temporal, recargando de forma natural, a través de las fisuras del terreno, los acuíferos colindantes y mediante pozos ejecutados para tal fin, el acuífero de Crestax. Así se aprovecharían en torno a 1,0 – 1,5 hm<sup>3</sup>/a del excedente de las Fonts Ufanes.



El objeto de este estudio es determinar la estabilidad del talud que conforma el margen derecho de la cantera ya que podrían afectar a un camino de acceso perteneciente a una finca privada colindante.

Para llevar a cabo el presente estudio se han realizado los siguientes trabajos:

## 1) RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE.

Bibliografía consultada:

- Dirección general del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente. *Valores normales y estadísticos de observatorios meteorológicos principales (1971-2000) Vol.3 Cataluña, Valencia, Murcia e Illes Balears*. Madrid 2002.
- Dirección general del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente. *Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus periodos de retorno en España. Un estudio por regiones. Vol.13 Baleares*. Madrid 2002.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. *Mapa geológico de España, escala 1:50.000 Hoja 671 39-26 Inca*. Madrid 1991.
- Govern Balear. Conselleria d'Obres Públiques, ordenació del territori i medi ambient. Junta d'Aigües. *Pla hidrològic de les Illes Balears, B.O.I.B. nº 77 del 27 de junio de 2002*.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. Calidad química y contaminación de las aguas subterráneas en España, Período 1982 – 1993. Cuenca de Baleares.
- Publicación del IGME: Las Fonts Ufanes de Gabellí (Mallorca): Propuestas para su aprovechamiento.
- Cartografía Geológica de la zona de Crestax (Mallorca). Bernardí Gelabert Ferrer. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. (Marzo 2006).
- Sismicidad inducida por embalses. –Una aproximación al estado del conocimiento-. Miguel Herraiz Sarachaga. Doctor en Ciencias Físicas. (Marzo-Abril, 2005)

## 2) ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE ENTORNO

Realizada una visita a la zona y, ayudándose de la información consultada, se han valorado los parámetros de entorno: climatología de la zona, tectónica, geomorfología regional, hidrogeología, sismicidad.

## 3) INSPECCIÓN VISUAL DE LOS TALUDES Y EJECUCIÓN DE ESTACIONES GEOMECAÑICAS

Se llevaron a cabo cinco estaciones geomecánicas, con medida de discontinuidades mediante brújula inclinométrica. Para cada familia de discontinuidades se han medido la dirección de buzamiento, el buzamiento, el espaciado, la continuidad, apertura, rugosidad, resistencia y espesor de los rellenos, y se ha realizado una valoración de las filtraciones.

#### 4) REALIZACIÓN DE ENSAYOS IN SITU Y DE LABORATORIO

En cada una de las estaciones geomecánicas realizadas se han tomado varias medidas de la resistencia de los materiales con la ayuda de un esclerómetro.

Además se tomó una muestra representativa del material de la matriz del macizo rocoso y se llevó a laboratorio homologado para determinar su densidad.

#### 5) MEDIDAS DEL NIVEL FREÁTICO

El nivel se sitúa generalmente a cota del nivel de base de la cantera, siendo frecuente su inundación en periodos húmedos.

#### 6) VALORACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE LOS TALUDES

Con los resultados de los ensayos de campo y de laboratorio, así como con los datos recogidos in situ, se han valorado todas aquellas causas tanto extrínsecas como intrínsecas al talud que pueden intervenir en los procesos de inestabilidad.

#### 7) MEDIDAS CORRECTORAS Y/O PROTECTORAS

Una vez conocidas las posibles causas, se ha procedido a recomendar una serie de medidas correctoras y protectoras para el talud.

## 2. GEOLOGÍA

### 2.1 GEOMORFOLOGÍA

La zona en estudio se encuentra justo en la zona límite de dos dominios geomorfológicos definidos por la acción de los fenómenos erosivos sobre materiales de diferente litología y configuración estructural.

Así, por un lado se define la Unidad geomorfológica y estructural de la Sierra Norte, ocupada por afloramientos de sedimentos calizos fundamentalmente mesozoicos (a los que pertenece la litología de los materiales de la cantera), y por otro lado la Unidad geomorfológica y estructural del Llano Central, constituida fundamentalmente por sedimentos neógenos y cuaternarios en disposición subhorizontal.

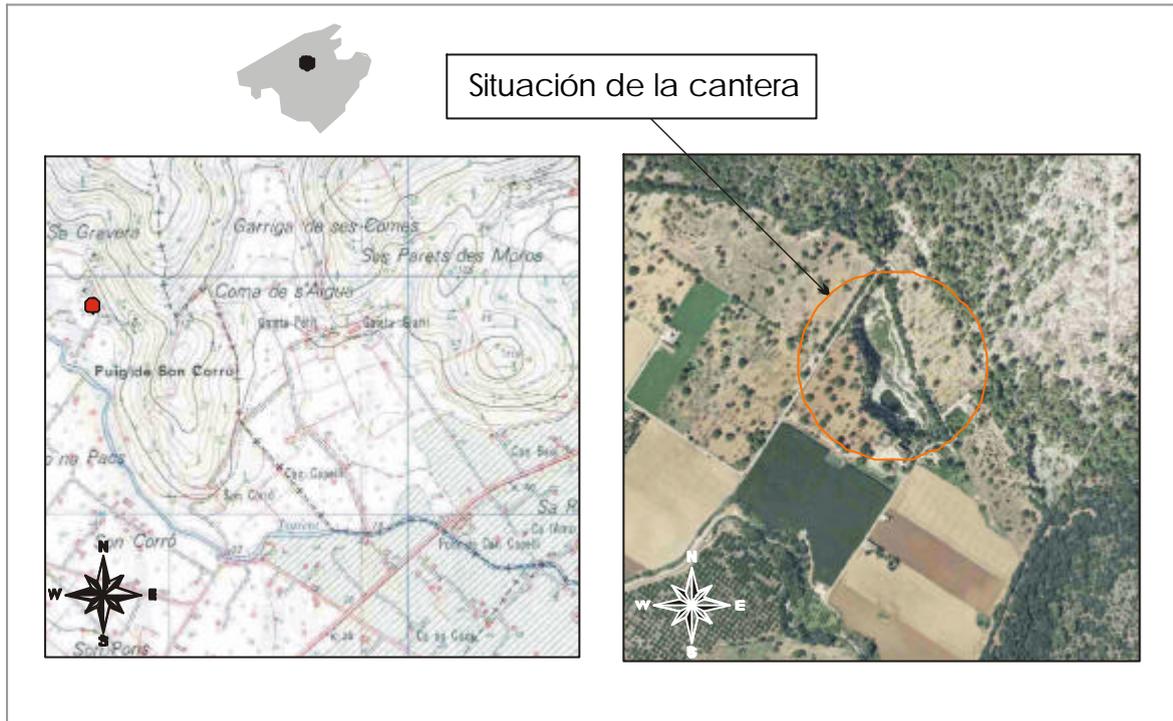
La Unidad de la Sierra Norte se caracteriza por un relieve muy accidentado en el que predominan las alineaciones montañosas de dirección NE-SW. Sus sedimentos constituyentes están afectados por una fuerte tectónica de imbricación y originan relieves escarpados, con crestas agudas. Los ejes de las fallas principales tienen dirección NE-SW, y con frecuencia delimitan escarpes que separan diferentes litologías. El claro predominio de materiales muy buzantes, contrasta con los materiales de la unidad del Llano Central, caracterizados por sedimentos de colmatación de cuenca, con clara tendencia subhorizontal.

El área donde se localiza la cantera, marca el límite entre la zona de relieves importantes que continúan en dirección NO hacia los grandes relieves de la Sierra de la Tramuntana, (Puig de Sant Miquel, Puig Blanc, Puig de Son Corro, etc), con la zona llana que se extiende al NE hacia la bahía de Alcudia, donde se localizan depósitos lagunares de marismas e importantes cordones de dunas eólicas.

La cota superior de la cantera varía en torno a los 60,0 m s.n.m. mientras que el fondo de la misma se sitúa a una cota en torno a los 35,0 m s.n.m. La cantera está disimulada en el paisaje ya que no se sitúa en promontorio alguno. Su forma geométrica es más o menos ovalada, con su eje mayor rumbo S-N aproximadamente.

En el interior de la cantera existen dos niveles: de los 35,0 m aproximadamente (fondo de la cantera) hasta los 47,5 m, y desde esta altura hasta los 60,0 m (cabecera superior del talud). Así, el lateral derecho queda dividido en dos tramos de altura diferente, mientras que el lateral izquierdo de la cantera mantiene un único desnivel de la cabecera hasta el fondo de la misma.

Diversas acumulaciones de materiales desprendidos de las paredes, modifican localmente la fisonomía del relieve interno de la cantera.



## 2.2 LITOLOGÍA Y ESTRATIGRAFÍA

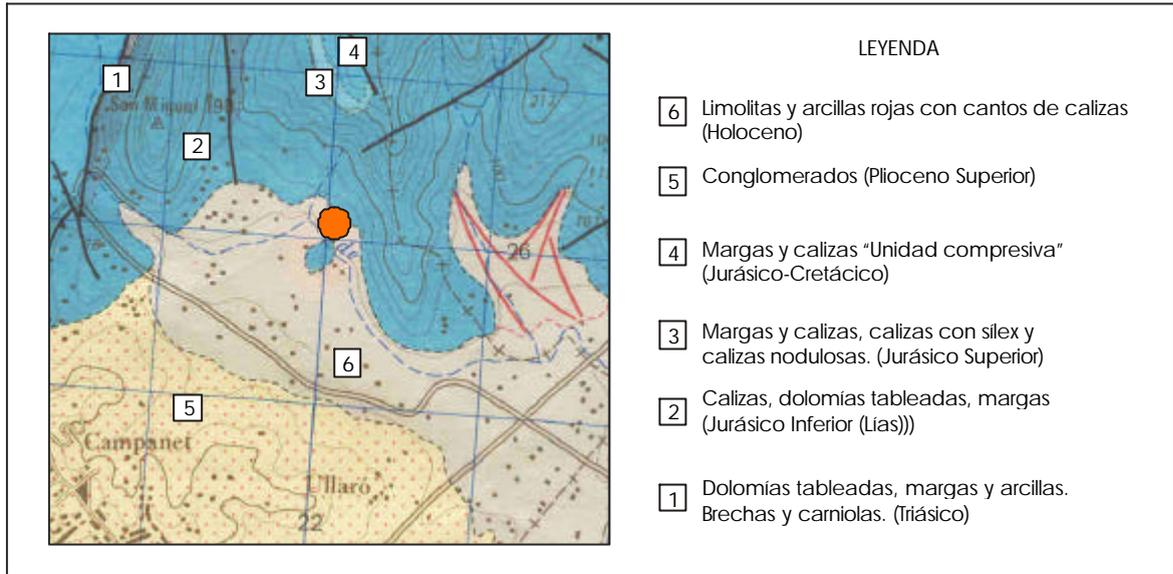
### 2.2.1 Marco geológico regional<sup>1</sup>

Según el mapa geológico 1:50.000, los alrededores de la zona de estudio se caracterizan por la presencia de las unidades geológicas que se describen a continuación:

- 1- Unidad de Dolomías tableadas, margas y arcillas. Brechas y carniolas (Triásico): Esta unidad cartográfica aflora a modo de estrechas bandas de dirección noreste-suroeste y constituyen la parte inferior de los fuertes escarpes que forman las calizas liásicas que se sitúan inmediatamente por encima. Sus afloramientos están directamente relacionados con los frentes de cabalgamientos primarios y secundarios que afectan a esta unidad. Esta unidad está constituida por una alternancia regular de dolomías grises y rojizas y de limolitas y arcillas limolíticas verdes y rojas. Su espesor medio oscila en torno a los 100 m.
- 2- Unidad de calizas, dolomías tableadas y margas (jurásico inferior: Lías): Esta unidad está constituida por dos unidades litoestratigráficas. La unidad litoestratigráfica superior está formada por calizas bien estratificadas y dolomías con variadas texturas organizadas en secuencias granodecipientes somerizantes. La unidad litoestratigráfica inferior está constituida por brechas de calizas dolomíticas y dolomías en brechas poligénicas dolomíticas con matriz carbonática de especto masivo. (A esta unidad pertenecen los materiales constituyentes de la cantera).
- 3- Unidad de Margas y Calizas, Calizas con sílex y Calizas nodulosas (Jurásico superior): Esta unidad está formada por varias unidades litoestratigráficas: Margas gris amarillentas de unos 50 m de espesor. Tramo de areniscas y microconglomerados cuarcíticos con estratificación cruzada y secuencias granocrecientes, con un espesor en torno a los 20 m. Calizas y margocalizas crinoideas, con un espesor en torno a los 50 m. Margas y margas calcáreas de espesor difícil de determinar, con calizas nodulosas de color rojizo a techo.
- 4- Unidad de Margas y Calizas “Unidad compresiva” (Jurásico-Cretácico): Alternancia de calizas arcillosas grises y margas negras con abundante fauna de ammonites piritosos.
- 5- Unidad de Conglomerados (Plioceno Superior): Son conglomerados de cantos y bolos de calizas y de materiales del terciario, con una matriz arenosa entre los que intercalan niveles de limolitas y arcillas limolíticas rojas.
- 6- Unidad de limolitas y arcillas rojas con cantos de calizas (Holoceno): Son gravas y bolos de calizas en una matriz de limos y arcillas limolíticas rojas con distintos niveles de encostramiento.

---

<sup>1</sup> Según Hoja 671 39-26 del Mapa Geológico de España (E 1:50.000), publicado por el ITGE (1991)



### **2.2.2 Materiales constituyentes del talud**

Desde la superficie y hasta una profundidad muy variable de unos lugares a otros aparece un suelo vegetal consistente en arcillas rojas con gravas y bolos, con abundantes restos vegetales. El espesor observado en las paredes del talud varía de 0,5 a 1,0 m.

Debajo existe un depósito aluvial constituido por unos limos y arcillas limolíticas de tonalidades anaranjadas, en una matriz limosa, de carácter matriz soportada pero con intenso grado de encostramiento. El espesor observado es muy variable de unos puntos a otros, manteniendo un espesor medio de unos 50 cm.

Los materiales predominantes, motivo de explotación de la cantera, están constituidos por dolomías y brechas dolomíticas, de color grisáceo, altamente fracturadas, y con alteración en discontinuidades. Son depósitos pertenecientes al Lías (Jurásico inferior).

Aunque no es posible discernir con claridad en los afloramientos el buzamiento de las capas se intuye un buzamiento medio de 40° a 60° hacia el SSE, según los datos obtenidos a partir de las mediciones realizadas en el campo y que se comentarán en un apartado posterior.

El macizo rocoso ha sufrido una intensa tectonización que ha favorecido la utilización de los materiales extraídos para áridos en la construcción.

## 2.3 HIDROLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

### 2.3.1 Climatología

El clima de Mallorca es mediterráneo, templado, con temperaturas medias anuales próximas a los 17° C. Estas temperaturas varían sensiblemente de las zonas más altas de la Sierra Norte, con una temperatura media anual de 13,6° C y nieve en invierno, a las zonas más cálidas en los alrededores de Palma. Estas diferencias se mantienen durante todo el año, siendo el mes más frío el de enero, con una temperatura media de 11° C y el más cálido el de agosto, con 24° C.

La precipitación media anual en el conjunto de la isla es de 625 mm, siendo la Sierra Norte la que mayor parte recoge, sobrepasándose los 1400 mm en el Puig Major y los 800 mm en buena parte de la Sierra. Desde la sierra las precipitaciones disminuyen en cualquier sentido hasta los 500 mm de las zonas de Andratx y Formentor y los 400 mm del Cabo Salinas. El mes más lluvioso es octubre y el más seco julio. La precipitación media caída sobre la isla es de 2.275 hm<sup>3</sup>/año, muy desigualmente repartida en el tiempo y en el espacio.

En los cuadros siguientes se presentan los valores extremos de precipitaciones máximas producidas en 24 horas con sus distintos periodos de retorno, correspondientes a la estación pluviométrica B-696 Campanet “Biniatro” (Longitud: 02° 58' E, Latitud: 39° 49' N, Altitud: 120 m).

