

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE GRANDES DESLIZAMIENTOS. APLICACIÓN AL CASO DE VALLCEBRE.

4.1 Introducción

El análisis de grandes deslizamientos mediante SIG (ARC/INFO) se aborda aquí mediante la aproximación determinista del talud infinito. Los métodos determinísticos de análisis de la estabilidad de una ladera incluyen métodos de equilibrio límite y modelos numéricos. Los modelos basados en el principio del equilibrio límite calculan la relación entre fuerzas resistentes y las fuerzas inestabilizadoras en el talud (Bromhead, 1986). En deslizamientos de tipo traslacional se trabaja con el modelo del talud infinito debido a su simplicidad, resolviendo la ecuación de equilibrio de un bloque que desliza sobre un plano inclinado.

En los últimos años los SIG han permitido incorporar los métodos determinísticos para el análisis de la estabilidad de las laderas. Según Van Westen (1994) los valores resultantes de estos análisis de estabilidad, normalmente expresados como factor de seguridad, no se deben usar como valores absolutos, antes bien son valores indicativos que se pueden usar para evaluar diferentes escenarios de superficie de deslizamiento y de profundidad del nivel piezométrico.

En este capítulo se aplica el modelo del talud infinito de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre para calcular la estabilidad en base al factor de seguridad, calculado este último celda a celda de una malla regular. Por tanto aquí no se va a regionalizar el análisis, sino que se aplicará únicamente a un deslizamiento. El capítulo consta, por un lado, de la descripción del procedimiento y la hipótesis de rotura para aplicar, seguidamente, la metodología al deslizamiento de Vallcebre. Los resultados se contrastarán con las observaciones sobre el terreno y se validarán con los obtenidos mediante el programa de análisis de estabilidad PC-STABL-5M.

4.2 Análisis de susceptibilidad del talud infinito: cálculo del factor de seguridad celda a celda en grandes deslizamientos

4.2.1 Hipótesis de rotura: rotura plana en talud infinito

Cuando la superficie de rotura de un deslizamiento es sensiblemente paralela a la del terreno y la profundidad del deslizamiento es pequeña comparada con su longitud, se puede aplicar la hipótesis del talud infinito. El desarrollo que se describe a continuación se basa en Alonso (1989).

En una situación como en la de la figura 4.1 se alcanzará una situación inestable en el plano de rotura PP' situado a una profundidad d, cuando la tensión de corte (τ) existente en este plano sea igual a la resistencia al corte disponible. De esta manera, según la expresión de Mohr-Coulomb, en tensiones efectivas, se necesita conocer la tensión normal (σ) y la presión de agua (p_w) para obtener la tensión de rotura (τ_f) en el plano. El coeficiente o Factor de Seguridad (F_τ) se define como el cociente entre la resistencia al corte disponible y la tensión de corte:

$$F_\tau = \tau_f / \tau$$

Al definir el talud como talud infinito se puede considerar que todos los planos verticales son equivalentes a sí mismos, en donde las fuerzas E y E' ejercidas a ambos lados de dos secciones verticales próximas serán iguales y de sentido contrario (figura 4.1). Ello nos permite resolver de forma simple el estado de tensiones en la base de un elemento a-b-c-d proyectando el peso W sobre la superficie de rotura (figura 4.1).

$$\tau = W \operatorname{sen} i = b.d.\gamma . \operatorname{sen} i = \gamma d \operatorname{sen} i \operatorname{cos} i$$

$$\sigma = W \operatorname{cos} i = b.d.\gamma . \operatorname{cos} i = \gamma d \operatorname{cos}^2 i$$

Obteniendo la fórmula del Factor de Seguridad en talud infinito como:

$$F_\tau = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + (\sigma - p_w) \operatorname{tg} \phi}{\tau} = \frac{c' + (\gamma d \operatorname{cos}^2 i - p_w) \operatorname{tg} \phi}{\gamma d \operatorname{sen} i \operatorname{cos} i}$$

donde:

c' = cohesión

ϕ = ángulo de rozamiento interno

γ = peso específico del terreno

d = profundidad de la superficie de rotura

i = pendiente de la superficie de rotura

p_w = presión del agua

Y a su vez, la presión del agua en los poros se puede expresar como:

$$P_w = \gamma_w * h_w$$

donde:

γ_w = peso específico del agua

h_w = altura piezométrica sobre la superficie rotura

4.2.2 El modelo del talud infinito aplicado a un SIG

El objetivo final de este análisis de susceptibilidad de tipo determinístico es disponer de un mapa que refleje el grado de estabilidad de la ladera, definido por el Factor de

Seguridad en cada celda. El Factor de Seguridad (F) expresa la relación entre las fuerzas resistentes del terreno y las inestabilizadoras. Valores de F superiores a 1 indican condiciones estables, y valores menores de 1 indican condiciones inestables. Cuando $F = 1$ la ladera o el talud se encuentra en el punto de rotura.

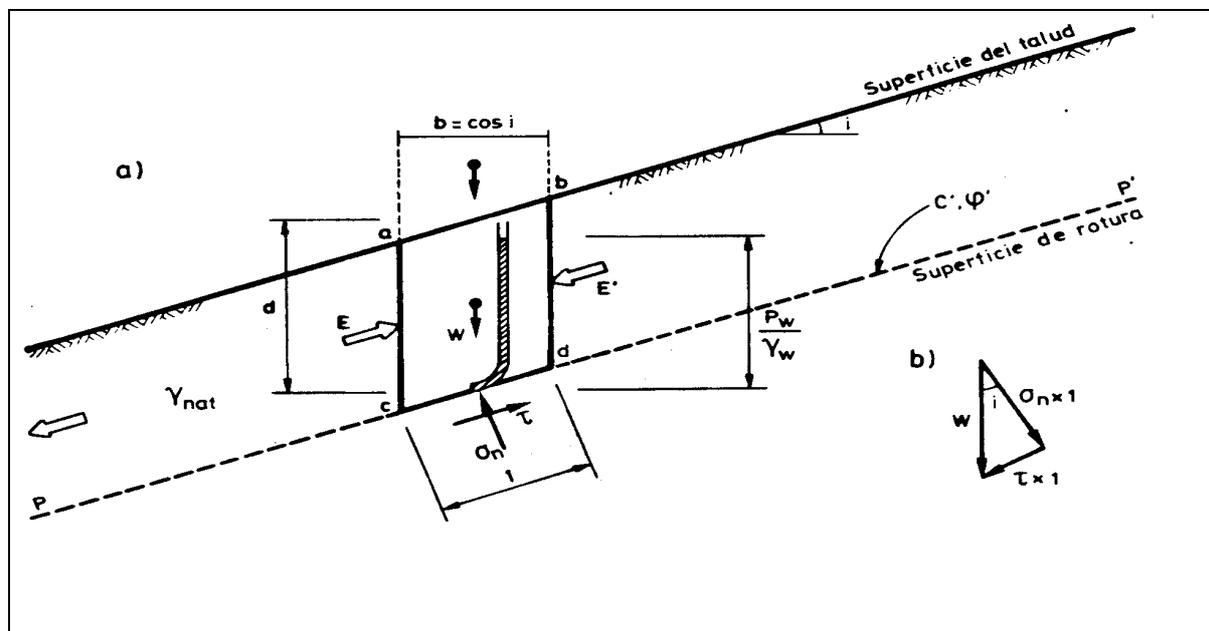


Figura 4.1: Diagrama para el análisis de la estabilidad de un talud infinito en deslizamiento plano, (el esquema b muestra las tensiones normal y tangencial sobre la superficie de rotura). Para leyenda ver texto.

Entre los distintos procedimientos que existen para calcular el Factor de Seguridad en deslizamientos traslacionales el más simple es el que considera el talud infinito. Este análisis se puede integrar en un Sistema de Información Geográfica, considerando el deslizamiento formado por un conjunto de unidades (celdas de una malla regular). El cálculo de las fuerzas resistentes e inestabilizadoras se realiza en cada celda para, posteriormente, realizar un cálculo global. Las interacciones con las celdas vecinas no se consideran y el resultado es un mapa de valores del factor de seguridad (Van Westen, 1997).

4.2.3 Datos necesarios para realizar el análisis

Los datos que se necesitan para realizar este tipo de análisis (teniendo en cuenta la expresión del talud infinito vista en el apartado 4.2.1) son:

- 1- Situación de la superficie de rotura del deslizamiento
- 2- Posición del nivel piezométrico relativo del terreno que se utilizará para el análisis
- 3- Parámetros resistentes del terreno (cohesión, ángulo de fricción y pesos específicos del terreno)
- 4- Límites del deslizamiento
- 5- Un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) que abarque todo el deslizamiento

Los datos sobre la superficie de rotura pueden consistir en puntos aislados que luego servirán para interpolar la superficie, o bien, la superficie en si misma si se dispone de esta información. Lo mismo sucede con los datos del o de los niveles piezométricos (en el caso

que se analice más de un nivel). Los parámetros resistentes del terreno se pueden calcular a partir de ensayos en el laboratorio aunque también se pueden utilizar datos estimados. Estos parámetros pueden ser uniformes en todo el deslizamiento o bien pueden variar por zonas, debiendo tener en cuenta este fenómeno en su caso. La información sobre la geometría del deslizamiento se utiliza dado que se determinará el factor de seguridad para el conjunto del deslizamiento. Finalmente el MDE se utiliza para calcular los parámetros necesarios como pendiente, grosor saturado sobre la superficie de rotura y profundidad de la superficie de rotura, así como modelo de referencia para calcular las cotas de las superficies utilizadas.

4.2.4 Procedimiento de análisis

El procedimiento para calcular la susceptibilidad a la estabilidad en base al factor de seguridad celda a celda mediante un SIG sigue los cinco pasos siguientes (figura 4.2):

- 1- Introducción de los datos necesarios en el SIG
- 2- Generación de las superficies de rotura y piezométrica mediante interpolación
- 3- Creación de variables (parámetros) utilizadas para el análisis del Factor de Seguridad
- 4- Cálculo del Factor de Seguridad
- 5- Validación de los resultados

1. Introducción de los datos en el SIG

Los datos disponibles se introducen en el SIG realizando la topología correspondiente, puesto que estarán en estructura vectorial.

2. Creación de superficies mediante interpolación

Las superficies necesarias para el cálculo del factor de seguridad según el método del talud infinito, y utilizando el procedimiento descrito aquí son básicamente dos:

- la superficie de rotura
- la superficie piezométrica

El MDE también es una superficie necesaria para el cálculo. Para interpolar las superficies de rotura y piezométrica se utilizará información sobre la geometría del deslizamiento que limita el área a interpolar, área que se utilizará en el análisis posterior.

3. Creación de variables utilizadas para el análisis de estabilidad

Una vez se dispone de las superficies interpoladas de la rotura del deslizamiento, el nivel piezométrico y la superficie del terreno (MDE) se calculan, derivándolas de éstas últimas, las siguientes variables:

- 1- Pendiente de la superficie de rotura.
- 2- Profundidad de la superficie de rotura: se calcula restando a la altitud de la superficie del terreno (MDE) la de la superficie de rotura interpolada.

3- Grosor saturado sobre la superficie de rotura: se obtiene de restar a la altura piezométrica la cota de la superficie de rotura.

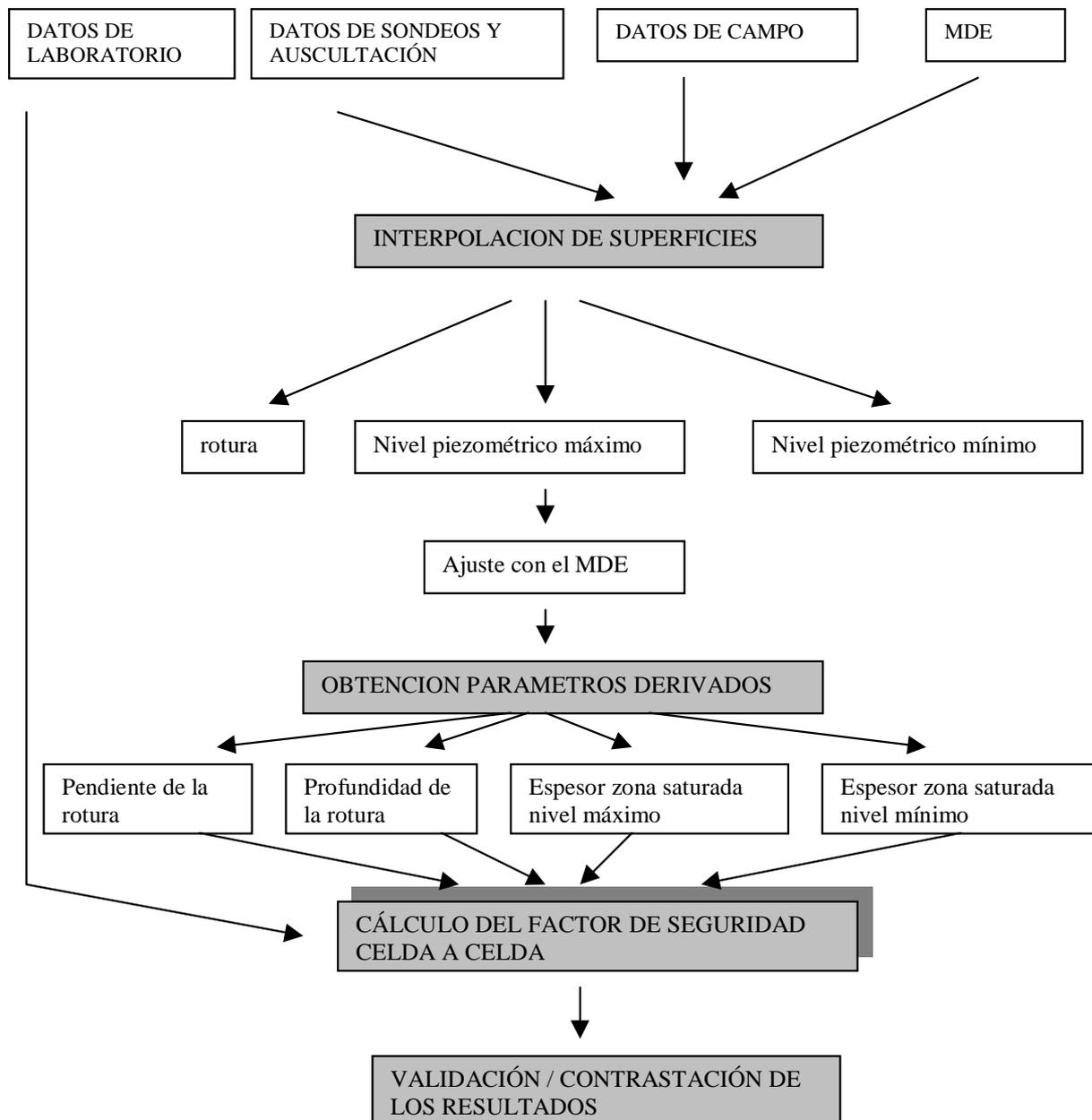


Figura 4.2: Diagrama de flujo del procedimiento utilizado para el cálculo del factor de seguridad celda a celda.

4. Cálculo del factor de seguridad

Una vez se tienen los datos necesarios se calculan las fuerzas resistentes y las inestabilizadoras en cada celda mediante un algoritmo para obtener el factor de seguridad. Posteriormente, se realiza una evaluación global del deslizamiento basada en el sumatorio (con el signo correspondiente) de todas las fuerzas resistentes y de todas las inestabilizadoras, calculando para finalizar, el factor de seguridad global.

5. Validación de los resultados

Los resultados obtenidos deben validarse y contrastarse con las observaciones y datos que se tienen del comportamiento del deslizamiento.

4.3 El deslizamiento de Vallcebre

4.3.1 Descripción del deslizamiento de Vallcebre

El deslizamiento de Vallcebre se localiza en la cuenca alta del río Llobregat (PrePirineo Oriental), a 140 km al Norte de Barcelona (foto 4.1). El deslizamiento se extiende en la ladera oriental de los torrentes Vallcebre y Llarg (figura 4.3) y es de tipo traslacional (traslational slide) con espesores mínimos de 12 m y unas dimensiones de 1300 metros de longitud y 600 metros de ancho (Corominas et al., 1999; Corominas et al., 1998). El deslizamiento tiene forma telescópica y está constituido por cuatro unidades principales de grosor decreciente hacia el pie del movimiento. Cada unidad está limitada por un escarpe de decenas de metros de salto. Al pie de cada escarpe, aparece una zona de extensión que origina un graben.