**B-696 Campanet “Biniatro”** (en base al periodo 1.965/1.990)

Valor esperado (mm)	Periodo de retorno (años)	INTERVALO DE CONFIANZA (mm)		
		Nivel de confianza 95%	Nivel de confianza 90%	Nivel de confianza 80%
90,1	2	14,5	12,2	9,5
132,1	5	26,5	22,3	17,4
160,0	10	36,7	30,8	24,0
195,2	25	50,2	42,1	32,8
221,2	50	60,4	50,7	39,5
236,4	75	66,4	55,7	43,4
247,1	100	70,6	59,3	46,2
281,2	250	84,2	70,6	55,1
307,0	500	94,4	79,3	61,8

### 2.3.2 Marco hidrológico e hidrogeológico regional

No existe en la isla prácticamente ningún curso permanente de agua debido a que las aportaciones superficiales corresponden a zonas montañosas con altas pluviometrías y descargas rápidas al mar. A causa de la permeabilidad de los terrenos de superficie, los torrentes sólo reciben aportaciones importantes cuando las precipitaciones son de una gran intensidad horaria.

Los recursos naturales para la isla de Mallorca se han evaluado en las siguientes cantidades (Según el Plan Hidrológico de las Islas Baleares, 1996): 120 hm<sup>3</sup>/año, de escorrentía superficial (medida en estaciones de aforo), que son vertidos al mar y 360 hm<sup>3</sup>/año de caudal subterráneo (medidos a partir de las infiltraciones directas del agua de lluvia y las que se producen en los cauces superficiales). De estos recursos sólo 250 hm<sup>3</sup>/año es el volumen que actualmente se puede extraer para la isla de Mallorca, tanto de acuíferos como de torrentes, sin provocar problemas de sobreexplotación.

De las unidades hidrogeológicas existentes en la Isla de Mallorca, las afectadas por el proyecto van a ser la unidad 18.11 denominada Plá de Inca-Sa Pobra y la unidad 18.10 denominada Ufanés.

#### *Unidad Hidrogeológica de Plá de Inca-Sa pobra:*

Esta unidad posee una superficie de 415 km<sup>2</sup>, correspondiendo aproximadamente 100 km<sup>2</sup> a materiales margosos impermeables. La superficie restante, 315 km<sup>2</sup>, está constituida por afloramientos carbonatados (calizas y dolomías) y detríticos semipermeables y permeables.

Al NE limita con el mar, al SE con las unidades Sierras Centrales y la Marineta, al SW con el Llano de Palma y al N y NW con la Sierra de Tramuntana (unidades Formentor, Almadrava, Ufanés, Alaró y S'Estremera). Todos estos límites son básicamente impermeables, si bien pueden existir zonas de cierta permeabilidad.

En esta unidad pueden diferenciarse tres niveles acuíferos: el acuífero Plio-Cuaternario, libre, formado por calcarenitas, arenas y gravas; el acuífero Messiniense constituido por calizas karstificadas, calcarenitas y calizas bioconstruidas (libre o semiconfinado) y el acuífero liásico que se desarrolla sobre las dolomías y calizas del sector norte de esta unidad. Precisamente es en este nivel acuífero donde se sitúa la cantera en estudio y el que conforma el denominado acuífero de Crestax (constituido por dolomías y calizas tableadas, margas, brechas y carniolas).

El balance anual de entradas y salidas en los acuíferos de ésta unidad es el siguiente:

**- Entradas**

Infiltración por precipitaciones: 50,0 hm<sup>3</sup>/año  
Retorno de riego: 4,6 hm<sup>3</sup>/año  
Infiltración de aguas residuales: 3,7 hm<sup>3</sup>/año  
Infiltración desde torrentes: 10,0 hm<sup>3</sup>/año  
Pérdida por las redes de abastecimiento: 1,7 hm<sup>3</sup>/año  
Recarga desde unidades colindantes: 0,0 hm<sup>3</sup>/año  
Entradas desde el mar: 1,6 hm<sup>3</sup>/año  
**Total entradas: 71,6 hm<sup>3</sup>/año**

**- Salidas**

Abastecimiento: 11,6 hm<sup>3</sup>/año  
Regadío: 30,0 hm<sup>3</sup>/año  
Manantiales y torrentes: 0,0 hm<sup>3</sup>/año  
Descarga a unidades colindantes: 0,0 hm<sup>3</sup>/año  
Descarga al mar: 30,0 hm<sup>3</sup>/año  
**Total salidas: 71,6 hm<sup>3</sup>/año**

Se trata de aguas duras (530 mg/l CaCO<sub>3</sub>) que en la costa pasan a ser muy duras (1290 mg/l CaCO<sub>3</sub>). Presentan un elevado contenido en nitratos que oscilan entre 13 y 276 mg/l, observándose los valores más elevados en el Llano de Sa Pobla (localidades de Sa Pobla, Llubí y Muro) donde se sitúan la mayoría de los cultivos origen de la contaminación. En general las aguas de esta unidad no son aptas para el abastecimiento urbano puesto que se superan los límites de potabilidad establecidos en el contenido en nitratos, nitritos, potasio, magnesio y fosfatos debido a los cultivos; y de sodio, magnesio, potasio, conductividad y cloruros en la zona de costa debido a procesos de intrusión marina.

*Unidad Hidrogeológica de Ufanés:*

Esta unidad posee una superficie de 50 km<sup>2</sup>, correspondiendo aproximadamente 43 km<sup>2</sup> a materiales carbonatados permeables. La superficie restante, 7 km<sup>2</sup>, está constituida por afloramientos impermeables (arcillas y margas).

Al N limita con la unidad de la Almadrava, al W con la unidad de S'Estremera, al E con la unidad del Llano de Inca Sa Pobla y al S con la unidad de Alaró. Mientras que las unidades con las que limita tanto al N como al W son impermeables, las unidades límite al E y S poseen relativamente buena permeabilidad.

En esta unidad se diferencia un acuífero kárstico libre confinado o semicolgado en algunas zonas, formado por dolomías, calizas, brechas, carniolas, pertenecientes al Lías.

El balance anual de entradas y salidas en el acuífero es el siguiente:

**- Entradas**

Infiltración por precipitaciones: 19,0 hm<sup>3</sup>/año

Infiltración desde torrentes: 2,3 hm<sup>3</sup>/año

**Total entradas: 21,3 hm<sup>3</sup>/año**

**- Salidas**

Manantiales y torrentes: 15,0 hm<sup>3</sup>/año

Evapotranspiración: 28,0 hm<sup>3</sup>/año

Escorrentía superficial: 6,0 hm<sup>3</sup>/año

**Total salidas: 49,0 hm<sup>3</sup>/año**

Poca información existe acerca de la calidad de esta agua en esta unidad hidrogeológica, si bien puede decirse que la facies predominante es bicarbonatada cálcico-magnésica. Presenta una dureza media y una mineralización notable en torno a los 520 µS/cm. Son aguas de buena calidad química, aptas para uso como abastecimiento urbano. Para regadío se clasifican como C251 siendo el peligro de salinización del suelo de tipo medio.

### 2.3.3 Hidrología e hidrogeología local

Debido a que la cantera se encuentra en el límite entre el relieve abrupto formado por los materiales liásicos y la llanura aluvial del torrente de San Miguel, el comportamiento del agua de escorrentía será diferente a ambos márgenes de la cantera. En su margen oriental, el agua pluvial formará regueros a favor de la gravedad y, al llegar a la llanura (de menor pendiente) tenderá a discurrir de forma laminar.

Los materiales que componen los taludes se van a comportar de forma muy diferente frente a la infiltración del agua pluvial:

- El suelo vegetal y el aluvial constituido por limos y arcillas limolíticas, son poco o nada permeables debido al predominio de la fracción fina, dificultando la infiltración del agua en el terreno.

- Las dolomías que constituyen las paredes de los taludes son bastante permeables por porosidad secundaria (elevado grado de fracturación), favoreciendo la infiltración del agua en el terreno.

Los aportes hídricos en la cantera van a venir asociados a:

- 1- Posibles infiltraciones subterráneas procedentes de descargas de acuíferos colindantes.
- 2- Aguas de escorrentía superficial en épocas de fuerte precipitación a través de las paredes de los taludes, que poseen gran energía debido al desnivel existente en el interior de la cantera.

3- Futura recarga artificial a partir del caudal de las Fuentes Ufanas a través del Torrente de Sant Miquel.

1- Infiltraciones subterráneas.

Todos los límites de la unidad hidrogeológica 18.11 Llano de Inca-Sa Pobla, son básicamente impermeables, sin embargo pueden existir zonas de cierta permeabilidad en el límite con la unidad de las Ufanas.

2- Aguas de escorrentía.

En momentos de fuerte precipitación es importante la acción de esta agua de escorrentía superficial en las paredes de los taludes, sobre todo en cuanto a su poder erosivo se refiere (arrastres, formación de cárcavas, etc).

3- Futura recarga artificial a partir del caudal de las Fuentes Ufanas a través del Torrente de Sant Miquel.

Como ya se ha comentado, la cantera sufrirá un llenado de agua, más o menos rápido, en los momentos en que funcionen las fuentes Ufanas.

Hay que comentar que la modificación local de la red de flujo a partir del llenado de la cantera así como la existencia de fallas normales cercanas a la zona de la cantera, que ponen en contacto materiales del Lías (dolomías permeables) con materiales menos permeables (Cretácico, más margoso), podrían dar lugar a la aparición de nuevas surgencias de agua a lo largo del contacto entre ambos materiales.

Puesto que el fondo de la cantera coincide aproximadamente con la cota del nivel freático en esta zona, pequeñas variaciones en este nivel provovan que dicho fondo se encuentre unas veces anegado y otras veces seco (en la fotografía de satélite adjuntada en anexos se puede observar la existencia de agua en la base de la cantera).

### 3. TECTÓNICA

#### 3.1 Tectónica regional.

En la isla de Mallorca se han definido tres dominios estructurales: Sierra Norte, Depresión Central y Sierra de Levante. La zona de estudio corresponde a una zona límite entre la Sierra norte y la Depresión Central.

*La Sierra Norte* conforma el mayor conjunto montañoso de la isla de Mallorca. Se extiende desde la Isla Dragonera hasta el Cabo Formentor, con una longitud de 80 km y anchura de 10 a 20 km. La mayor parte está constituida por materiales del Keuper y potentes masas calcodolomíticas del Lías inferior y medio. El resto de la estructura lo forman materiales del triás inferior y medio, el Jurásico, el Cretácico inferior margoso, el Paleógeno y el Burdigaliense-Langhiense.

Las estructuras principales marcan una dirección NE-SW, subparalelas o ligeramente oblicuas respecto a la costa, con evidente carácter morfotectónico. La vergencia de las estructuras es esencialmente hacia el NW, definidas por series monoclinales, superficies mecánicas de bajo buzamiento y pliegues con predominio de tipo sinclinal.

En este dominio afloran las siguientes unidades tectónicas:

- La Unidad tectónica II (George Sand – La Calobra): Formada por depósitos de brechas y calizas del Lías, calizas y areniscas del Lías medio y Dogger, así como brechas, conglomerados, calizas y margas del Mioceno. Se presenta en una estructura sinclinal buzando suavemente hacia el Sur, con diversas subestructuras menores producidas por el arrastre de la unidad cabalgante superior.
- La Unidad III (Teix Tomir): Se superpone a la anterior mediante el nivel de despegue tectónico del Keuper, sobre el que se sitúan el Rethiense, el Lías inferior y medio carbonático, así como las amrgas del Burdigaliense-Langhiense. Forman un monoclinal con desarrollo de cabalgamientos secundarios y estructuras de plegamiento vergentes al Norte.
- La Unidad IV (Alfabia- Es Barraca): Se dispone sobre la anterior. Presenta una serie mesozoica completa hasta el Cretácico, con algunos afloramientos paleógenos y burdigalienses discordantes sobre ella. Su estructura interna viene marcada por el desarrollo de pliegues rumbo NE-SW, vergentes al NW, a modo de sinclinales con depósitos del Jurásico superior y Cretácicos en su núcleo, cabalgados por su flanco inverso meridional por el anticlinal subsiguiente.
- La Unidad V (Alaró): Cabalga sobre la unidad anterior. Su parte frontal la forma un monoclinal buzante al Sureste. Hacia el Sur la estructura varía a pliegues laxos de rumbo NE-SW. Su constitución estratigráfica es similar a la de la unidad anterior.

- La Unidad VI (Alfania): La relación geométrica de esta unidad con las restantes del conjunto de la Sierra Norte, no están demasiado definidas. Su estructura interna viene caracterizada por el desarrollo de pliegues submeridianos vergentes hacia el Oeste, con dos bandas sinclinales complejas que alojan depósitos del Malm y el Neocomiense, y dos bandas anticlinales en las que aflora el Dogger.

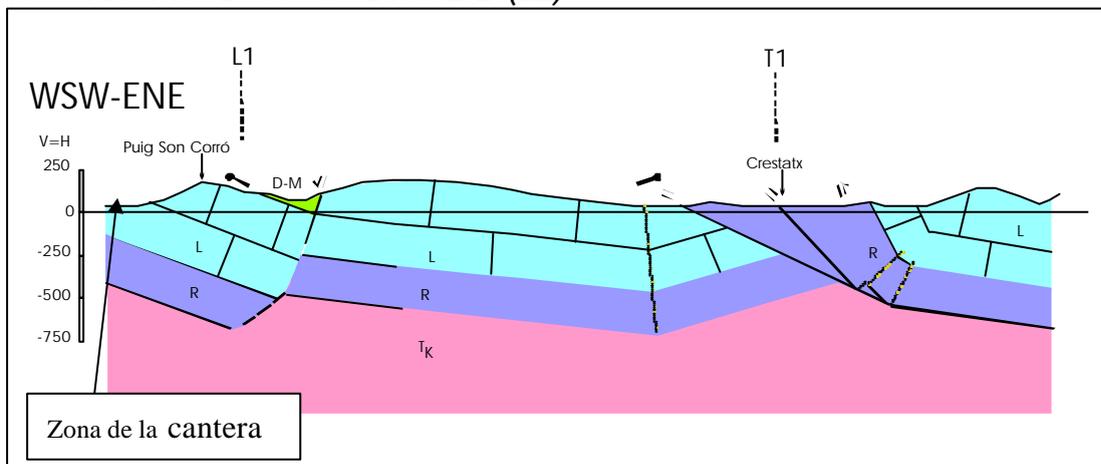
*La Depresión Central:* Es el dominio de mayor extensión en la isla. Queda enmarcada por los dos dominios montañosos de las Sierras Norte y Levante. Presenta una morfología suave con depósitos de marcada disposición subhorizontal, reflejo del predominio de materiales terciarios y cuaternarios. Su parte central se caracteriza por la presencia de materiales paleógenos y del Mioceno inferior, deformados, entre los que afloran numerosos islotes de terrenos mesozoicos. Las directrices estructurales dominantes son NE-SW.

A su vez se divide en dos sectores: el central, ocupado por los depósitos cuaternarios de las cuencas de Inca y Sa Pobla, y el meridional, en el que afloran sedimentos del mioceno superior y Plioceno.