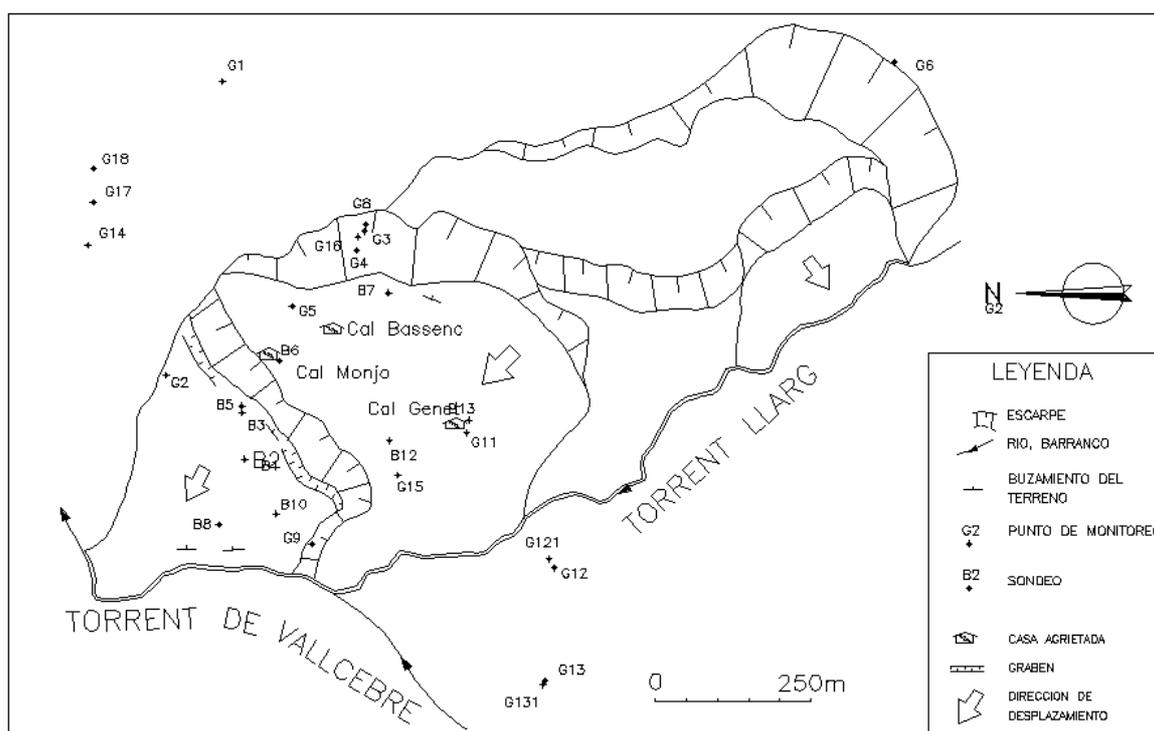


Figura 4.3 : Esquema geomorfológico del deslizamiento de Vallcebre.

La dirección tanto de los escarpes como de los grabens sugiere un movimiento hacia el Noroeste. Una dirección secundaria del movimiento, hacia el torrente Llarg, se observa también en las unidades superiores. La mayor parte del área activa en la actualidad, es la unidad inferior, cuya estabilidad será analizada en este capítulo. Esta unidad está limitada por

el lado SW por los torrentes Vallcebre y Llarg, y en su lado NE por una superficie lateral de cizalla perfectamente definida.

Entre Julio de 1996 y Marzo de 1997 se perforaron 5 sondeos en la unidad inferior del deslizamiento que se equiparon con inclinómetros (foto 4.2), piezómetros (foto 4.3) y extensómetros (foto 4.4). Los testigos de sondeo han mostrado que el espesor de la unidad inferior oscila entre 12 y 20 m. La superficie de rotura del deslizamiento se obtuvo a partir de los resultados de las lecturas de inclinómetro. Ésta presenta una inclinación media de 10° hacia el torrente de Vallcebre y es aproximadamente paralela a la superficie del terreno.

Mediante la interpretación de los testigos de los sondeos, cartografía superficial y datos de estudios geofísicos se ha definido la estructura geológica del deslizamiento (ver figura 4.4). Los materiales aflorantes en la zona son calizas lacustres y limolitas arcillosas rojas del Cretácico Superior-Paleogeno Inferior. Los materiales se encuentran afectados por fallas inversas y algunos pliegues asociados. Una de las fallas discurre por debajo del deslizamiento presentando un salto vertical de unos 10 m. El material que se desplaza, consiste en una serie de capas de arcillitas con yeso y arcillas laminadas. Por debajo se encuentra una gruesa barra de calizas con pendiente aproximada de 10° . De la base al techo el material incluye: arcillas densamente fisuradas de 1 a 6 m de espesor; lentejones de yeso de 5 m de espesor y varias decenas de metros de longitud; y arcillas limosas ricas en vainas y micronodulos de yeso. Además de estas capas, en las zonas de extensión localizadas al pie de los escarpes se puede encontrar coluviones compuestos de gravas con matriz limosa. En el centro del deslizamiento los materiales están plegados, formando un sinclinal orientado WNW-ESE e inclinado hacia el WNW de forma más o menos paralela a la pendiente de la ladera. (Corominas et al., 1998; Gili et al., 2000).



Foto 4.1: Vista frontal del deslizamiento de Vallcebre.



Foto 4.2: Inclinómetro de un sondeo del deslizamiento de Vallcebre.



Foto 4.3: Piezómetro instalado en un sondeo del deslizamiento de Vallcebre.

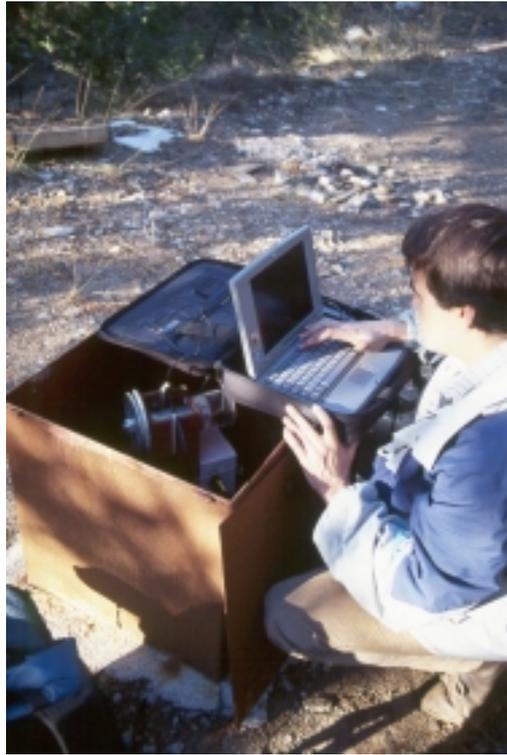


Foto 4.4: Extensómetro y recogida de datos.

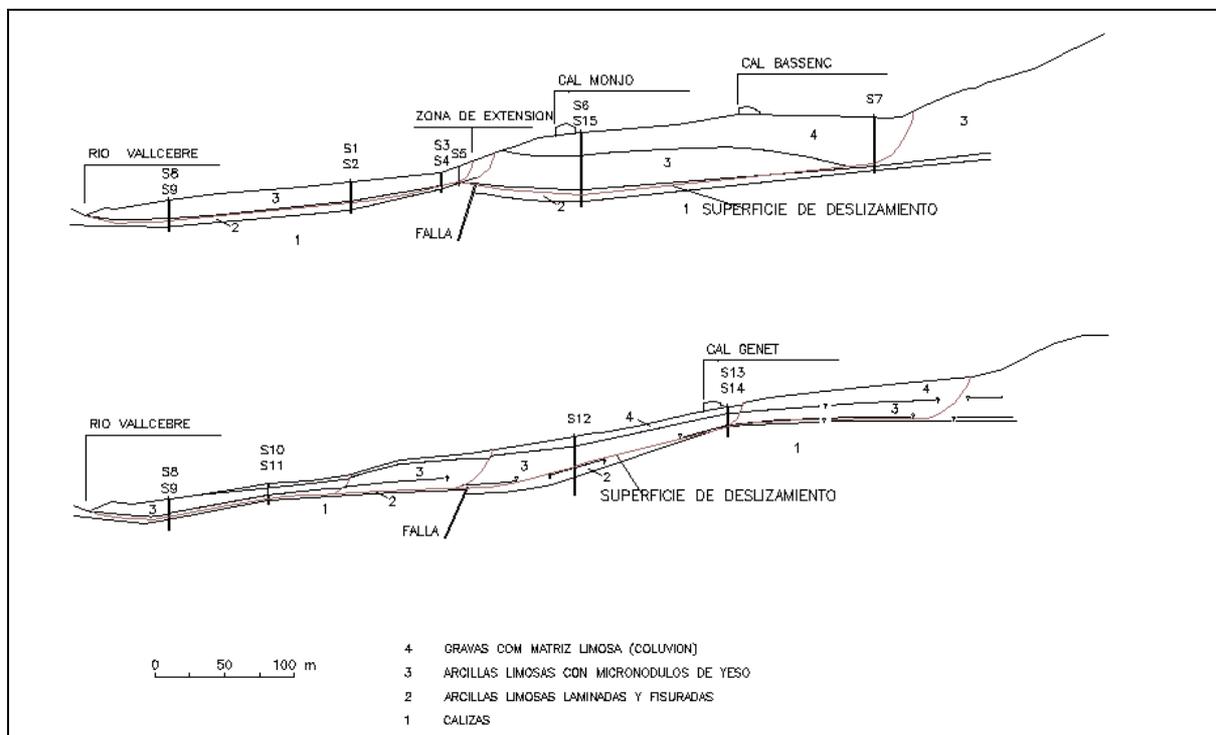


Figura 4.4: Perfiles transversales deducidos a partir de los sondeos mecánicos de la unidad media e inferior del deslizamiento de Vallcebre (de Ledesma et al., 1997).