### 3.2 Tectónica Local<sup>2</sup>

Los materiales en la zona de estudio se estructuran según el Cabalgamiento del Puig des Fangar: las calizas y dolomías del Lías, buzando una media de 30° hacia el SE, se superponen a las margas y margocalizas del Cretácico, con un buzamiento general hacia el SE. La traza del cabalgamiento tiene una orientación general NE-SW y se sigue claramente a lo largo de 1 km. Se interpreta que hacia el NE se continúa con el cabalgamiento del Puig de Maria

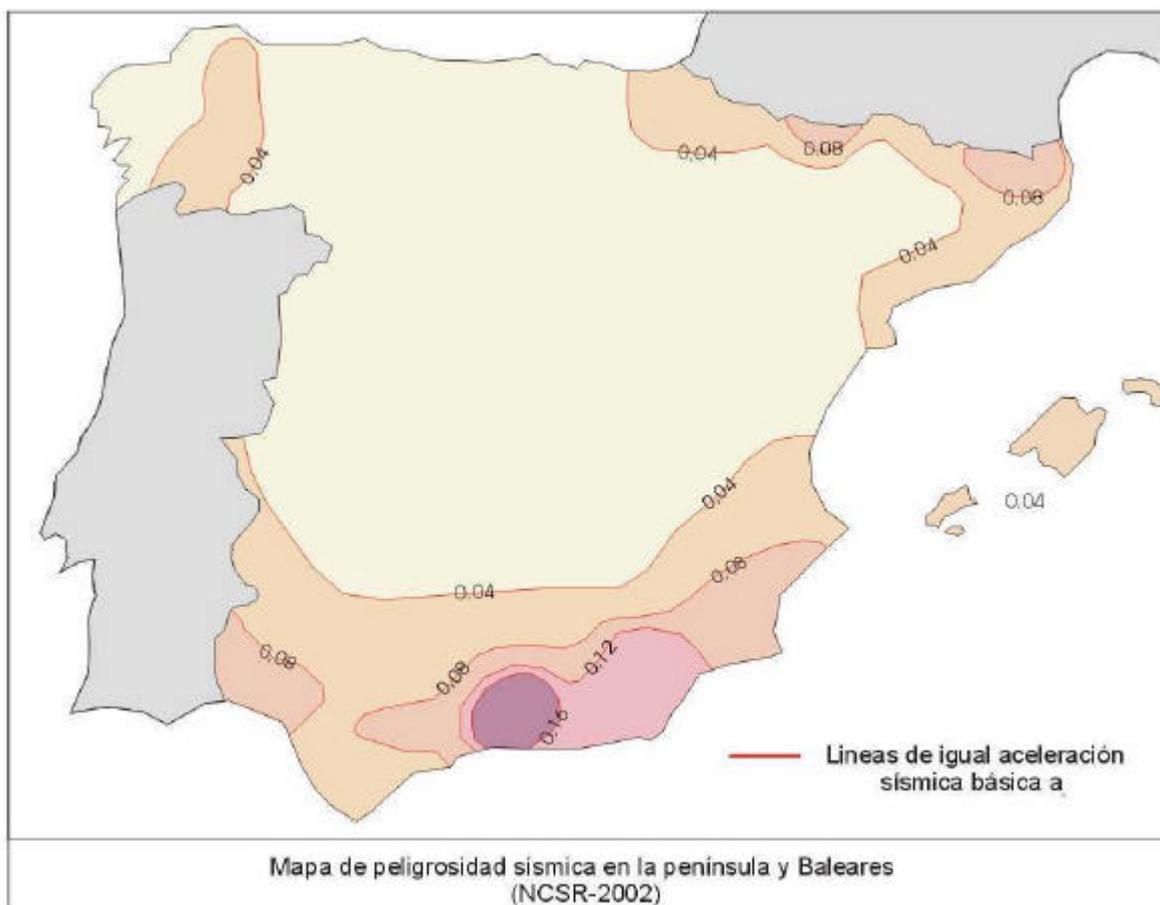
FIGURA 11.- LONGITUDINAL 2 (L2)



<sup>2</sup> Datos tomados de *Cartografía Geológica de la zona de Crestax* (Mallorca), por Bernardí Gelabert, marzo de 2006.

#### 4. SISMICIDAD

Según el Mapa de Peligrosidad Sísmica, figura adjunta, la isla de Mallorca se encuentran en zona de aceleración sísmica básica,  $a_b$ , entre 0,04 g y 0,08 g, siendo de 0,04 g para el municipio de Campanet según el Anexo de la Norma, por lo que el riesgo de fenómenos sísmicos de origen natural es pequeño.



Numerosos estudios han demostrado que en el caso de embalses, su llenado o vaciado puede inducir a pequeños sismos de carácter local.

El llenado provoca un incremento de la carga de la columna de agua y por tanto un aumento en la presión de poros y de los esfuerzos normales y tangenciales. Este fenómeno es más acusado en las discontinuidades del macizo rocoso (diaclasas, fallas,...) y puede llegar a producir el movimiento de las mismas.

Dado que en la zona de estudio existen numerosas fallas este efecto puede verse favorecido.

No obstante, Miguel Herraiz Sarachaga, en su obra *Sismicidad inducida por embalses* de marzo de 2005, comenta que los embalses más propicios a generar este tipo de fenómenos son aquellos donde la columna de agua tiene una altura considerable (más de 100 m) y un gran volumen.

En nuestro caso la cantera constituirá un embalse donde la columna de agua no superará los 20,0 m de altura y su capacidad es de 150.000 m<sup>3</sup> por lo que en principio no se esperan problemas de sismicidad inducida.

## 5. CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DEL TALUD

### 5.1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Aunque en la cantera se han podido delimitar un total de 6 taludes según su distinta orientación, el presente estudio sólo abordará el denominado talud 2 (ver situación en anexos), que presenta las siguientes características:

Longitud cercana a 175,0 m en dirección N168E, con una altura que varía desde 12,4 m (con una pendiente de 43° en dirección W), hasta un máximo de 17,2 m (con una pendiente de 68° en sentido W).

### 5.2 PARÁMETROS RESISTENTES DE LOS MATERIALES

#### 5.2.1 Matriz rocosa

La resistencia de la matriz ha sido medida in situ con la ayuda de un esclerómetro (ver fichas de las estaciones geomecánicas en anexos).

El esclerómetro o martillo Schmidt consiste en un pequeño aparato cilíndrico que posee un muelle en su interior y una punta retráctil. Al presionar dicha punta contra la roca el muelle se dispara y sufre un rebote que queda reflejado en una escala lateral.

En cada punto ensayado se toman varias medidas del rebote, eliminándose las más bajas y haciendo una media con las demás.

El valor del rebote, también llamado dureza Schmidt es correlacionable con la resistencia a compresión simple de la matriz rocosa.

Los resultados de la campaña, realizada sobre la matriz rocosa, han dado los siguientes resultados:

Material	Dureza Schmidt (esclerómetro)	Resistencia a compresión simple (Kp/cm <sup>2</sup> )	Resistencia media a comp. simple (Kp/cm <sup>2</sup> )
Matriz rocosa dolomítica	36,39,32,38,40,38,42,40,34,30,32,30,39,38,40,32,38,42,37,44,36,38,43,40.	440, 500, 370, 480, 530, 480, 590, 530, 400, 330, 500, 480, 530, 370, 480, 590, 460, 650, 440, 480, 610, 530.	489,5

La resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa es de 489,5 Kp/cm<sup>2</sup>.

## 5.2.2 Discontinuidades

En cada una de las 5 estaciones geomecánicas se han caracterizado los planos de discontinuidad (estratificación y juntas) más relevantes, que condicionan el comportamiento del macizo, con la ayuda de una brújula inclinométrica. Los parámetros definidos para cada plano han sido: tipo de plano, dirección de buzamiento, buzamiento, espaciado, continuidad, apertura, rugosidad, composición y resistencia de los rellenos y filtraciones (ver fichas de estaciones geomecánicas en anexos).

Para cada estación geomecánica se realizó una proyección estereográfica en plantilla equiareal con todas las medidas geométricas de los planos (dirección de buzamiento y buzamiento) tomadas en campo (ver proyecciones estereográficas en anexos) y definido los parámetros geométricos más frecuentes para cada familia de discontinuidad atendiendo a la densidad de polos. En total se han identificado hasta 5 familias de discontinuidades diferentes:

$F_1$  = Diaclasa tectónica. Su dirección de buzamiento media es de N80E y su buzamiento medio de 54°. En cuanto a su espaciado se clasifican como separadas. Poseen una moderada continuidad y suelen ser de apertura abierta. Su rugosidad es ondulada y rugosa. Presenta rellenos de recristalizaciones de dolomita, y se encuentran secas pero con evidencias de paso de agua. En las proyecciones estereográficas se la representa en color amarillo.

$F_2$  = Posiblemente se trate de la estratificación dada la tectónica de la zona, aunque debido a la heterogeneidad del macizo es difícil distinguirla. Su dirección de buzamiento media es de N171E y su buzamiento medio de 42°. En cuanto a su espaciado se clasifican como juntas. Poseen una baja continuidad y suelen ser de apertura ancha. Su rugosidad es plana y lisa, no presenta rellenos. Se encuentran secas pero con evidencias de paso de agua. En las proyecciones estereográficas se la representa en color morado.

$F_3$  = Falla tectónica. Su dirección de buzamiento media es de N227E y su buzamiento medio de 54°. En cuanto a su espaciado, se clasifican como separadas a moderadamente juntas. Poseen una baja continuidad y suelen ser de apertura moderadamente abierta. Su rugosidad es ondulada lisa y no presenta rellenos. Se encuentran secas y sin evidencias de paso de agua. En las proyecciones estereográficas se la representa en color verde.

$F_4$  = Diaclasa tectónica. Su dirección de buzamiento media es de N310E y su buzamiento medio de 36°. Por su espaciado se clasifican como juntas a moderadamente juntas. Poseen una baja continuidad y suelen ser de apertura cerrada. Su rugosidad es ondulada y lisa, no presenta rellenos. Se encuentran secas y sin evidencias de paso de agua. En las proyecciones estereográficas se la representa en color azul.

$F_5$  = Falla tectónica. Su dirección de buzamiento media es de N252E y su buzamiento medio de 24°. Según su espaciado, se clasifican como separadas a muy separadas. Poseen una baja continuidad y suelen ser de apertura parcialmente abierta. Su rugosidad es plana pulida lo que podría indicar que ha funcionado como superficie de falla. No presenta rellenos. Se encuentran secas y sin evidencias de paso de agua. En las proyecciones estereográficas se la representa en color rosa.

Se han observado algunas discontinuidades no repetitivas de gran continuidad que pudieran ser zonas de falla con buzamientos medios hacia el SE. Dado que no han podido ser caracterizadas por su carácter individual no se han tenido en cuenta en el análisis de la estabilidad.

Para caracterizar la resistencia de los planos de discontinuidad, se han llevado a cabo una serie de ensayos con esclerómetro sobre los planos de cada familia:

Los resultados de la campaña con esclerómetro, han sido los siguientes:

<b>Familia de discontinuidades</b>	<b>Dureza Schmidt (esclerómetro)</b>	<b>Resistencia a compresión simple (Kp/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Resistencia media a comp. simple (Kp/cm<sup>2</sup>)</b>
1	36,42,16,39,20,29,19,36,16,17,24,40,23,23,14,32,35,16,14,12,16.	440, 590, 180, 500, 220, 320, 210, 440, 180, 190, 260, 530, 250, 170, 370, 420, 180, 170, 160, 180.	296,0
2	28,24,54,30,20,25,20,40,48,40,30,46,45,40,26,44,30,42,28,20,24,32.	300, 260, 1030, 330, 220, 530, 760, 530, 760, 530, 330, 710, 680, 530, 280, 650, 330, 590, 300, 220, 260, 370.	477,3
3	36,32,32,25,39,48,53,44,38,46,24,26,28,23,48,34,38,30,44,36,20,48.	440, 370, 370, 270, 500, 760, 990, 650, 480, 710, 260, 280, 300, 250, 760, 400, 480, 330, 650, 440, 220, 760.	440,0
4	32,39,23,18,17,37,15,40,19,43,30,31,34,24,26,16,38,16,18,20.	370, 500, 250, 200, 190, 460, 170, 530, 210, 610, 330, 350, 400, 260, 280, 180, 480, 180, 200, 220.	318,5
5	32,30,26,39,21,19,52,38,24,50,40,42,38,42,30,28,42,40,29,31,44,36.	370, 330, 280, 500, 230, 210, 920, 480, 260, 840, 530, 590, 480, 590, 330, 300, 590, 530, 320, 350, 650, 440.	460,0

## 6. INESTABILIDADES DE LOS TALUDES

### 6.1 TIPOLOGIA DE LAS INESTABILIDADES Y CAUSAS POTENCIALES

Para definir el tipo de inestabilidad más probable en el talud se ha recurrido a la clasificación SMR para taludes, de M.R. Romana (1993), que valora la calidad del talud.

El **índice SMR** (Slope Mass Rating) se obtiene del índice RMR (Rock Mass Rating) sumando un "factor de ajuste", que es función de la orientación de las juntas (y producto de tres subfactores) y un "factor de excavación" que depende del método utilizado:

$$SMR = RMR + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

- Valores de **RMR** (BIENIAWSKI, 1979)  
Índice que varía entre 0 y 100 (suma de los cinco parámetros: Resistencia de matriz rocosa, RQD, Espaciamiento de las juntas, Condición de las juntas y Flujo de agua a través de las juntas). Ver tablas adjuntas donde se valora el macizo rocoso en función de la clasificación RMR.

Esta estimación se hace a partir de la media de los valores del RMR calculado en cada estación geomecánica.

Valor RMR en Estación geomecánica T2AE-1: 52 (Calidad Media)

Valor RMR en Estación geomecánica T2AE-2: 72 (Calidad Buena)

Valor RMR en Estación geomecánica T2AE-3: 52 (Calidad Media)

Valor RMR en Estación geomecánica T2BE-4: 45 (Calidad Media)

Valor RMR en Estación geomecánica T2BE-5: 69 (Calidad Buena)

Valor medio del RMR: 58. Indica un macizo rocoso de Media Calidad.

- C **F1**: Depende del paralelismo entre el rumbo de las juntas y de la cara del talud. Varía entre 1 (rumbos paralelos) y 0,15 (ángulo entre los dos rumbos es superior a 30 ° y la posibilidad de rotura es muy baja). Estos valores se ajustan a la expresión:

$$F1 = (1 - \text{sen} \alpha_j - \alpha_s)^2$$

Siendo **aj**: buzamiento de la junta

**as**: buzamiento del talud

- C **F2**: Depende del buzamiento de la junta en la rotura plana. Es una probabilidad de la resistencia a esfuerzo cortante de la junta. Varía entre 1 (para juntas con buzamiento >45°) y 0,15 (buzamientos < 20°). Se ajusta a la relación siguiente:

$$F2 = (\text{tag}^2 \beta_j)^2$$

Siendo **bj**: buzamiento de la junta.

F2 para roturas por vuelco vale 1.

- C **F3**: Refleja la relación entre los buzamientos de la junta y el talud. Se han mantenido los valores por BIENIAWSKI en 1976 que son siempre negativos. En la rotura planar, F3 se refiere a la probabilidad de activación de las juntas de la superficie del talud. Las condiciones límite se cumplen cuando la superficie del talud y las juntas son paralelas.

Estos tres factores de ajuste varían según:

FACTOR DE AJUSTE PARA LAS JUNTAS ( ROMANA, 1985 )						
CASO		MUY FAVORABLE	FAVORABLE	NORMAL	DESFAVORABLE	MUY DESFAVORABLE
P	/aj-as/	>30°	30 - 20 °	20 - 10°	10 - 5°	<5 °
T	/aj-as-180°/					
P/T	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1
P	/bj/	<20°	20 - 30 °	30 - 35°	35 - 45 °	>45°
	F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1
T	F2	1	1	1	1	1
P	bj-bs	>10°	10 - 0°	0°	0 - (-10°)	< -10°
T	bj+bs	<110°	110 - 120°	>120 °		
P/T	F3	0	-6	-25	-50	-60

P: Rotura plana

T: Rotura por vuelco

as: dirección del buzamiento del talud

aj: dirección de buzamiento de las juntas

bj: buzamiento de la junta

bs: buzamiento del talud

- C **F4**: Factor de ajuste por el método de excavación (tabla).

FACTOR DE AJUSTE SEGÚN EL MÉTODO DE EXCAVACIÓN ( ROMANA, 1985 )					
MÉTODO	TALUD NATURAL	PRECORTE	VOLADURA SUAVE	VOLADURA O MECÁNICO	VOLADURA DEFICIENTE
F4	15	10	8	0	-8

A continuación se resume el resultado del anterior análisis, obteniendo como resultado el valor final del RMR para el macizo rocoso:

Familias/RMR/Factores/SMR	RMR	F1	F2	F3	F4	SMR
F1	52	0,50	1,00	-60	0	22
F2	72	0,33	0,65	-60	0	59
F3	52	0,15	1,00	-60	0	43
F4	45	0,30	0,28	-60	0	40
F5	69	0,15	0,40	-60	0	65
<b>SMR medio: 46</b>						

La siguiente tabla establece el tipo de estabilidad del talud en función del análisis anterior.