4.3.2. Dispositivo de auscultación del deslizamiento de Vallcebre

Desde 1987 el deslizamiento de Vallcebre ha sido auscultado utilizando estudios convencionales y fotogrametría (Gili y Corominas, 1992). Desde 1996 se llevan a cabo mediciones sistemáticas cada 20 minutos de precipitaciones, cambios en el nivel del agua subterránea y desplazamientos. Las lecturas con los inclinómetros se hacían cada dos o tres semanas hasta que quedaron fuera de uso. Los desplazamientos superficiales de los puntos bajo control, se han medido con GPS al menos una vez cada dos meses (foto 4.5). Mas detalles sobre el deslizamiento, la auscultación y trabajo de campo se pueden consultar en Corominas et al. (2000).



Foto 4.5: Dispositivo de control de desplazamientos con GPS.

Como ya se ha comentado, la unidad que se va a utilizar en el análisis de estabilidad es la inferior. Se utilizará la información obtenida de los sondeos instrumentados así como datos de ensayos de laboratorio (ángulo de fricción y peso específico del material) y dos posiciones del nivel de agua subterránea: un nivel piezométrico mínimo para el que el movimiento llega a pararse y otro máximo en el que se alcanzan las mayores velocidades de desplazamiento que han sido observadas.

4.4. Aplicación del análisis de estabilidad al deslizamiento de Vallcebre

Se ha seleccionado para el análisis de estabilidad la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre debido a que es la unidad más homogénea de todo el deslizamiento y donde se dispone de mayor información.

En este apartado se comentan los siguientes aspectos sobre el análisis de estabilidad:

- Parámetros del modelo y condiciones de contorno del deslizamiento
- Resultados del análisis de estabilidad
- Comparación de los resultados con los obtenidos mediante el programa STABL

El procedimiento seguido es el descrito en el apartado 4.2.3. y que se encuentra detallado para el deslizamiento de Vallcebre en el Anejo 4.

4.4.1. Parámetros del modelo y condiciones de contorno del deslizamiento

El MDE utilizado en el deslizamiento de Vallcebre tiene una resolución de 15 *15 m y corresponde a una pequeña área del MDE utilizado para el análisis de susceptibilidad a deslizamientos superficiales de la zona de Vallcebre (ver apartado 3.3.4.). La mayor parte de las operaciones del análisis de estabilidad se han realizado en formato raster.

Para resolver la ecuación de estabilidad del talud infinito para cada celda se requiere la definición de la superficie de rotura y de la posición del nivel del agua subterránea, parámetros que son continuos a lo largo del deslizamiento. La bondad del análisis de estabilidad se basa en la correcta determinación de la geometría del deslizamiento, los niveles de agua subterránea y los parámetros resistentes de los materiales. En este sentido el MDE se ha utilizado tanto como superficie de referencia a partir de la cual delinear las otras superficies, como para ajustar y corregir celdas con valores interpolados erróneos (como por ejemplo celdas con valores de superficie de rotura por encima de la superficie del terreno). En el Anejo 4 se pueden consultar los datos utilizados: sondeos, el MDE, las superficies interpoladas, así como la situación de los puntos utilizados para su interpolación, y el resto de parámetros derivados de estas superficies para el cálculo de estabilidad. En los siguientes párrafos se comentan aspectos relacionados con la obtención, mediante interpolación, de las superficies de rotura y piezométricas de la unidad inferior del deslizamiento.

Superficie de rotura

La superficie de rotura se ha establecido por interpolación de los datos de inclinómetros disponibles en la unidad inferior del deslizamiento (ver figura 4.3). Aunque el deslizamiento de Vallcebre puede ser considerado como un deslizamiento muy instrumentado, en este análisis se ha constatado que el número de puntos disponibles de la superficie de rotura, donde ésta es conocida, es insuficiente. Los resultados de la interpolación con las funciones de interpolación disponibles en ARC/INFO no tienen sentido en algunos puntos (por ejemplo, superficie de rotura que aparece en diversos lugares por encima del terreno). Por ello ha sido necesario incluir información adicional de observaciones de campo y de interpretación geológica, geomorfológica y hidrogeológica del deslizamiento. Además de esta información se han incluido “sondeos virtuales”, esto es, puntos con información de la interpretación del deslizamiento, para ayudar en los cálculos y resultados de la interpolación, de manera que la superficie interpolada se ajuste a la geometría que se espera de la misma.

Para ello se han identificado tres zonas de la unidad inferior del deslizamiento en las que, por el conocimiento que disponíamos, se podía añadir más información y mejorar la definición de la superficie interpolada:

- el pie del deslizamiento
- el límite norte
- el surco localizado al pie del deslizamiento

A lo largo del pie del deslizamiento la superficie de rotura aflora en contacto con el torrente de Vallcebre. El pie del deslizamiento forma un escarpe que es el resultado de la

erosión lateral del barranco (fotos 4.6 y 4.7). Allí, la profundidad de la superficie de rotura ha sido reducida drásticamente desde los 15 m, en el sondeo S-8, a 5-7 m, que es la altura del escarpe. Debido a la resolución del MDE (15x15 m) ha sido imposible dividir el escarpe, en cuanto a su espesor se refiere, entre distintas celdas. Esto implica que el espesor del deslizamiento a lo largo del pie es imposible determinarlo a partir de las propias celdas y debe ser incluido manualmente (ver figura 4.5). Hay que tener en cuenta que la morfología que constituye el escarpe del pie del deslizamiento no tiene por que quedar reflejada en el MDE, y más teniendo en cuenta el tamaño de las celdas que representan 225 m² de área cada una. Por eso, en el caso de utilizar puntos adicionales para la interpolación de la superficie de rotura en el pie del deslizamiento, si estos puntos corresponden directamente al valor de la elevación del MDE en una celda determinada, tienen una gran probabilidad de corresponder a la cota del barranco de Vallcebre, y no a la cresta del escarpe. Ello implica que hay que añadir puntos de manera manual con una elevación de 4-5 m superior a la del MDE en aquel lugar, para caracterizar esta morfología del pie del deslizamiento.



Foto 4.6: Escarpe del pie del deslizamiento en contacto con el Torrente de Vallcebre.



Foto 4.7: Vista frontal del pie del deslizamiento con el escarpe en primer plano.

El límite norte de la unidad inferior del deslizamiento es una superficie de cizalla vertical lateral y corresponde al afloramiento en superficie de la superficie de rotura. Esta cizalla vertical lateral se puede utilizar para definir puntos de interpolación en ella, usando el valor de la elevación del MDE en esos lugares, dado que la superficie de rotura aflora en todo este límite. Pero si se utilizan estos puntos para interpolar la superficie de rotura, el interpolador utilizado en ARC/INFO construye una superficie de rotura con un buzamiento constante desde el punto conocido de la rotura más cercano a la cizalla lateral, hasta la misma mediante un plano suave (ver figura 4.6). A partir de la interpretación geológica y geomorfológica la superficie de cizalla lateral se ha definido como un límite casi vertical. Por eso no se pueden utilizar puntos sobre el límite norte y con la elevación del MDE porque modifican una buena parte de la superficie de rotura. Tampoco es posible intentar interpolar esta morfología de la superficie de rotura debido a dos aspectos importantes: por un lado el tamaño de celda utilizado que es demasiado grande para contemplar esta característica, y por otro, las funciones de interpolación existentes en el SIG utilizado están pensadas para superficies del relieve o piezométricas, pero no para interpolar superficies geológicas. Por ello esta característica no ha sido considerada aunque se ha introducido de forma manual algunos puntos con el espesor interpretado del deslizamiento cerca de límite norte, para definir más correctamente la forma de la superficie de rotura en este área.

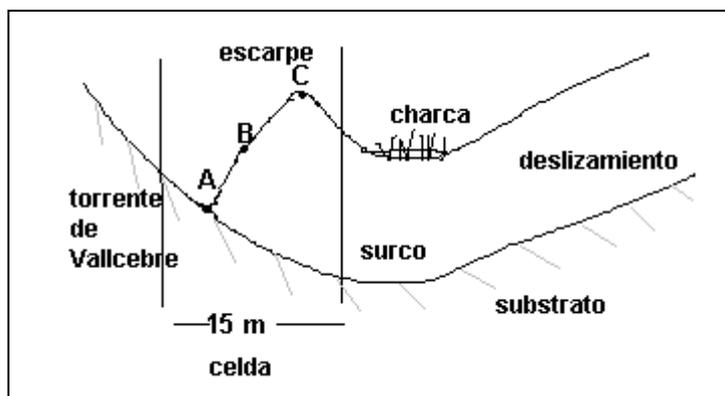


Figura 4.5: Perfil esquemático, y sin escala, del pie del deslizamiento donde se puede observar el escarpe, la zona encharcada, el surco y el Torrente de Vallcebre. Se ilustra el tamaño de una celda, cuyos límites pueden variar de situación, para mostrar la problemática que comporta el escarpe al interpolar la superficie de rotura. Las letras A, B y C muestran tres situaciones distintas, cuyas elevaciones pueden ser adjudicadas a una celda del pie según donde se sitúe ésta.

El surco situado al pie del deslizamiento se ha deducido de características topográficas y geomórficas de la superficie de rotura (ver figura 4.4). La superficie topográfica de la rotura en el pie del deslizamiento está cabalgando la ladera opuesta del torrente de Vallcebre. Ello es debido a que el antiguo valle del torrente de Vallcebre fue recubierto por el deslizamiento, el cual desplazó al curso fluvial y remontó por la ladera opuesta. En la superficie del terreno este valle enterrado se identifica con un surco que, a menudo, está relleno de agua y cubierto por vegetación típica de zonas encharcadas. La presencia de este valle enterrado también se ha considerado en la superficie de rotura mediante algunos puntos a modo de sondeos virtuales de apoyo.

La figura 4.7 muestra la superficie interpolada final de rotura utilizada y la inicial, creada únicamente con los 5 puntos de sondeos. En el Anejo 4 se muestran los mapas con la superficie interpolada de rotura, así como las superficies de piezometría y el MDE (mapas 1 y

3 del Anejo 4). En el mismo anejo se muestra el mapa con los puntos utilizados para interpolar la superficie de rotura del deslizamiento (ver mapa 2) y la tabla con los datos de interpolación provenientes de la instrumentación del deslizamiento (tabla 1 del Anejo 4).

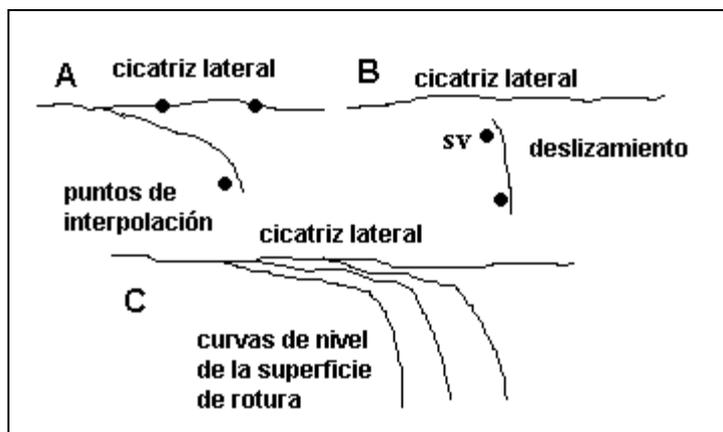


Figura 4.6: Esquema en planta, y sin escala, de la problemática de la interpolación de la superficie de rotura en el límite norte del deslizamiento, constituido éste por una cizalla vertical lateral. Las líneas horizontales representan la cicatriz lateral y límite del deslizamiento. Las líneas inclinadas o verticales representan curvas de nivel de la superficie de rotura. Los puntos gruesos representan puntos de interpolación. Se ilustran tres situaciones: A, forma de la curva de elevación de la interpolación de la superficie de rotura utilizando puntos localizados en la cicatriz con la cota del relieve; B, forma de la curva de nivel utilizando sondeo virtual y sin llegar a interpolar hasta la cicatriz (solución utilizada); C, forma de las curvas de nivel que debe tener la superficie de rotura en esta zona del deslizamiento.

Superficies de los niveles piezométricos

Las superficies de los niveles piezométricos (máximo y mínimo) se han interpolado a partir de la información de piezómetros situados en algunos de los sondeos, siendo necesaria la inclusión de otros puntos, para ayudar en la correcta interpolación de las superficies (ver Mapa 2 del Anejo 4). Estos puntos adicionales corresponden a datos y observaciones recogidos en el campo. Se trata de zonas de rezume situadas en el pie del deslizamiento siguiendo la traza del torrente de Vallcebre, así como de zonas encharcadas donde el nivel freático intercepta la superficie del terreno (cerca del pie) y otra información proporcionada por los habitantes de la zona. Los niveles piezométricos máximo y mínimo se han definido respectivamente a partir de los valores máximos y mínimos observados en los piezómetros. Para el nivel máximo se utilizaron los datos del día 16 de diciembre de 1997 y para el nivel piezométrico mínimo se utilizaron los datos del 10 de octubre de 1998.

En la tabla 4.1 se pueden observar los parámetros geotécnicos utilizados en el análisis de estabilidad. Estos datos corresponden a ensayos de laboratorio de los materiales del deslizamiento (Corominas et al., 1998). La mayor parte de los ensayos se realizaron sobre material intacto del deslizamiento obtenido de los sondeos realizados. Para el análisis se han utilizado 2 ángulos de fricción de 8° y 10°. El ángulo de fricción de 8° se obtuvo en el laboratorio con una muestra de los materiales en la superficie de rotura y, por tanto, corresponde a un valor en condiciones residuales. El ángulo de fricción de 10° se ha utilizado como ángulo residual para simular condiciones parecidas a las que se observan en el terreno.

Peso específico (γ)	21 Kn / m ³
Peso específico saturado (γ_w)	10 Kn / m ³
Cohesión (residual) (c')	0
Ángulos de fricción residual (ϕ')	8° - 10°

Tabla 4.1: Parámetros geotécnicos utilizados en el análisis de estabilidad, obtenidos de ensayos de laboratorio (Corominas et al., 1998) de la unidad inferior del deslizamiento.

4.4.2. Resultados del análisis de estabilidad

Una vez se han definido las condiciones de contorno se ha realizado el análisis de estabilidad considerando un rango de propiedades de resistencia del suelo, en cuanto al ángulo de fricción se refiere, obtenidos de ensayos de laboratorio (Corominas et al., 1998) y dos posiciones del nivel de agua subterránea (máxima y mínima).

Con los datos anteriores (MDE, superficie de rotura y niveles piezométricos) se han derivado parámetros utilizados para el cálculo (pendiente de la superficie de rotura, profundidad de la superficie de rotura y grosor saturado sobre la superficie de rotura) con simples algoritmos o funciones del SIG. En el Anejo 4 se muestran las funciones utilizadas y los mapas de los parámetros resultantes (mapas 4 y 5). Con estos datos y mediante un algoritmo (ver Anejo 4) se han calculado en cada celda las fuerzas resistentes y las fuerzas inestabilizadoras. Mediante la división de estas fuerzas se ha obtenido el factor de seguridad en cada celda. Los mapas del Factor de seguridad calculado con el algoritmo presentado en el Anejo 4, según los distintos niveles piezométricos y con los dos ángulos de fricción se muestran en las figuras 4.8 y 4.9.

Los resultados del análisis, o las salidas gráficas del mismo, mostrando celdas con distintos valores del factor de seguridad por encima y por debajo de la unidad, son difíciles de interpretar si se comparan con los datos de auscultación del deslizamiento. Es necesario tener en cuenta, que incluso aunque se pudieran identificar varias subunidades en la unidad inferior analizada, estamos tratando con un deslizamiento que se comporta como un bloque rígido. Por tanto, las celdas que presentan valores del factor de seguridad muy por debajo de la unidad, no tienen necesariamente porqué experimentar un desplazamiento si el movimiento queda bloqueado por las celdas vecinas. Esto es debido a dos causas principalmente:

- el factor de seguridad y lo que éste representa y
- la influencia de las celdas vecinas

El factor de seguridad se ha calculado como la relación entre fuerzas resistentes y fuerzas inestabilizadoras en cada celda. Distintos pares de fuerzas pueden dar la misma relación o factor de seguridad, pero con una fuerza resultante de distinta magnitud. Lo que determina que se produzca el movimiento es la magnitud del exceso de las fuerzas inestabilizadoras.