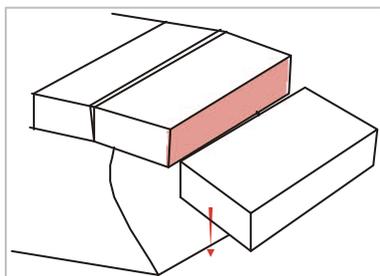
CLASES DE ESTABILIDAD SEGÚN EL SMR ( ROMANA, 1985 )					
CLASE	V	IV	III	II	I
SMR	0 - 20	21 - 40	41 - 60	61 - 80	81 - 100
DESCRIPCIÓN	MUY MALA	MALA	NORMAL	BUENA	MUY BUENA
ESTABILIDAD	Totalmente inestable	Inestable	Parcialmente estable	Estable	Totalmente estable
ROTURAS	Grandes roturas por planos continuos o por la masa	Juntas o grandes cuñas	Algunas juntas o muchas cuñas	Algunos bloques	Ninguno
TRATAMIENTO	Reexcavación	Corrección	Sistemático	Ocasional	Ninguno

Por todo lo anterior y atendiendo a la clasificación SMR, el talud objeto de estudio presenta una estabilidad de clase III, normal, parcialmente estable, con desarrollo de muchas cuñas. El valor de SMR obtenido, indica además que el talud necesita un tratamiento de carácter sistemático.

Según la relación entre las familias que provocan mayor inestabilidad por rotura en cuñas ( $F_3$  y  $F_4$ ), el tamaño medio de los bloques que se generan se clasifican entre grandes y muy grandes, en función del parámetro  $J_v$  (juntas por  $m^3$ ), que tiene en cuenta el espaciado entre las familias de juntas.

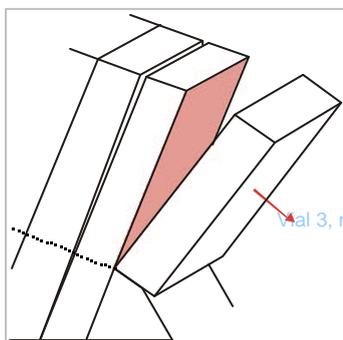
En la visita a la zona de estudio se observaron bloques caídos a pie del talud, planos inclinados lisos con aspecto fresco y grietas abiertas, indicativos de deslizamientos planares, de roturas en cuña, vuelcos y desprendimientos.

Este tipo de roturas se producen cuando se trata de macizos rocosos heterogéneos cuyo comportamiento está determinado por la existencia de varias familias de discontinuidades que intersectan entre sí, y cuya orientación es desfavorable respecto a la del talud considerado.



**Desprendimientos de roca:** Se produce por caída de material en voladizo, la mayor parte de las veces debido a erosión diferencial de estratos de diferente competencia y a la presencia de discontinuidades con la misma dirección que el talud.

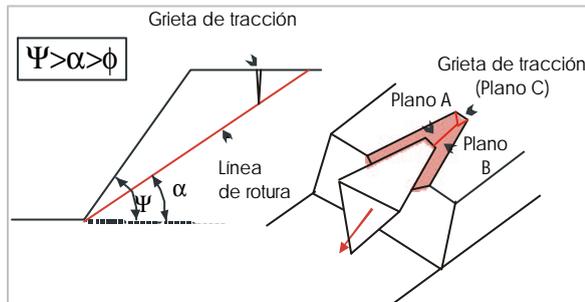
Suelen generar superficies de corte pequeñas y el trayecto de la masa desprendida se realiza en gran parte en el aire.



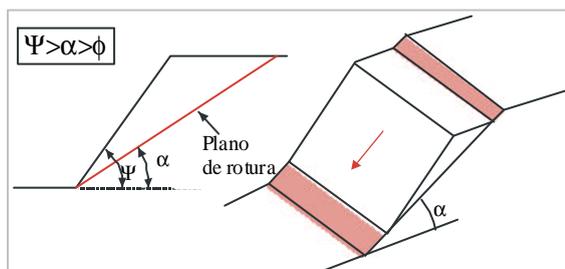
**Vuelcos de roca:** Se produce en las crestas situadas en la parte superior de la ladera. Implica una rotación de los bloques de roca sobre una base, bajo la acción de la gravedad ayudada por la

*inclusión de agua en las discontinuidades. Se debe a que el macizo de roca presenta un sistema de discontinuidades ortogonal, dando lugar a una geometría de columnas divididas en bloques. El proceso progresa hacia la parte superior del talud.*

*Si existe una fuerte orografía, la caída de los bloques da lugar a desprendimientos tipo rodamiento o rebote a favor de la pendiente de bloques de grandes dimensiones.*



**Rotura en cuña:** Se produce a favor de una superficie preexistente. La condición básica para que ésta se produzca es la presencia de dos planos de discontinuidad cuya línea de intersección presenta un buzamiento a favor del talud y con su misma dirección, cumpliéndose la condición  $Y > a > f$ . Siendo  $Y$  la pendiente del talud,  $a$  el ángulo de la línea de intersección y  $f$  el rozamiento interno del material.



**Deslizamientos planares:** Se producen a favor de una superficie preexistente. La condición básica para que ésta se produzca es la presencia de discontinuidades con un buzamiento a favor del talud y con su misma dirección, cumpliéndose la condición  $Y > a > f$ , siendo  $Y$  la pendiente del talud,  $a$  el ángulo de la discontinuidad y  $f$  el rozamiento interno del material.

En la zona estudiada, los procesos de inestabilidad se producen debido a:

- Existencia de un macizo rocoso con elevado grado de fracturación.
- Régimen de lluvias torrencial, con enorme poder erosivo en la superficie del talud.
- Infiltración del agua en el talud. La presencia de agua disminuye los parámetros resistentes de los materiales que componen el talud, especialmente la cohesión y aumenta el peso propio de los materiales y por lo tanto el empuje que estos ejercen.
- Alteración producida durante el proceso de extracción de áridos (vibraciones de la máquina excavadora).
- La existencia de varias familias de discontinuidades cuya interrelación es desfavorable respecto al talud considerado.
- Elevada pendiente del talud que favorece fenómenos gravitacionales.
- Presencia de vegetación, ya que aunque constituye un factor positivo contribuyendo al drenaje (absorbe parte del agua contenida en el terreno) y evita la degradación superficial, el efecto mecánico de algunas raíces puede ser un elemento desencadenante de la caída de bloques de roca.



## 6.2 ANÁLISIS DE LA INESTABILIDAD

Para el estudio de estabilidad, se han utilizado los *métodos de equilibrio límite*, en el que se analiza el equilibrio de una masa potencialmente inestable basándose exclusivamente en las leyes de la estática sin tener en cuenta las deformaciones del terreno.

Estos métodos consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una superficie de rotura, suponiendo que se moviliza la totalidad de la resistencia al corte.

Se usan leyes constitutivas simplificadas: modelo “rígido perfectamente plástico” y se asume que la resistencia del material se expresa únicamente con los parámetros cohesión ( $c$ ) y ángulo de rozamiento ( $\phi$ ), constantes para el terreno y característicos del estado plástico, por lo tanto se supone válido el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

De este modo se establecen las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del coeficiente de seguridad del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan (se supone que el factor de seguridad es constante en todos los puntos de la línea de rotura).

$$FS = \frac{F.\text{estabilizadoras}}{F.\text{desestabilizadoras}}$$

Se considera que un talud es inestable y por lo tanto tiene que ser tratado, cuando el factor de seguridad  $F$  es inferior a 1 (fuerzas estabilizadoras < fuerzas desestabilizadoras); si es igual a 1 se habla de “*equilibrio estricto*” y si es mayor que 1, el talud es estable y por tanto bastaría con protegerlo de la erosión o de otros agentes externos desestabilizadores (como la entrada de agua).

Para taludes permanentes, el coeficiente de seguridad a adoptar<sup>3</sup> debe ser igual o superior a 1,5, e incluso 2,0 dependiendo de la seguridad en los datos geotécnicos. Dado que los procesos de inestabilidad pueden llegar a afectar a una carretera se ha optado por utilizar en los cálculos un factor de seguridad de 2.

Los *métodos de equilibrio límite* se clasifican en *métodos exactos* y *métodos no exactos*.

Los *métodos exactos*, que proporcionan una solución exacta al problema, únicamente son posibles en los casos de geometría sencilla como los *deslizamientos planares* o *roturas en cuña*.

Para otro tipo de geometría las ecuaciones son particularmente complejas por lo que debe hacerse algunas simplificaciones o hipótesis previas que permitan su resolución, es por ello que se denominan *métodos no exactos*.

---

<sup>3</sup> Según Luis I. González de Vallejo et al. en Ingeniería Geológica, 2002.

A partir del análisis estereográfico de las discontinuidades se han encontrado las siguientes relaciones geométricas:

		DISCONTINUIDADES					
		TALUD	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub> -S <sub>0</sub>	F <sub>3</sub>	F <sub>4</sub>	F <sub>5</sub>
DISCONTINUIDADES	F <sub>1</sub>	Vuelco	---	Cuña Estable	Cuña Estable Vuelco	Cuña Estable	Cuña Estable Vuelco
	F <sub>2</sub>	---	Cuña Estable	---	Cuña Estable	Cuña Estable*	Cuña Estable*
	F <sub>3</sub>	Rot Planar	Cuña Estable Vuelco	Cuña Estable	---	Cuña Inestable	Cuña Estable
	F <sub>4</sub>	---	Cuña Estable	Cuña Estable*	Cuña Inestable	---	Cuña Inestable
	F <sub>5</sub>	Rot Planar*	Cuña Estable Vuelco	Cuña Estable*	Cuña Estable	Cuña Estable*	---

\* No cumple la condición de rotura ( $\psi > \alpha > f$ ) aunque es posible el deslizamiento si varían las condiciones actuales.

La configuración geométrica de algunas familias respecto a otras podrían favorecer fenómenos de vuelco, cuya afección no se ha tendido en cuenta dada la gran heterogeneidad en el tamaño de bloques a deslizar y porque su acción inestable no es tan relevante como el resto de procesos analizados.

Tal como se comentaba en el apartado 6.1, en el área estudiada el proceso de inestabilidad más probable es la rotura en cuña, sin embargo también se ha considerado adecuado el análisis de la rotura planar.

A partir del análisis cinemático mediante proyección estereográfica realizado en cada estación geomecánica (ver anexos) se deduce que las inestabilidades de tipo cuña van a venir producidas por la intersección de las familias F<sub>3</sub> y F<sub>4</sub> y las planares por la familia F<sub>3</sub> respecto al talud.

### Rotura por cuñas:

En el caso de rotura por cuñas, las fuerzas actuantes sobre la masa deslizante van a ser:

- Las debidas a las presiones intersticiales, sobre los planos de rotura (A y B) y sobre la grieta de tracción (plano C). Actúan normalmente a dichos planos.
- Las debidas al peso propio de la cuña (W).
- Las debidas a un posible terremoto.

Para el cálculo del factor de seguridad FS se tiene que suponer que el efecto sobre la estabilidad de la cuña de los momentos de las fuerzas actuantes es despreciable.

El factor de seguridad FS viene dado por la expresión:

$$FS = \frac{c'_A \cdot A_A + c'_B \cdot A_B + N_A \cdot tgj'_A + N_B \cdot tgj'_B}{F_D}$$

Donde  $c'_A$  y  $c'_B$  son las cohesiones efectivas de las superficies de deslizamiento A y B respectivamente,  $f'_A$  y  $f'_B$  los ángulos de rozamiento interno efectivo en las superficies de deslizamiento A y B,  $A_A$  y  $A_B$  las superficies de deslizamiento A y B,  $N_A$  es la reacción normal efectiva sobre el plano A,  $N_B$  es la reacción normal efectiva sobre el plano B y  $F_D$  es la resultante de las componentes de las fuerzas que tienden a producir el deslizamiento.

HOEK Y BRAY, 1977, han simplificado el cálculo del factor de seguridad de roturas de tipo cuña sustituyendo algunos de los factores por parámetros adimensionales y considerando que:

- No existe grieta de tracción.
- La cuña presenta el mismo ángulo de rozamiento en las dos superficies deslizantes (A y B).
- La cohesión en las superficies de rotura es nula.
- El macizo rocoso está seco.
- No existe acción sísmica.

Con lo que la ecuación anterior queda:

$$FS = A \cdot tgj'_A + B \cdot tgj'_B$$

Dónde  $f'_A$  y  $f'_B$  son los ángulos de rozamiento interno efectivo en las superficies de deslizamiento A y B y A y B son dos coeficientes adimensionales que se pueden obtener de ábacos a partir de los buzamientos y direcciones de buzamiento de A y B (siendo el plano A el de menor buzamiento).

Se analiza ese tipo de rotura considerando dos casos: que el terreno esté seco (condiciones actuales en el momento de estudio) o que el terreno esté saturado (llenado del embalse).

### 1.- Condiciones actuales: Talud en estado seco.

El factor de seguridad se define como el cociente entre la resistencia al corte del suelo o roca a lo largo de la superficie de falla y los esfuerzos de corte que tienden a producir deslizamiento a lo largo de esa superficie de falla.

Para el cálculo del factor de seguridad de la cuña se ha recurrido al método utilizado por Hoek y Bray para deslizamientos de cuñas:

$$FS = A \operatorname{Tag} f'_A + B \operatorname{Tag} f'_B$$

Donde:

A y B: Son coeficientes adimensionales que dependen de la dirección y buzamiento de los planos A y B (planos de rotura que delimitan la supuesta cuña), obtenidos a partir de los ábacos de Hoek y Bray (1981).

$f'_{A-B}$ : Ángulos de rozamiento efectivos en la superficie de los planos de rotura.

Los ángulos de rozamiento efectivos pueden obtenerse a partir de las fórmulas propuestas por Barton y Choubey (1977)<sup>4</sup>, donde se determina la resistencia al corte de pico  $f_p$  en discontinuidades rugosas sin cohesión a partir de los datos de campo y de la resistencia residual  $f_r$ :

$$f_p = JRC \operatorname{Log}_{10} \left( \frac{JCS}{s'_n} \right) + f_r$$

$s'_n$ : Esfuerzo normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

JRC: Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.

JCS: Resistencia a compresión simple de la pared de la discontinuidad.

$f_r$ : Ángulo de rozamiento interno residual en la discontinuidad.

---

<sup>4</sup> En Ingeniería Geológica, González de Vallejo et al. (2002)

El ángulo de rozamiento residual en la discontinuidad viene dado por la expresión:

$$f_r = (f_b - 20^\circ) + 20^\circ \left( \frac{r}{R} \right)$$

$f_b$ : Ángulo de rozamiento básico del material.

R: Valor del rebote del esclerómetro sobre roca sana

r: Valor del rebote del esclerómetro sobre la pared de la discontinuidad.

Si el ángulo de rozamiento básico del material es<sup>5</sup> de 30°, el valor medio del rebote del esclerómetro sobre la roca sana es de 32 y el valor medio del rebote del esclerómetro sobre la pared de la discontinuidad es de 36 para F<sub>3</sub> y de 29 para F<sub>4</sub>, entonces los ángulos de rozamiento residuales de las discontinuidades son:

$$\text{Para } F_3 \quad f_r = 32,5^\circ$$

$$\text{Para } F_4 \quad f_r = 28,1^\circ$$

Por otra parte el esfuerzo normal efectivo sobre el plano de discontinuidad,  $s'_n$ , viene dado por:

$$s'_n = W \cdot \cos \alpha$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo de la discontinuidad sobre la que deslizaría el bloque.

Para F<sub>3</sub>,  $\alpha$  vale: 54°

Para F<sub>4</sub>,  $\alpha$  vale: 36°

Por otro lado  $W = (* \times v) \times g$  siendo \* la densidad del material deslizado, v el volumen del bloque que se puede deslizar y g la aceleración de la gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>).

El tamaño medio observado de los bloques deslizados es de 0,70x0,50x0,30 m por lo que el volumen deslizado es de 0,11 m<sup>3</sup>. Si la densidad del material es<sup>6</sup> de 2,82 g/cm<sup>3</sup>, el peso del bloque es de aproximadamente 3 KN.