Por otra parte, si se considera un perfil longitudinal en la dirección del movimiento, las fuerzas inestabilizadoras resultantes en una determinada celda se pueden contrarrestar por las fuerzas resistentes resultantes en una celda vecina. Por tanto, la relación general entre fuerzas que conducen a la inestabilidad y fuerzas resistentes en un perfil, es la que determina si el deslizamiento se encuentra en condiciones estables o inestables. En este análisis no se han considerado los efectos 3-D ni las fuerzas entre perfiles.

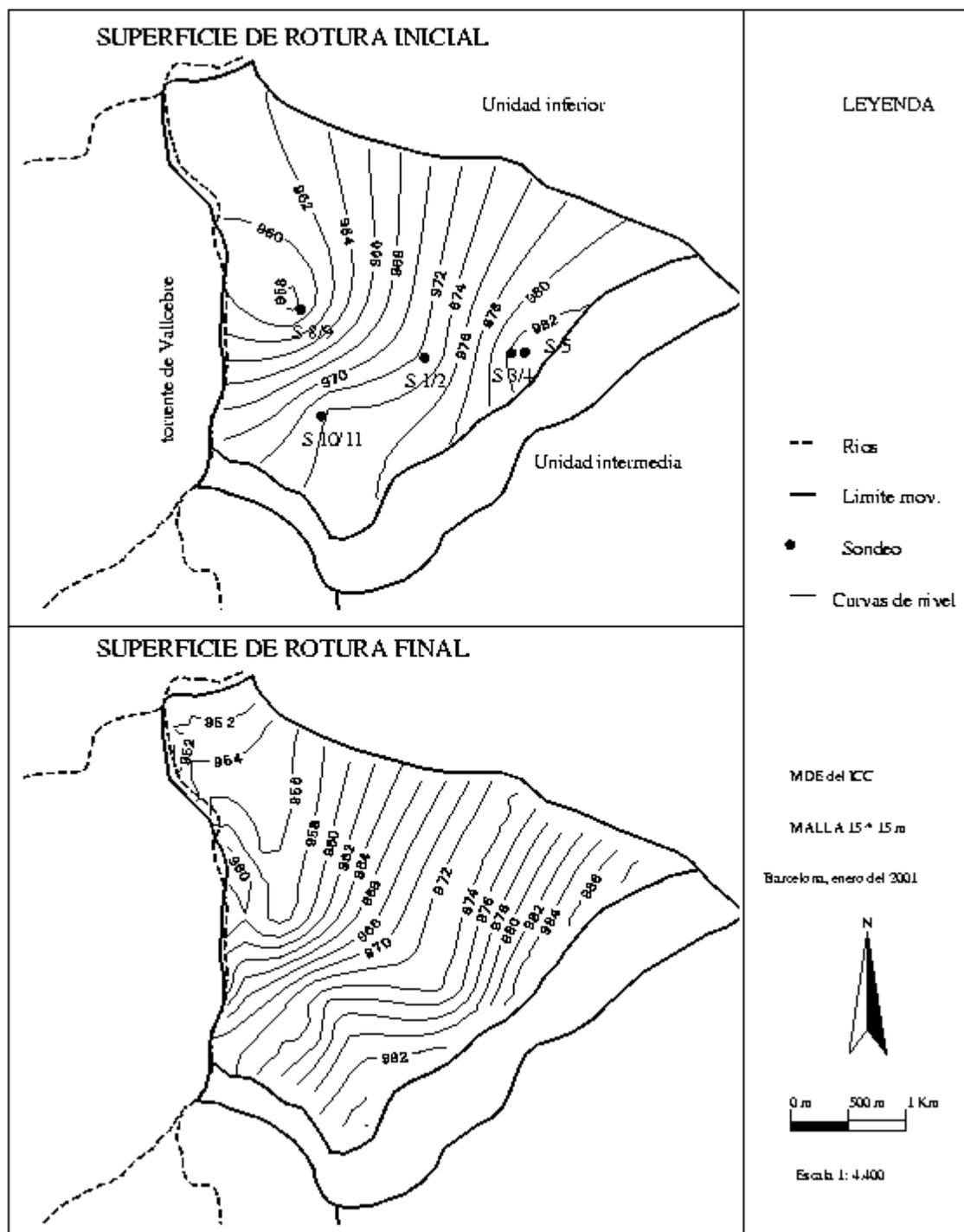


Figura 4.7: Superficies de rotura interpoladas: la inicial utilizando únicamente la información de los inclinómetros de los 5 sondeos y la final utilizada para el análisis de estabilidad. Los puntos utilizados para interpolar la superficie final se muestran en el mapa 2 del Anejo 4. La figura demuestra la necesidad de información adicional. La superficie inicial mostrada es la resultante de uno de los interpoladores del SIG utilizado y no está corregida con el MDE.

- Unidad inferior del deslizamiento de VALLCEBRE (Barcelona) -
MAPAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD (ANGULO DE FRICCIÓN 8°)

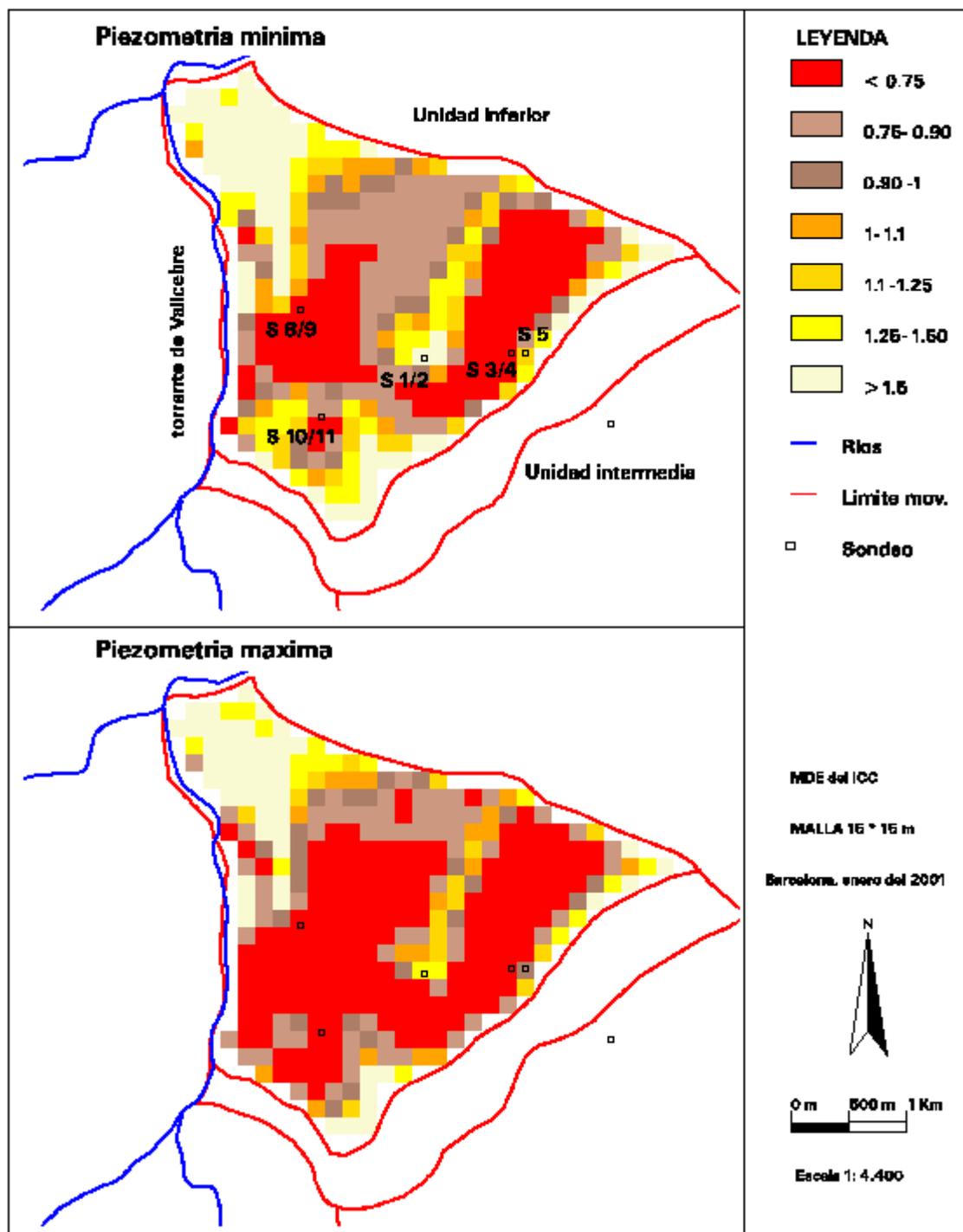


Figura 4.8: Mapas resultantes del factor de seguridad de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre con el ángulo de fricción 8° para los dos niveles piezométricos contemplados.

Para mostrar esto se han realizado mapas de la fuerza resultante en cada celda (ver figuras 4.10 y 4.11) mediante un algoritmo mostrado en el Anejo 4. Los valores positivos corresponden a un exceso de fuerzas que conducen a la inestabilidad, mientras que los negativos indican un excedente de fuerzas resistentes. En cada mapa se han situado 4 perfiles longitudinales a lo largo de la unidad inferior del deslizamiento, siguiendo el movimiento de éste (ver figuras 4.12 a 4.15 con los perfiles realizados en el SIG). En cada uno de los perfiles, y con la limitación del formato raster al intentar delinear líneas que no siguen los dos ejes de la malla regular, se ha calculado la fuerza resultante (ver algoritmo en el Anejo 4) y los factores de seguridad (ver tabla 4.2). Los resultados son bastantes consistentes y reproducen el comportamiento observado del deslizamiento.

	PERFIL 1			PERFIL 2			PERFIL 3			PERFIL 4		
	Res.	Ins.	FS	Res.	Ins.	FS	Res.	Ins.	FS	Res.	Ins.	FS
Pmax8°	167.7	200.5	0.84	444.1	645	0.69	553.2	633	0.87	864.3	910.9	0.95
Pmin8°	252.5	200.5	1.26	572.0	645	0.89	674.3	633	1.07	961.7	910.9	1.06
Pmax10°	210.4	200.5	1.05	557.1	645	0.86	694.1	633	1.10	1084.3	910.9	1.19
Pmin10°	316.8	200.5	1.58	717.6	645	1.11	846.0	633	1.34	1206.5	910.9	1.32

Tabla 4.2: Resultados del factor de seguridad calculado en los 4 perfiles longitudinales y de las fuerzas resultantes en Kn/m^2 (las resistentes y las inestabilizadoras) para cada uno de los perfiles. Los valores resultantes de las fuerzas inestabilizadoras y del FS tienen en cuenta la geometría a contrapendiente de la superficie de rotura en el pie del deslizamiento.

Así, para el nivel de agua subterránea más alto todas las secciones longitudinales indican inestabilidad mientras que para el nivel freático más bajo registrado el deslizamiento es, en su mayor parte, estable. La sección 2 es la única que mantiene una cierta inestabilidad, lo que concuerda con las lecturas del cable extensométrico situado en el sondeo S-2. A pesar de ello, como se observa en las figuras 4.8 y 4.9 la celda que contiene el sondeo S-2 no observa los valores del factor de seguridad más bajos. En las figuras 4.10 y 4.11 también se observa que en esta celda son las fuerzas resistentes las que dominan. Esto se contradice con lo observado de la auscultación del deslizamiento y lo atribuimos a un efecto secundario no deseado, creado al añadir datos adicionales, que allana la superficie de rotura interpolada en la zona del sondeo (ver figura 4.7), provocando la disminución de la pendiente en ese área.

Finalmente, se han calculado las fuerzas totales resistentes y las inestabilizadoras del conjunto de la unidad inferior del deslizamiento, para obtener un valor del Factor de seguridad global. Estos valores globales se muestran en la tabla 4.3 y son consistentes con los obtenidos de las secciones longitudinales y con lo que se observa en el campo. Con estos resultados se puede llegar a la conclusión que el análisis de estabilidad reproduce de forma adecuada el comportamiento observado de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre.

	Resistentes	Inestabilizadoras	FS
Piez. max. 8°	7654.8	8389.3	0.91
Piez. min. 8°	9176.6	8389.3	1.09
Piez. max. 10°	9604.6	8389.3	1.14
Piez. min. 10°	11513.3	8389.3	1.37

Tabla 4.3: Resultados de las fuerzas resistentes, las inestabilizadoras y el factor de seguridad para el conjunto de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre. Los valores resultantes de las fuerzas inestabilizadoras y del FS tienen en cuenta la geometría a contrapendiente de la superficie de rotura en el pie del deslizamiento.

**- Unidad inferior del deslizamiento de VALLCEBRE (Barcelona) -
MAPAS DEL FACTOR DE SEGURIDAD (ANGULO DE FRICCIÓN 10°)**

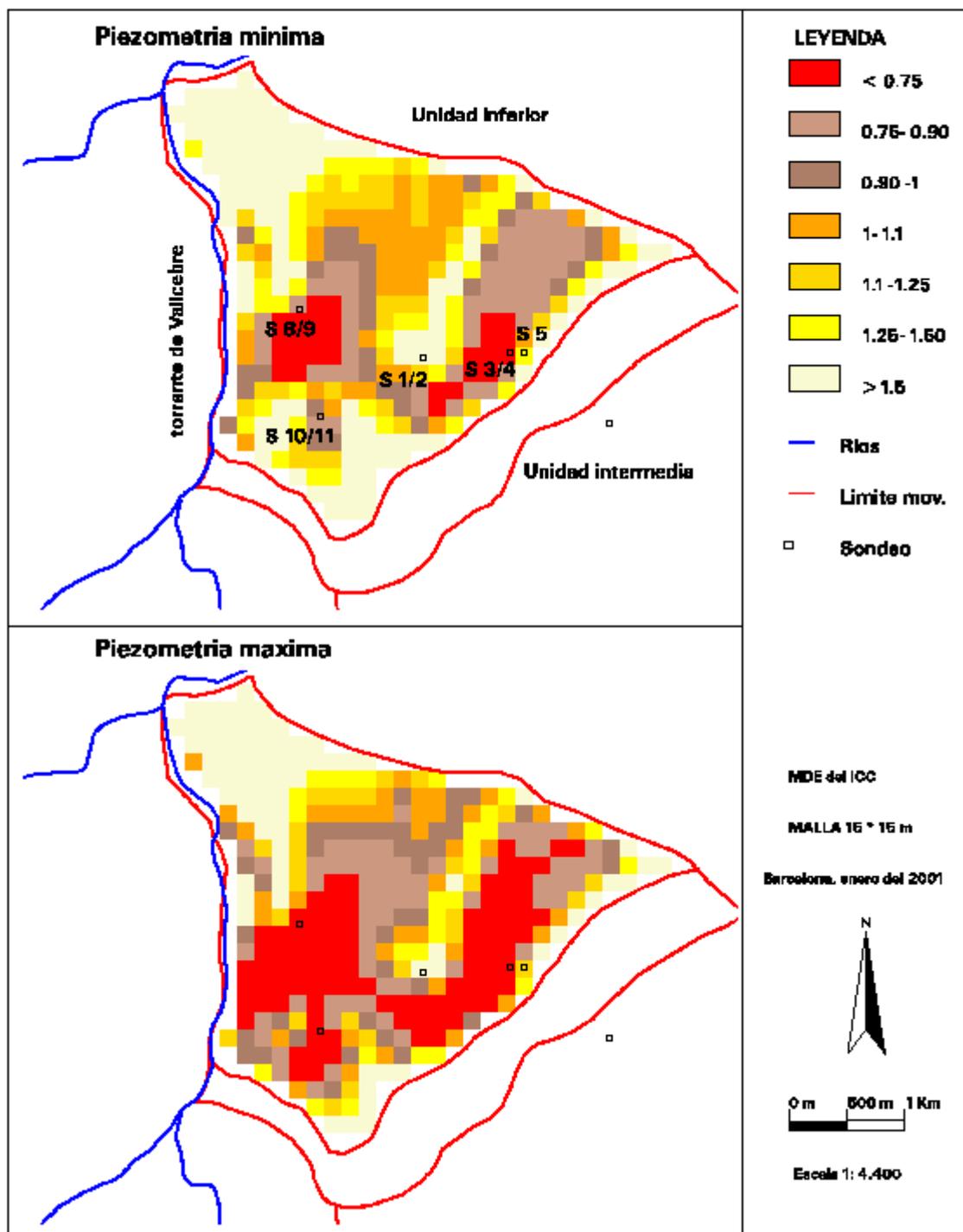


Figura 4.9: Mapas resultantes del factor de seguridad de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre con el ángulo de fricción 10° para los dos niveles piezométricos contemplados.