Con lo que la fuerza ejercida en la dirección perpendicular a los planos A y B serán:

F<sub>n</sub> en el plano F<sub>3</sub>: 1,77 KN

F<sub>n</sub> en el plano F<sub>4</sub>: 2,42 KN

Estas fuerzas estarán aplicadas sobre una superficie de 0,70x0,50 m (0,35 m<sup>2</sup>) y el esfuerzo normal será de:

$$s'_n \text{ en el plano } F_3: 5 \text{ KN/m}^2 = 0,5 \text{ Ton/m}^2 = 0,05 \text{ Kp/cm}^2.$$

$$s'_n \text{ en el plano } F_4: 7 \text{ KN/m}^2 = 0,7 \text{ Ton/m}^2 = 0,07 \text{ Kp/cm}^2$$

<sup>5</sup> Dato obtenido de una selección de Rahn (1985), Walthan (1999), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañes (1975) en Ingeniería Geológica, González de Vallejo et al. (2002).

<sup>6</sup> Obtenido a partir del análisis de laboratorio de una muestra representativa del material

Los factores JRC y JCS, se obtienen a partir de los datos de campo. Así:

Para F<sub>3</sub>: JRC = 8 y para F<sub>4</sub>: JRC = 8

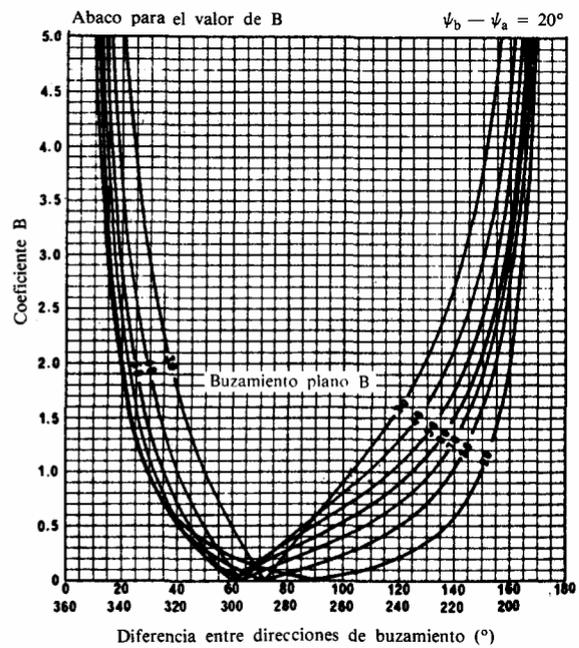
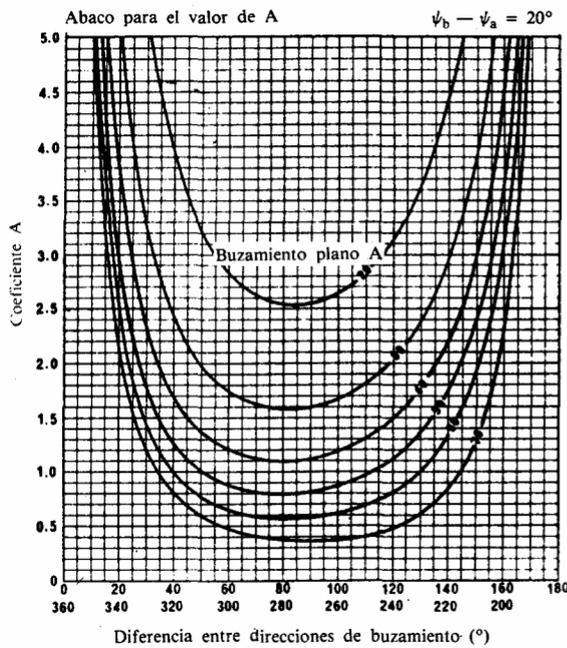
Para F<sub>3</sub>: JCS = 440,0 Kp/cm<sup>2</sup> y para F<sub>4</sub>: JCS = 320,0 Kg/cm<sup>2</sup>

Entonces el ángulo de rozamiento de pico actuante en cada plano de discontinuidad será:

Para F<sub>3</sub>:  $\phi_p = 64,0^\circ$

Para F<sub>4</sub>:  $\phi_p = 57,4^\circ$

	Buzamiento	Dirección de buzamiento	Ángulo de rozamiento interno de pico
Plano (F <sub>3</sub> )	54°	227°	64,0°
Plano (F <sub>4</sub> )	36°	310°	57,4°
Diferencia	18°	83°	



c) Diferencia entre buzamientos: 20°

Utilizando los ábacos adjuntos se obtiene que:

$$A = 0,70$$

$$B = 0,40$$

Sustituyendo los valores en la fórmula del factor de seguridad, se obtiene un valor para el del talud de 2,05.

$$F.S = 2,05.$$

## 2.- Condiciones sumergidas (embalse lleno).

En el caso de que el embalse se encuentre lleno de agua, las presiones intersticiales que pudieran originarse en el interior de las discontinuidades existentes en el interior del talud, serían compensadas con el empuje lateral ejercido por la columna de agua embalsada.

Es por esa razón que el factor de seguridad del talud sería prácticamente el mismo que para las condiciones en estado seco; es decir es estable.

El problema viene cuando el nivel del agua varía en las diferentes etapas de llenado y vaciado.

## 3.- Llenado y vaciado del embalse.

Durante el proceso de llenado del embalse es posible que existan fenómenos de capilaridad en las discontinuidades, creando presiones intersticiales. Durante el proceso de vaciado, sobre todo si es un vaciado rápido, las discontinuidades aún permanecen rellenas de agua, por lo que no da tiempo a que se disipe la presión intersticial.

Esto conduce a que en estas circunstancias, se tenga una presión intersticial en el interior del macizo que no es contrarrestada con el empuje lateral ejercido por la columna de agua embalsada. Esta presión va a disminuir la resistencia de pico de las discontinuidades dado que va a reducir la componente normal que ejerce el peso del bloque sobre la pared de la discontinuidad.

El cálculo del factor de seguridad se realiza de forma parecida al ejecutado en estado seco, mediante el método utilizado por Hoek y Bray para deslizamientos de cuñas::

$$FS = A \text{Tag} f'_A + B \text{Tag} f'_B$$

Donde:

$A$  y  $B$ : Son coeficientes adimensionales que dependen de la dirección y buzamiento de los planos A y B (planos de rotura que delimitan la supuesta cuña), obtenidos a partir de los ábacos de Hoek y Bray (1981).

$f'_{A-B}$ : Ángulos de rozamiento efectivos en la superficie de los planos de rotura.

Los ángulos de rozamiento efectivos pueden obtenerse a partir de las fórmulas propuestas por Barton y Choubey (1977)<sup>7</sup>, donde se determina la resistencia al corte de pico  $f'_p$  en discontinuidades rugosas sin cohesión a partir de los datos de campo y de la resistencia residual  $f'_r$ :

$$f'_p = JRCLog_{10} \left( \frac{JCS}{s'_n} \right) + f'_r$$

<sup>7</sup> En Ingeniería Geológica, González de Vallejo et al. (2002)

$s'_n$  : Esfuerzo normal efectivo sobre el plano de discontinuidad.

JRC: Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.

JCS: Resistencia a compresión simple de la pared de la discontinuidad.

$f_r$  : Ángulo de rozamiento interno residual en la discontinuidad.

El ángulo de rozamiento residual en la discontinuidad viene dado por la expresión:

$$f_r = (f_b - 20^\circ) + 20^\circ \left( \frac{r}{R} \right)$$

$f_b$  : Ángulo de rozamiento básico del material.

R: Valor del rebote del esclerómetro sobre roca sana

r: Valor del rebote del esclerómetro sobre la pared de la discontinuidad.

Si el ángulo de rozamiento básico del material es<sup>8</sup> de 30°, el valor medio del rebote del esclerómetro sobre la roca sana es de 32 y el valor medio del rebote del esclerómetro sobre la pared de la discontinuidad es de 36 para F<sub>3</sub> y de 29 para F<sub>4</sub>, entonces los ángulos de rozamiento residuales de las discontinuidades son:

$$\text{Para F}_3 \quad f_r = 32,5^\circ$$

$$\text{Para F}_4 \quad f_r = 28,1^\circ$$

En este caso hay que tener en cuenta el efecto del agua. La presión intersticial U corresponde con una fuerza normal  $s'_n$  al plano de discontinuidad en sentido contrario a la componente normal del peso W:

$$s'_n = (W \cdot \cos \alpha) - U$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo de la discontinuidad sobre la que deslizaría el bloque.

Para F<sub>3</sub>,  $\alpha$  vale: 54°

Para F<sub>4</sub>,  $\alpha$  vale: 36°

Así, el peso del hipotético bloque a deslizar sería:  $W = (* \times v) \times g$  siendo \* la densidad del material deslizado, v el volumen del bloque que se puede deslizar y g la aceleración de la gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>).

El tamaño medio observado de los bloques deslizados es de 0,70x0,50x0,30 m por lo que el volumen deslizado es de 0,11 m<sup>3</sup>. Si la densidad del material es<sup>9</sup> de 2,82 g/cm<sup>3</sup>, el peso del bloque es de aproximadamente 3 KN.

<sup>8</sup> Dato obtenido de una selección de Rahn (1985), Walthan (1999), Goodman (1989), Farmer (1968), Jiménez Salas y Justo Alpañes (1975) en Ingeniería Geológica, González de Vallejo et al. (2002).

<sup>9</sup> Obtenido a partir del análisis de laboratorio de una muestra representativa del material

Con lo que la fuerza ejercida en la dirección perpendicular a los planos A y B serán:  
 $F_n$  en el plano  $F_3$ : 1,77 KN  
 $F_n$  en el plano  $F_4$ : 2,42 KN

Estas fuerzas estarán aplicadas sobre una superficie de 0,70x0,50 m (0,35 m<sup>2</sup>) y el esfuerzo normal será de:

$s'_n$  en el plano  $F_3$ :  $5 \text{ KN/m}^2 = 0,5 \text{ Ton/m}^2 = 0,05 \text{ Kp/cm}^2$ .  
 $s'_n$  en el plano  $F_4$ :  $7 \text{ KN/m}^2 = 0,7 \text{ Ton/m}^2 = 0,07 \text{ Kp/cm}^2$

Suponiendo una altura de agua tras el bloque que desliza, de 2/3 de la altura del bloque, tenemos una presión intersticial de:  $1 \text{ Ton/m}^3 \times 0,2 \text{ m} = 0,2 \text{ Ton/m}^2$ .

$(s'_n - U)$  en el plano  $F_3$ :  $0,5 \text{ Ton/m}^2 - 0,2 \text{ Ton/m}^2 = 0,3 \text{ Ton/m}^2$   
 $(s'_n - U)$  en el plano  $F_4$ :  $0,7 \text{ Ton/m}^2 - 0,2 \text{ Ton/m}^2 = 0,5 \text{ Ton/m}^2$ .

Los factores JRC y JCS, se obtienen a partir de los datos de campo. Así:

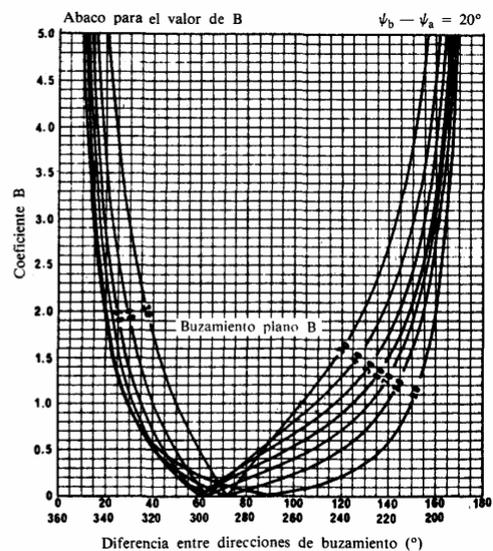
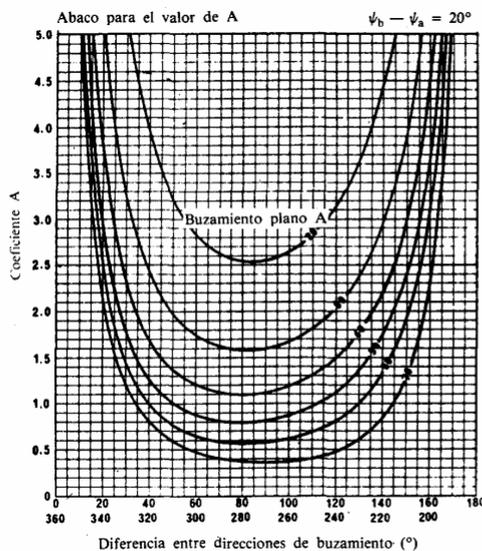
Para  $F_3$ : JRC = 8 y para  $F_4$ : JRC = 8

Para  $F_3$ : JCS = 440,0 Kp/cm<sup>2</sup> y para  $F_4$ : JCS = 320,0 Kg/cm<sup>2</sup>

Entonces el ángulo de rozamiento de pico actuante en cada plano de discontinuidad será:

Para  $F_3$ :  $\phi_p = 7^\circ$   
 Para  $F_4$ :  $\phi_p = 6^\circ$

	Buzamiento	Dirección de buzamiento	Ángulo de rozamiento interno de pico
Plano ( $F_3$ )	54°	227°	7°
Plano ( $F_4$ )	36°	310°	6°
Diferencia	18°	83°	



c) Diferencia entre buzamientos: 20°

Utilizando los ábacos adjuntos se obtiene que:

$$A = 0,70$$

$$B = 0,40$$

Sustituyendo los valores en la fórmula del factor de seguridad, se obtiene un valor para el del talud de 0,12.

$$\mathbf{F.S = 0,12.}$$

Por lo tanto el talud es inestable.

Además de la disminución de la componente normal del peso, la presión intersticial en el interior de las discontinuidades va a favorecer la abertura de éstas conforme aumente dicha presión.

### **Rotura planar:**

Se analiza este tipo de rotura para la familia de discontinuidades  $F_3$  respecto al talud.

Para esta caso se cumple la condición de rotura planar  $\mathbf{Y > a > f}$ , ( $68^\circ > 54^\circ > 32^\circ$ ).

En el caso de rotura planar, todas las fuerzas (estabilizadoras y desestabilizadoras) se proyectan según la dirección del plano de rotura.

Para el cálculo del factor de seguridad FS se tiene que suponer que:

- La rotura únicamente se produce por deslizamiento por lo que los momentos que puedan aparecer son despreciables.
- Se supone implícitamente que el factor de seguridad es constante a lo largo de toda la superficie de rotura.
- El plano de deslizamiento se encuentra limitado en su parte superior por una grieta de tracción plana y total o parcialmente llena de agua.

Por tanto el factor de seguridad queda:

$$FS = \frac{c' A + \left\{ W \left[ \left( 1 + \frac{a_v}{g} \right) \cos \mathbf{y} - \frac{a_H}{g} \operatorname{sen} \mathbf{y} \right] - U - V \operatorname{sen}(\mathbf{y} + \mathbf{d}) \right\} \operatorname{tg} \mathbf{j}'}{\left\{ W \left[ \left( 1 + \frac{a_v}{g} \right) \operatorname{sen} \mathbf{y} - \frac{a_H}{g} \cos \mathbf{y} \right] + V \cos(\mathbf{y} + \mathbf{d}) \right\}}$$

donde:

$c'$  = cohesión efectiva en la superficie de deslizamiento.

$f'$  = ángulo de rozamiento interno efectivo en la superficie de deslizamiento.

$A$  = área de la superficie de deslizamiento, supuesta de ancho unidad.

$W$  = peso de la masa deslizante, supuesta de ancho unidad.

$\gamma$  = ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.

$U$  = resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre el plano de deslizamiento.

$\delta$  = ángulo que forma la grieta de tracción con la vertical.

$V$  = resultante de las presiones intersticiales que actúan sobre la grieta de tracción.

$g$  = aceleración de la gravedad.

$a_v$  y  $a_H$  = aceleraciones sísmicas vertical y horizontal respectivamente.

Tal como se explicó en el apartado de acciones sísmicas, no es obligatoria la consideración de acciones sísmicas, con lo cual se puede suponer que  $a_v = a_H = 0$ .

Se analiza ese tipo de rotura considerando dos casos: que el terreno esté seco (condiciones actuales en el momento de estudio) o que el terreno esté saturado (llenado/vaciado del embalse).

### ***1.- Condiciones actuales: Talud en estado seco***

Si se considera el terreno seco, entonces  $U = V = 0$ , por lo que la expresión anteriormente expuesta queda:

$$FS = \frac{c' A + W \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} j'}{W \sin \gamma}$$

En campo se ha observado que las superficies que han actuado de plano de deslizamiento no presentaban ningún tipo de relleno, para asignar a la discontinuidad unos parámetros resistentes, puesto que las discontinuidades están vacías, la cohesión efectiva va a ser nula y el ángulo de rozamiento calculado en un apartado anterior para esta familia de discontinuidades es de  $64^\circ$ :

$$c' = 0,0 \text{ Kp/cm}^2$$

$$f' = 64^\circ$$

El bloque más grande observado in situ posee un volumen de  $6,0 \text{ m}^3$  ( $300 \times 200 \times 100 \text{ cm}$ ), siendo la posible superficie de deslizamiento de  $6,0 \text{ m}^2$  ( $300 \times 200 \text{ cm}$ ), con un buzamiento de  $54^\circ$ .

$W = (\gamma \cdot v) \cdot g$  siendo  $\gamma$  la densidad del material deslizado<sup>10</sup> (2,82 t/m<sup>3</sup>),  $v$  el volumen del bloque que se puede deslizar (6,0 m<sup>3</sup>) y  $g$  la aceleración de la gravedad (9,8 m/s<sup>2</sup>) por lo que  $W = 165,8$  KN.

Si se sustituyen los valores en la fórmula anterior, se obtiene un factor de seguridad **FS** de **1,5**.

Por tanto el talud es inestable para las condiciones actuales.

## **2.- Condiciones saturadas (llenado y vaciado del embalse):**

Durante el proceso de llenado del embalse es posible que existan fenómenos de capilaridad en las discontinuidades, saturando parte del talud y creando presiones intersticiales. Durante el proceso de vaciado, sobre todo si es un vaciado rápido, las discontinuidades aún permanecen rellenas de agua, por lo que no da tiempo a que se disipe la presión intersticial.

Esto conduce a que en estas circunstancias, se tenga un talud saturado en su interior donde las presiones intersticiales actuantes no son contrarrestadas con el empuje lateral ejercido por la columna de agua embalsada.

Para ver el efecto que producen esas presiones intersticiales en la rotura planar, es necesario hacer las siguientes simplificaciones:

- El talud a estudiar es un plano de inclinación  $\alpha$ .
- La superficie del terreno que queda por encima del talud es un plano horizontal.
- La grieta de tracción es vertical.
- La distribución de las presiones intersticiales que actúan sobre la base de la masa deslizando y sobre la grieta de tracción tiene forma triangular.

Teniendo en cuenta todo lo anterior HOEK Y BRAY, 1977, simplificaron la ecuación anterior sustituyendo algunos de los factores por parámetros adimensionales:

$$FS = \frac{\left( \frac{2 \cdot c'}{g \cdot H} \right) \cdot P + \left[ \frac{Q}{tg \gamma_p} - R \cdot (P + S) \right] \cdot tg j'}{Q + \frac{R \cdot S}{tg \gamma_p}}$$

<sup>10</sup> Dato obtenido en laboratorio, 3ª ed. 1980, en Curso Aplicado de Cimentaciones. C.O.A.M. 1996.

Donde:

$c'$  = cohesión efectiva en la superficie de deslizamiento.

$f'$  = ángulo de rozamiento interno efectivo en la superficie de deslizamiento.

$\gamma$  = peso específico del terreno.

H = altura del talud

$\alpha$  = ángulo que forma el plano de deslizamiento con la horizontal.

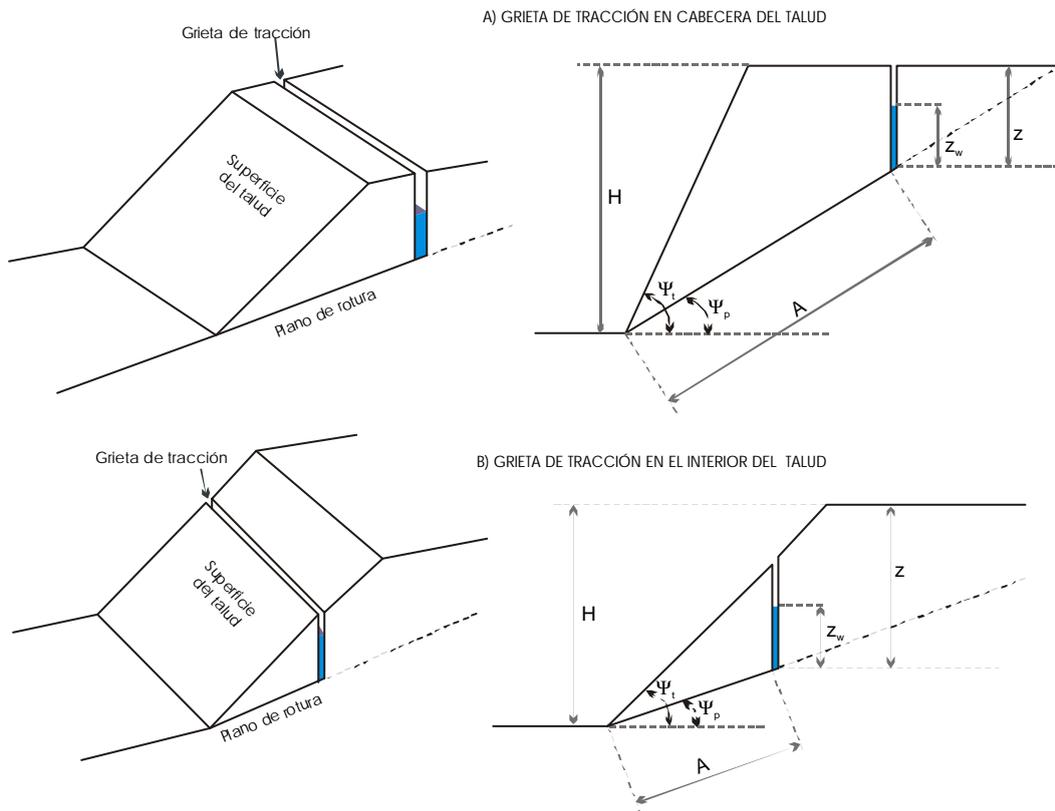
$\beta$  = ángulo que forma la superficie del talud con la horizontal

P, S y Q = factores adimensionales que pueden ser extraídos de los ábacos adjuntos.

y  $R = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H}$  siendo  $\gamma_w$  el peso específico del agua,  $z_w$  la altura del agua en la grieta

de tracción y z la altura entre la base de la grieta de tracción y la cabecera del talud, tal como se aprecia en el siguiente gráfico:

GEOMETRIA DE UN TALUD EN ROTURA PLANAR  
 (HOEK Y BRAY, 1977)



Tal como se comentó en la introducción, las características geométricas del talud, son las siguientes:

$$\begin{aligned}H &= 15,0 \text{ m} \\ \varphi_t &= 68^\circ \\ \varphi_p &= 54^\circ \\ z &= 1 \text{ m} \\ z_w &= 0,66 \text{ m}\end{aligned}$$

En campo se ha observado que las superficies que han actuado de plano de deslizamiento no presentaban ningún tipo de relleno por lo que los parámetros resistentes de la discontinuidad son:

$$\begin{aligned}c' &= 0,0 \text{ Kp/cm}^2 \\ f' &= 64^\circ \text{ (Hallado en un apartado anterior)} \\ \text{El peso específico } \gamma &\text{ es de } 2,82 \text{ t/m}^3.\end{aligned}$$

De los datos anteriores se deduce que:

$$\begin{aligned}z/H &= 0,066 \\ z_w/z &= 0,66 \\ \gamma_w/\gamma &= 0,35 \text{ } (\gamma_w=1,0 \text{ t/m}^3) \\ \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H} &= 0,043 \\ R = \frac{\gamma_w}{\gamma} \cdot \frac{z_w}{z} \cdot \frac{z}{H} &= 0,0152\end{aligned}$$

Los parámetros P, Q y S pueden ser obtenidos a partir de los ábacos correspondientes, siendo los siguientes:

$$\begin{aligned}P &= 1,1 \\ S &= 0,08 \\ Q &= 0,25\end{aligned}$$

Si se sustituyen los valores en la fórmula anterior, se obtiene un factor de seguridad **FS** de **1,34**.

Por tanto el talud es inestable en el momento del llenado/vaciado del embalse.

El efecto que produciría la caída de material al embalse sería un incremento del nivel del agua. Un volumen aproximado de 525 m<sup>3</sup> de material que podría deslizar (15x175x0,2 m), produciría un aumento de unos 11 cm en la altura del nivel de agua. Suponiendo una capacidad de 150.000 m<sup>3</sup> para la cantera, este aumento supone un incremento en la presión intersticial de 0,01 Kp/cm<sup>2</sup>, que no es significativo respecto al conjunto analizado.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE EL TALUD

Una vez caracterizados los materiales existentes en el área de estudio, estudiadas las tipologías de inestabilidad que se pueden producir, los factores de seguridad y sus posibles causas se llega a las siguientes conclusiones:

El talud está compuesto fundamentalmente por un macizo rocoso de dolomías, en cuya cabecera existe un delgado depósito aluvial sobre el que se desarrolla un escaso suelo vegetal (la inestabilidad de este depósito es patente debido a los pequeños deslizamientos locales observados en estos materiales).

El macizo presenta estratificación de orden métrico de difícil determinación y un alto grado de tectonización a modo de pequeñas fallas locales que indican un movimiento relativo hacia el NW, así como numerosas familias de discontinuidades que condicionan claramente el comportamiento del macizo. En el momento de la visita al solar el talud se encontraba seco y se observaban regueros y erosión diferencial en su superficie.

La intensa tectonización que afecta a estos materiales hacen que, junto con las acciones antrópicas de explotación que en su tiempo afectaron a la cantera, hayan quedado delimitados bloques de roca de diversos tamaños con riesgo de desprendimiento en las paredes de los taludes.

Con el fin de caracterizar el tipo de inestabilidad que se da en el talud, se ha definido el macizo rocoso (matriz + discontinuidades), se ha determinado la calidad del mismo y se han analizado los diferentes tipos de inestabilidades.

En total se han definido 5 familias de discontinuidades.

Utilizando la clasificación SMR (Manuel R. Romana, 1993), se ha obtenido una calidad del talud de 46, lo que indica que la estabilidad pertenece a la clase III, de tipo normal, parcialmente estable, donde las inestabilidades más probables son las de tipo cuña, y que se necesita un tratamiento sistemático.

A partir del desarrollo del análisis de la estabilidad según la rotura en cuña y planar, se ha calculado el factor de seguridad del talud para: las condiciones actuales (en estado seco), para las condiciones sumergidas (embalse lleno) y para las condiciones saturadas (llenado y vaciado rápido del embalse).

Tipo de rotura	F.S. Condiciones secas	F.S. Condiciones saturadas
Cuña	2,05	0,12
Planar	1,5	1,3

De estos datos se deduce que el talud se encuentra al límite de la estabilidad para el caso de roturas en cuña en las condiciones actuales (estado seco) mientras que es inestable en condiciones saturadas. Siempre es inestable frente a la rotura planar.

Aunque en condiciones saturadas el talud es inestable para cuñas, no es probable la formación de grandes cuñas de material deslizante que pudieran afectar al camino de acceso a la vivienda particular, situado en la cabecera del talud considerado.

En condiciones secas, las causas posibles de las inestabilidades se deben:

- Configuración geométrica de las familias de discontinuidades y su interrelación.
- La acción mecánica de la maquinaria durante el proceso de excavación que en su día sufrió la cantera. Esto produjo vibraciones y un sobreesfuerzo al arrancar al roca, lo que ha propiciado aperturas en las discontinuidades que afloran hacia la superficie del talud generado.
- Procesos de deterioro superficial progresivo por acción directa de la lluvia, la escorrentía y los agentes geomorfológicos externos (heladas, ciclos estacionales de temperatura y humedad).

En condiciones saturadas es la presión intersticial la que provoca una disminución de los parámetros resistentes que gobiernan el comportamiento en las discontinuidades del material. Esta afección se traduce en una disminución de la componente normal del peso  $s'_n$  en el plano de la discontinuidad y una apertura asociada al incremento de la presión.

La caída de material al embalse aunque provoca un incremento del nivel del agua, éste no es significativo debido a las grandes dimensiones de la cantera respecto al posible bloque deslizado.

Dado el objetivo final es asegurar la estabilidad del talud estudiado, para las condiciones que se van a dar en la cantera de Coma de S'Aigua, se recomienda adoptar las siguientes medidas preventivas:

- Saneamiento de la superficie del talud hacia la cabecera, donde presumiblemente llegará el nivel de agua una vez llena la cantera, para minimizar los posibles desprendimientos de los materiales tipo suelo (suelo vegetal y depósito aluvial).
- Saneamiento de las zonas de la superficie del talud donde exista mayor riesgo de desprendimientos. Las zonas donde se han realizado las estaciones mecánicas T2BE-4 Y T2BE-5, parecen presentar menor inestabilidad que las zonas donde se han realizado las estaciones T2AE-1, 2 y 3.  
Se recomienda realizar una limpieza manual de los pequeños bloques sueltos situados a media ladera. Como medida de corrección para estos procesos superficiales se aconseja el uso de mallas metálicas de guiado de piedras (mallas de triple torsión).
- En el caso del talud analizado y para las familias que provocan inestabilidad, los valores de  $I_v$  (juntas por  $m^3$ ) son menores de 2,5, lo que indica la existencia de grandes bloques que requerirían, según las recomendaciones dadas por M.R.Romana (1993), un tratamiento mediante bulonado puntual. Además el mismo autor aconseja el uso de redes.

- Mientras que la zona A del talud, podría tratarse exclusivamente mediante el uso de redes, la zona B, además, requeriría el uso de algún bulonado puntual.
- El llenado y vaciado del embalse ha de realizarse de forma lenta de modo que de tiempo a una correcta disipación de las presiones intersticiales.

**ANA M<sup>a</sup> FERNÁNDEZ MOLERO**  
**Geóloga colegiada nº 3.982**

**BORJA LÓPEZ RALLO**  
**Director Dpto. Técnico**  
**Geólogo colegiado nº 3.316**

**26 de Septiembre de 2006**

Este informe consta de 41 páginas y un conjunto de anexos (18 figuras numeradas, los partes de ensayos y los anejos de cálculo).

La información contenida en este documento es confidencial.

El acceso, divulgación, copia, o distribución del mismo por personas no autorizadas queda prohibido y puede ser ilegal. Asimismo, se aclara que las opiniones o recomendaciones contenidas en el documento se entienden sujetas a los términos y condiciones expresadas en el mismo.



# ANEXO

GEOLOGIA DE MALLORCA S.L.  
Vial 3, nave 2B. Pol. Son Llaüt. Sta. Maria  
Tlf: 971 62 09 09. Fax: 971 62 09 08

TÍTULO DE LA FIGURA: CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TALUD 2

TALUD Nº: 2      FECHA: 06/09/06      TEC. RESPONSABLE: ANA FERNÁNDEZ

EXP. Nº 1304/06      SITUACIÓN: CANTE RA COMA DE S' AIGUA      TERMINO MUNICIPAL: CAMPANET

**GEOMETRÍA**

LONGITUD: 175 M      DIRECCIÓN DEL TALUD: N168E  
ALTURA MÁXIMA: 17,2 m      PENDIENTE (Ángulo y sentido): 68°W

**GEOLOGÍA**

LITOLÓGIA: Dolomías, brechas dolomíticas.

ESTRUCTURA: ESTRATIFICACIÓN  PLIEGUES  FALLAS

**PRESENCIA DE AGUA**

Seco     Húmedo     Mojado     Goteando     Fluyendo

**PRESENCIA DE VEGETACIÓN**

En la parte superior     A media ladera     Al pie

**PROBLEMAS EROSIVOS**

Regueros     Carcavas     Sifonamientos     Socavación del pie     Erosión diferencial     Erosión alveolar

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA**

ESTACIONES GEOMECÁNICAS EN SUELOS Nº:

ESTACIONES GEOMECÁNICAS EN ROCAS Nº: 1 a 5

**ESTADO ACTUAL**

EQUILIBRIO: Estable     Estricto     Crítico

EVOLUCIÓN: Nula     Progresiva

**EVIDENCIAS DE MOVIMIENTOS**  Sin evidencias

- |                                                                                                             |                                                                                                         |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Ruptura pendiente y acumulación mat pie talud                           | <input type="checkbox"/> Presencia grietas tracción                                                     |
| <input type="checkbox"/> Laderas escalonadas y agrietadas con escarpes                                      | <input type="checkbox"/> Hundimientos o subsidencias                                                    |
| <input checked="" type="checkbox"/> Bloques caídos a pie de acantilados o escarpes                          | <input type="checkbox"/> Drenaje desordenado o ausencia del mismo (encharcamientos, surgencias)         |
| <input checked="" type="checkbox"/> Planos inclinados lisos rocosos con aspecto fresco y bloques deslizados | <input type="checkbox"/> Superficies vasculadas                                                         |
| <input type="checkbox"/> Daños en infraestructuras y construcciones                                         | <input type="checkbox"/> Vegetación arbustiva perpendicular a la pendiente, sin conservar verticalidad. |

**TIPOS DE MOVIMIENTOS**

- |                                                            |                                                       |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> Desprendimientos       |                                                       |
| <input checked="" type="checkbox"/> Vuelcos                |                                                       |
| <input checked="" type="checkbox"/> Deslizamiento plano    | } Deslizamiento traslacional                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> Rotura de cuñas        |                                                       |
| <input type="checkbox"/> Deslizamiento circular/rotacional |                                                       |
| <input type="checkbox"/> Reptaciones                       |                                                       |
| <input type="checkbox"/> Flujos de barro                   | <input type="checkbox"/> Flujos de tierra y derrubios |
| <input type="checkbox"/> Avalanchas                        |                                                       |

ESQUEMA Y OBSERVACIONES: Ver figura Nº 16

MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN EXISTENTES

GEOMETRICAS Y DE PROTECCIÓN

- Tacones de tierra o escollera al pie del talud.
- Descabezamiento parte superior del talud
- Bermas
- Siembra de taludes
- Hormigón proyectado
- Muro de revestimiento
- Mallas de guiado de piedras
  - Mallas colgadas
  - Mallas adosadas
- Pantallas estáticas de protección
  - Caballones de tierra
  - Muros de hormigón
  - Muros de gaviones
  - Pantallas de perfiles laminados y listones de madera dura
  - Pantallas metálicas
- Pantallas dinámicas de protección
- Otros: Ninguna

DE DRENAJE

- Zanjas de drenaje en cabecera
- Zanjas de drenaje a media ladera
- Zanjas de drenaje en el pie
- Drenes horizontales (d. californianos)
- Mechinales
- Otros:

DE CONTENCIÓN Y SOSTENIMIENTO

- Anclajes
  - Bulones (< 15 m)
  - Cables
- Muro de sostenimiento
- Muro de contención
  - Muros de hormigón
    - De gravedad
    - Aligerados
  - Muro de gaviones
  - Muro de escollera
  - Muro de jaula o jardinera
  - Muro de tierra armada
  - Otros muros:
- Muros de apeo
- Pilotes
- Pantallas
- Otros:

MEDIDAS DE ESTABILIZACIÓN PROPUESTAS

Sólo es necesario mantenimiento

GEOMETRICAS Y DE PROTECCIÓN

- Tacones de tierra o escollera al pie del talud.
- Descabezamiento parte superior del talud
- Bermas
- Siembra de taludes
- Hormigón proyectado
- Muro de revestimiento
- Mallas de guiado de piedras
  - Mallas colgadas
  - Mallas adosadas
- Pantallas estáticas de protección
  - Caballones de tierra
  - Muros de hormigón
  - Muros de gaviones
  - Pantallas de perfiles laminados y listones de madera dura
  - Pantallas metálicas
- Pantallas dinámicas de protección
- Otros: Saneamiento superficial

DE DRENAJE

- Zanjas de drenaje en cabecera
- Zanjas de drenaje a media ladera
- Zanjas de drenaje en el pie
- Drenes horizontales (d. californianos)
- Mechinales
- Otros:

DE CONTENCIÓN Y SOSTENIMIENTO

- Anclajes
  - Bulones (< 15 m)
  - Cables
- Muro de sostenimiento
- Muro de contención
  - Muros de hormigón
    - De gravedad
    - Aligerados
  - Muro de gaviones
  - Muro de escollera
  - Muro de jaula o jardinera
  - Muro de tierra armada
  - Otros muros:
- Muros de apeo
- Pilotes
- Pantallas
- Otros:





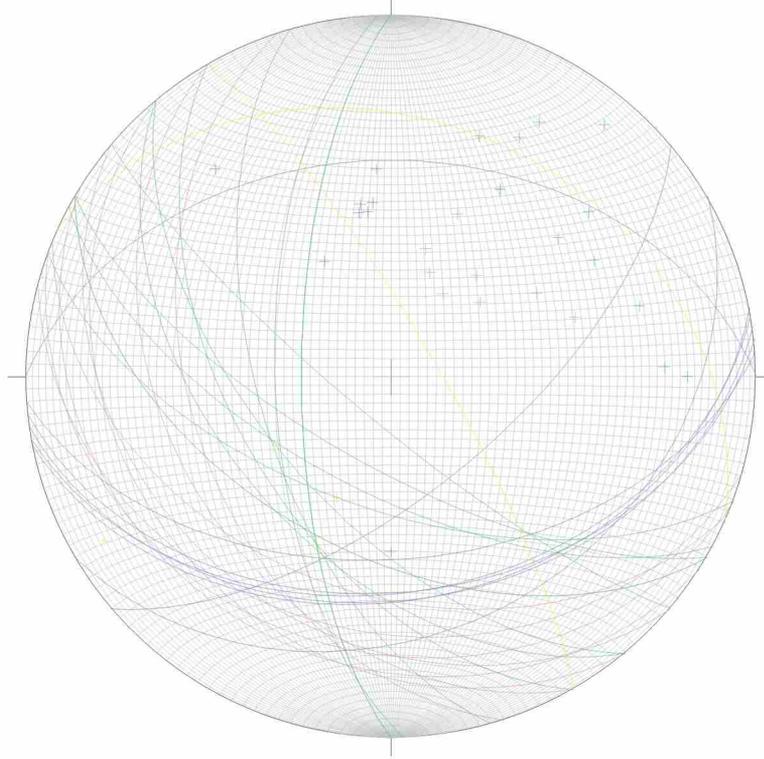






N

REPRESENTACIÓN DE PLANOS Y POLOS

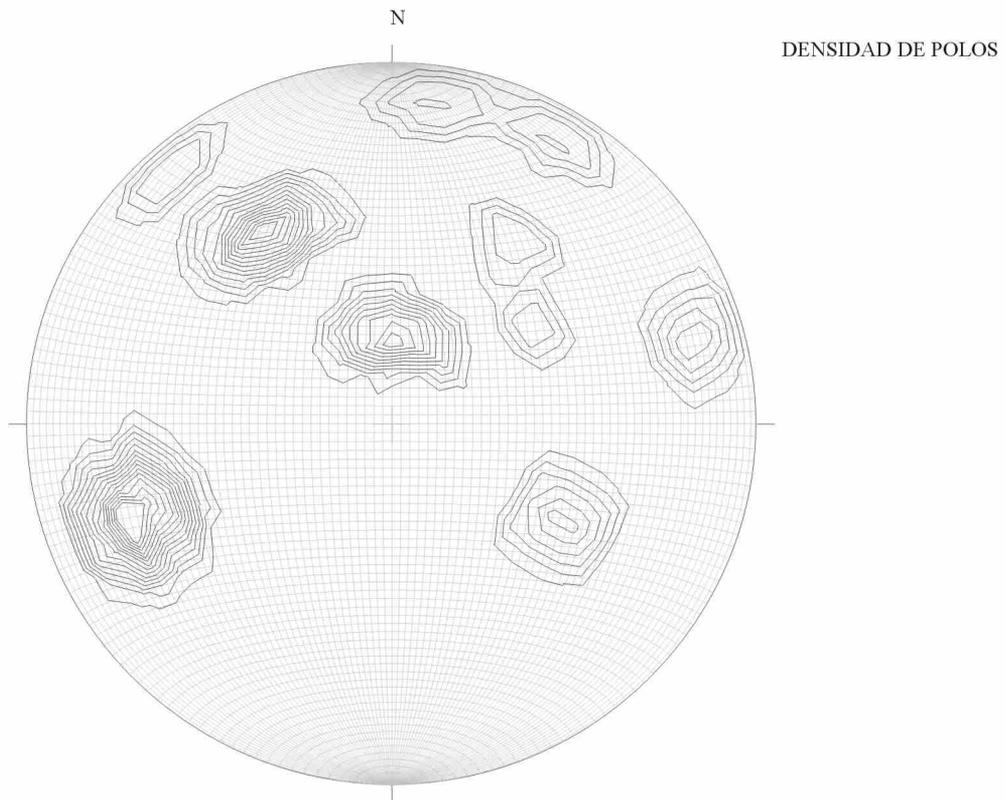
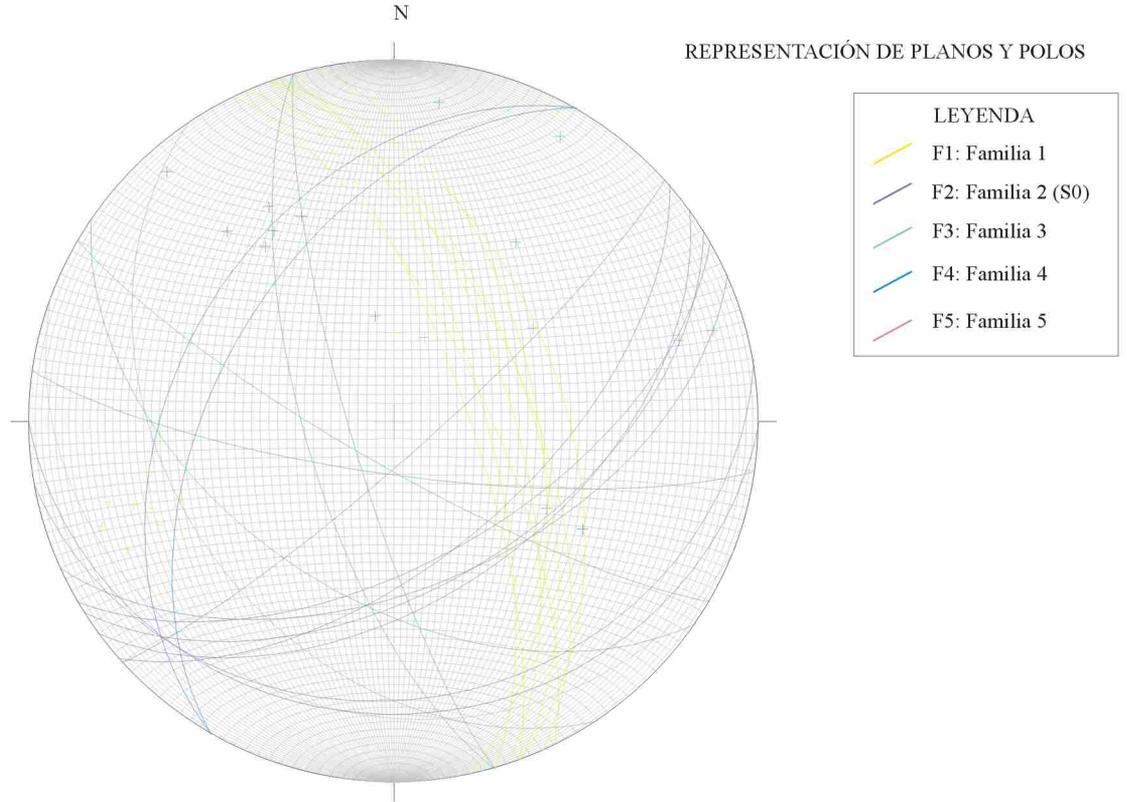


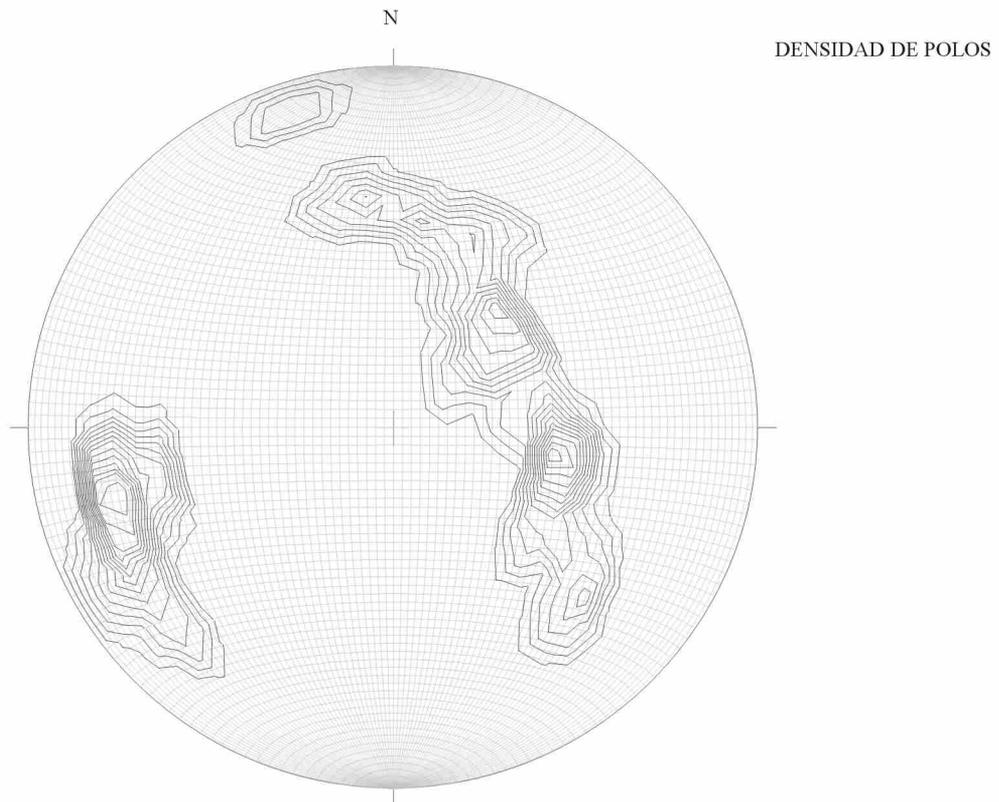
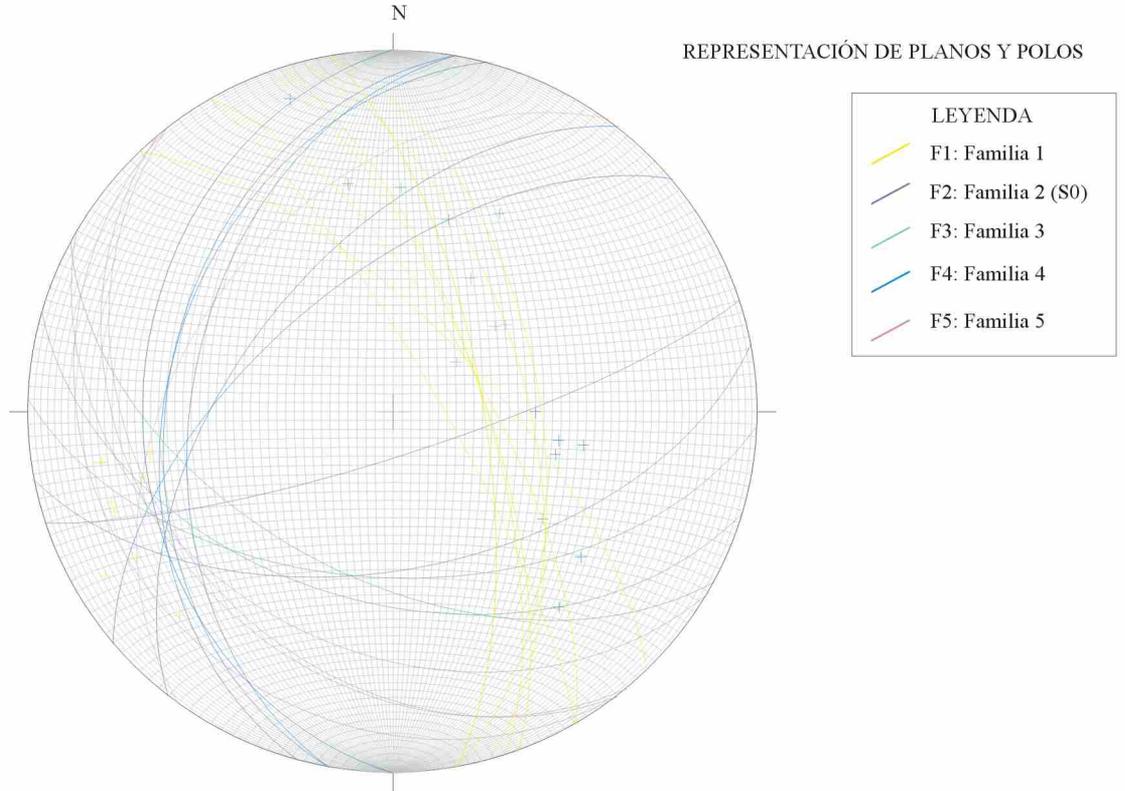
LEYENDA	
	F1: Familia 1
	F2: Familia 2 (S0)
	F3: Familia 3
	F4: Familia 4
	F5: Familia 5

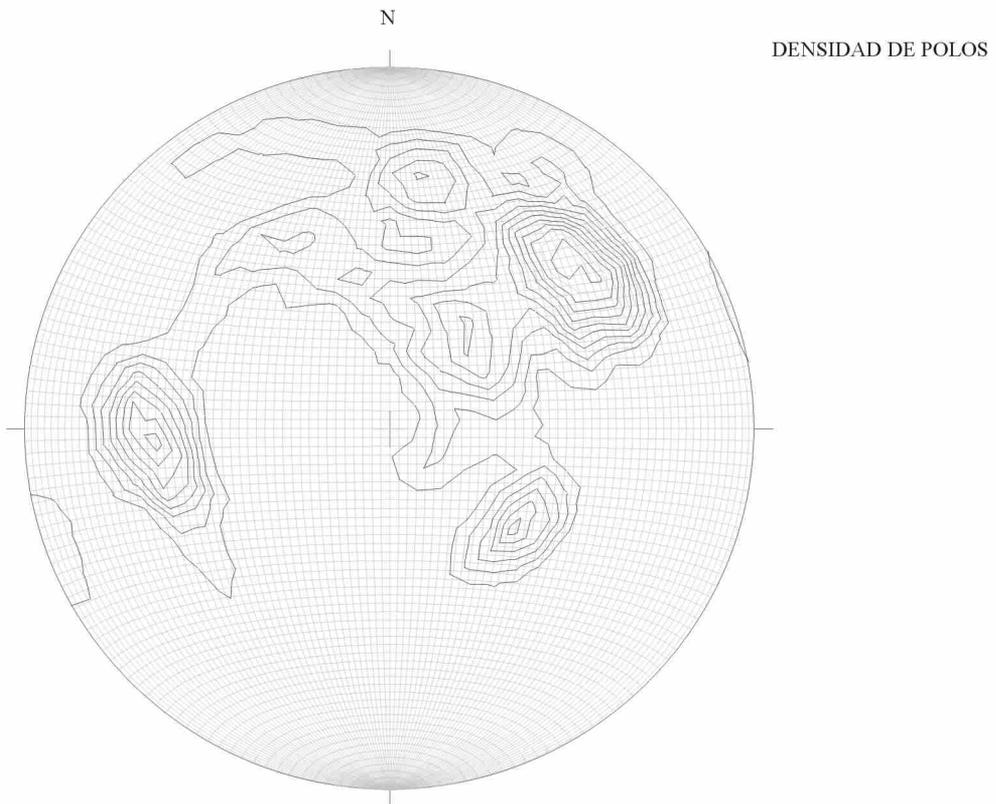
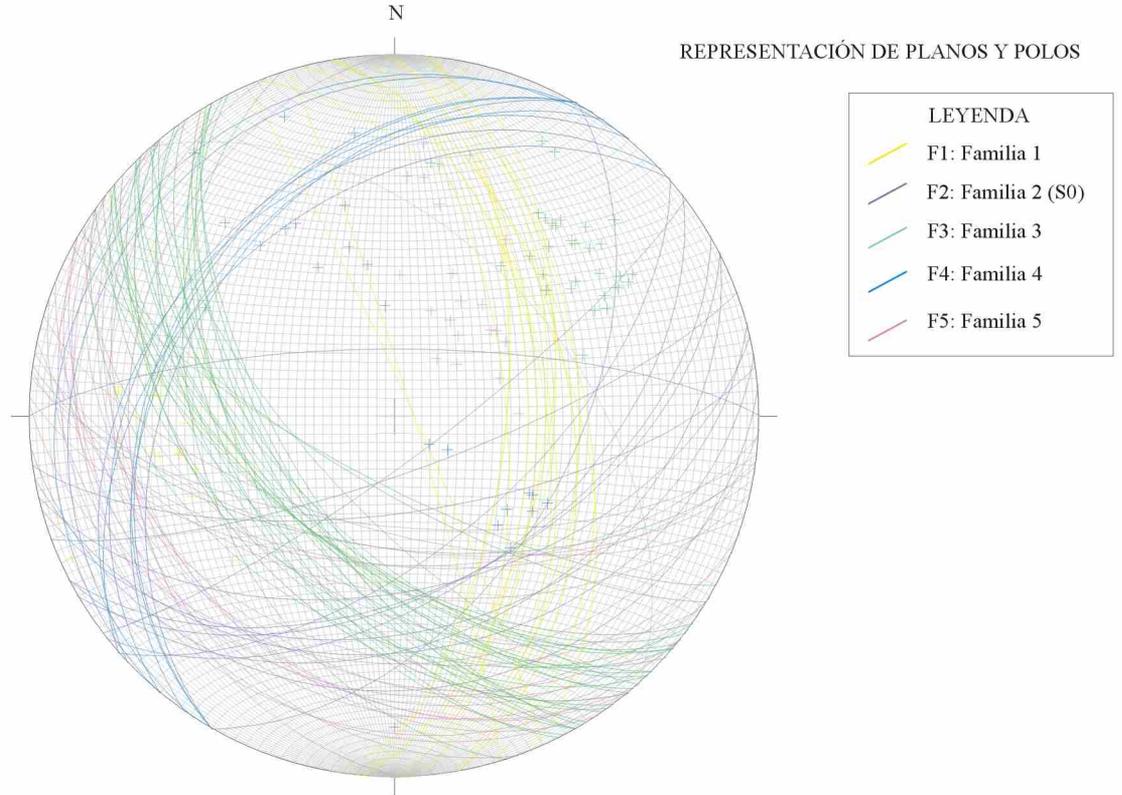
N

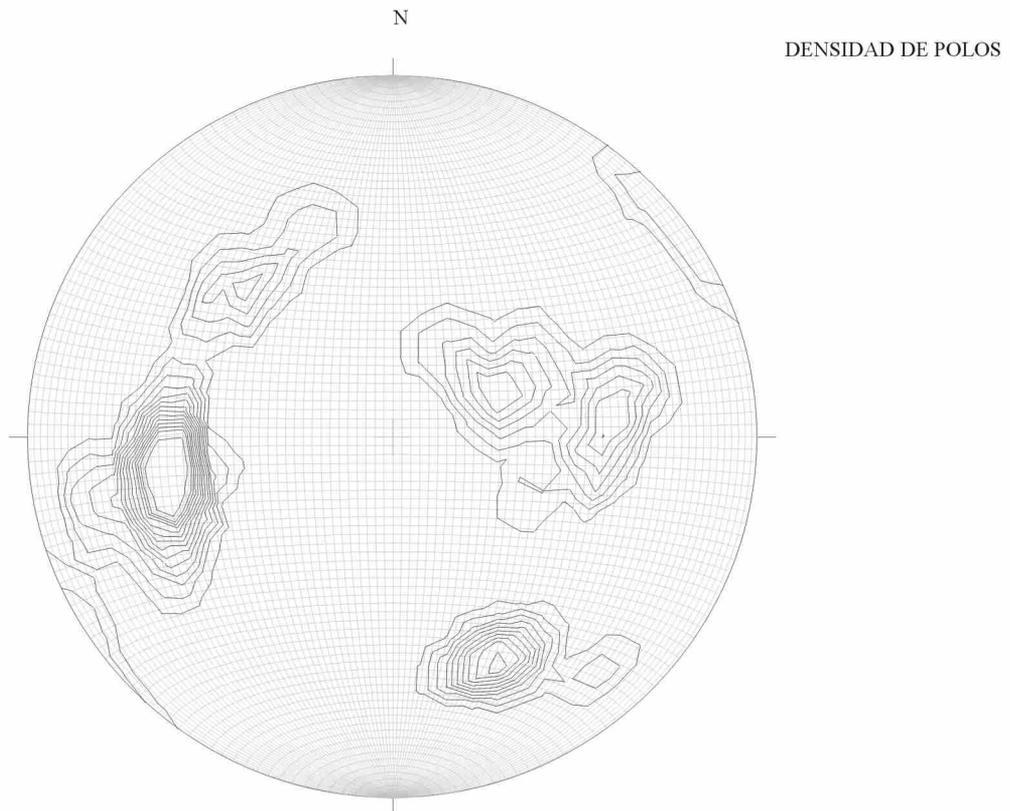
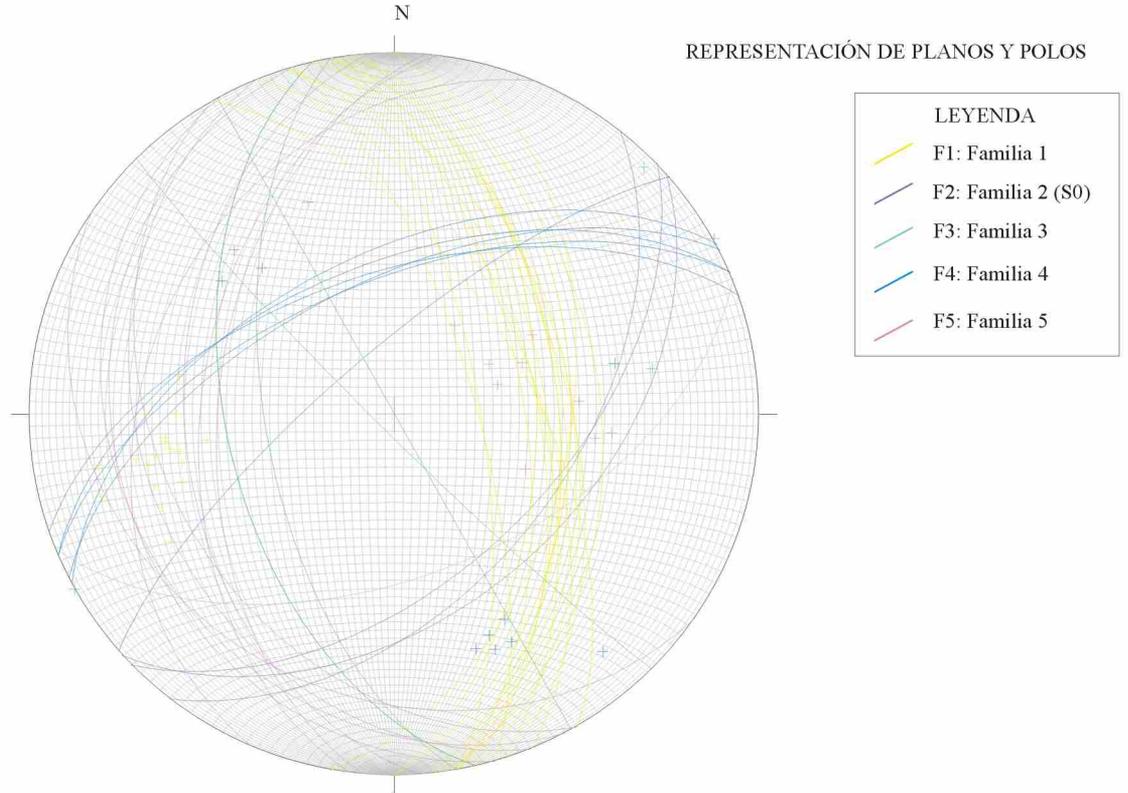
DENSIDAD DE POLOS



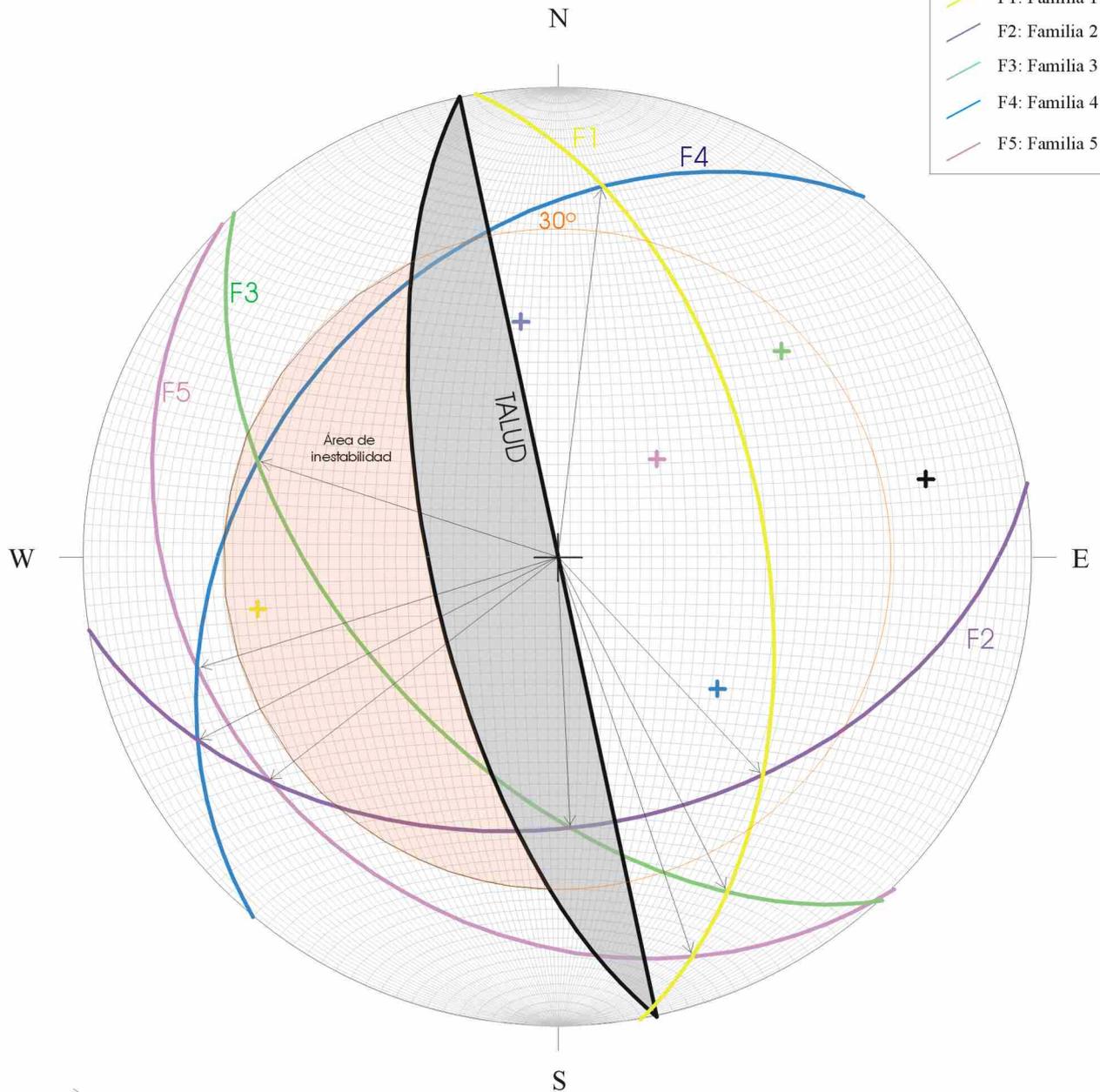








REPRESENTACIÓN DE PLANOS DEL CONJUNTO DEL TALUD



- LEYENDA
- F1: Familia 1
  - F2: Familia 2 (S0)
  - F3: Familia 3
  - F4: Familia 4
  - F5: Familia 5

- Línea de intersección entre planos  
Dirección de movimiento de las cuñas
- Representación planar de las familias de discontinuidades
- Representación del ángulo de rozamiento del macizo
- Área de inestabilidad para las roturas en cuña