- Unidad inferior del deslizamiento de VALLCEBRE (Barcelona) -
MAPAS DE LAS FUERZAS RESULTANTES (ANGULO DE FRICCIÓN 8°)

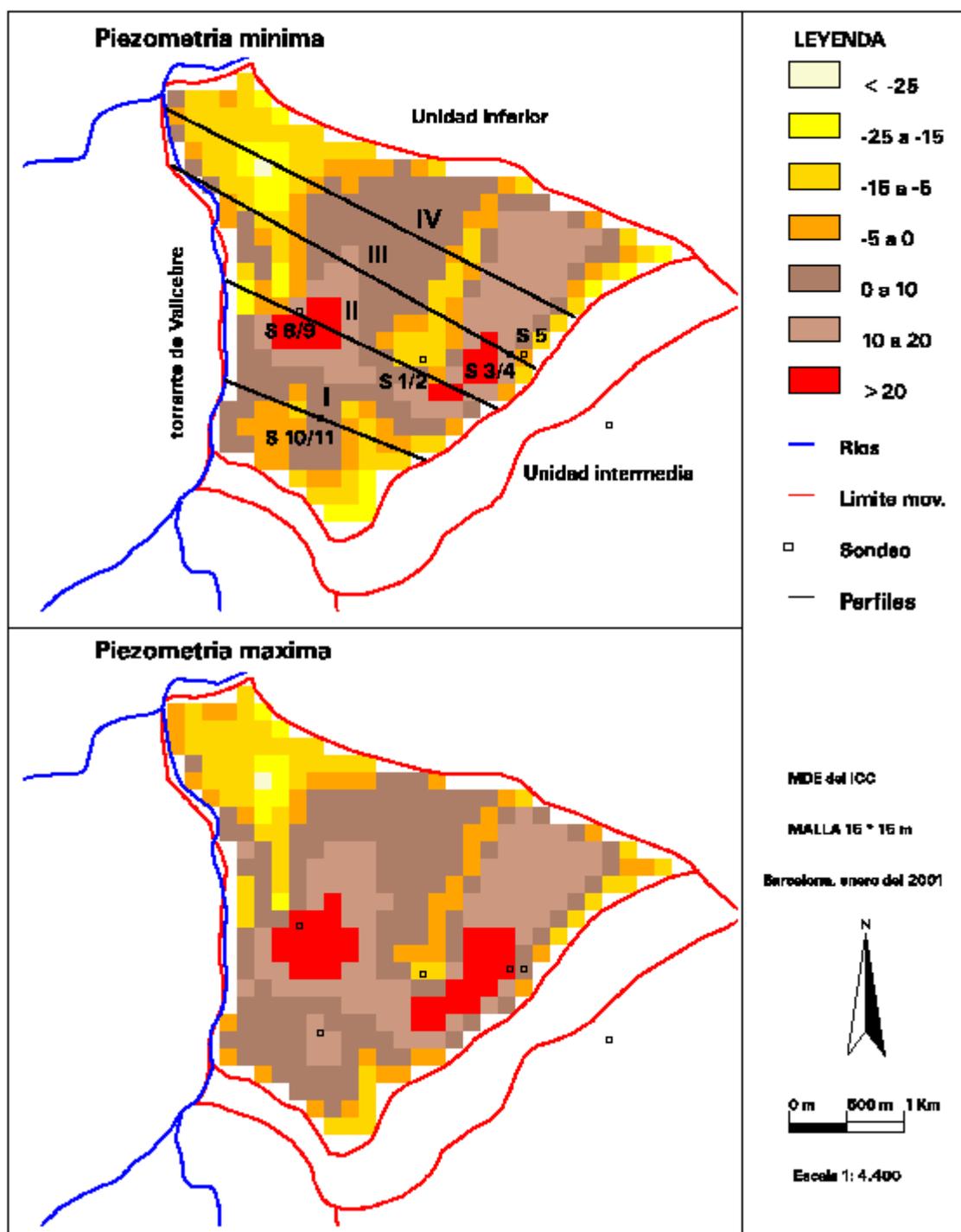


Figura 4.10: Mapas de las fuerzas resultantes en cada celda de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre con el ángulo de fricción 8° para los dos niveles piezométricos contemplados. Las fuerzas están expresadas en Kn/m^2 siendo las negativas las resistentes y las positivas las que conducen a inestabilidad. En el mapa superior se localizan los 4 perfiles longitudinales.

- Unidad inferior del deslizamiento de VALLCEBRE (Barcelona) -
MAPAS DE LAS FUERZAS RESULTANTES (ANGULO DE FRICCIÓN 10°)

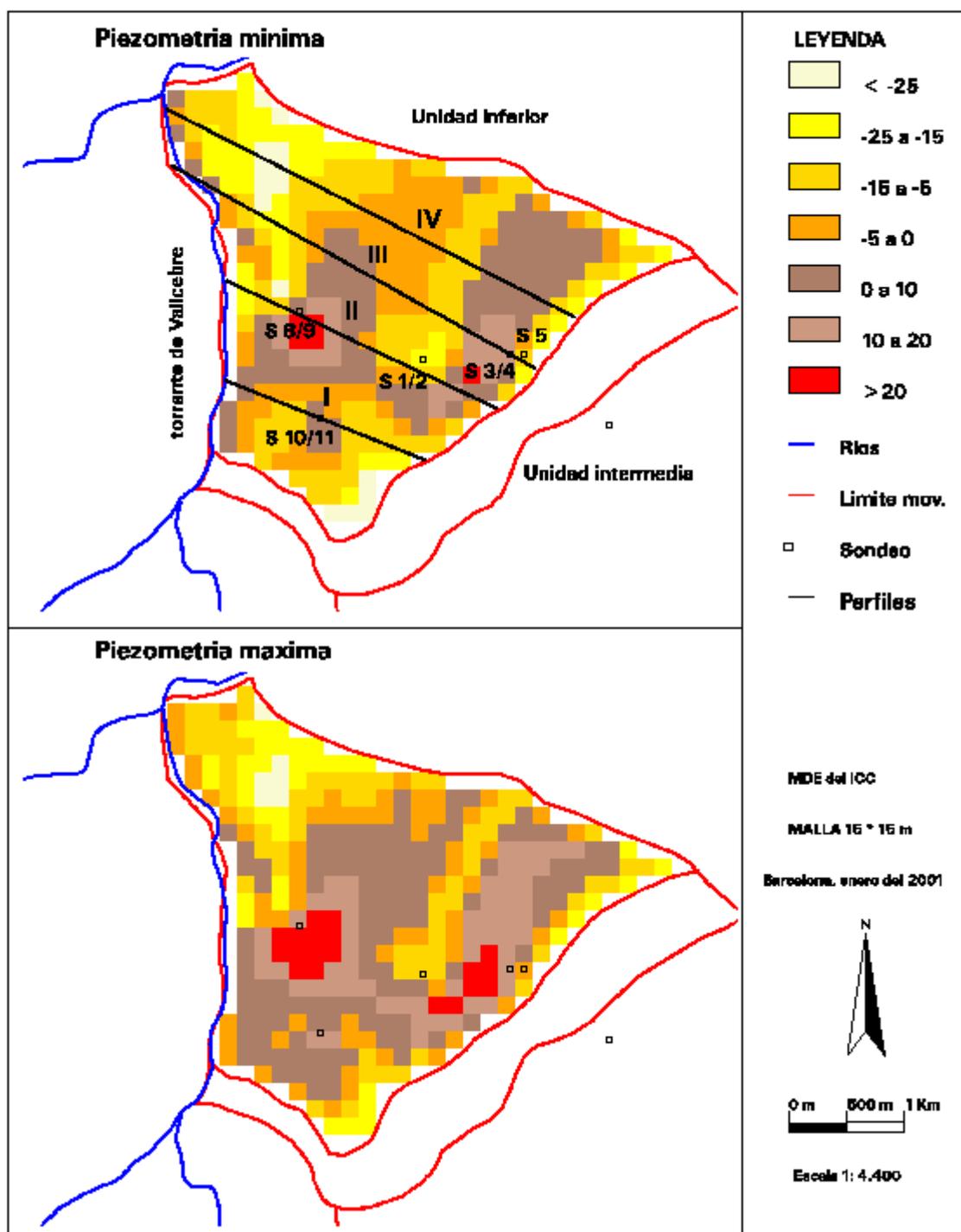


Figura 4.11: Mapas de las fuerzas resultantes en cada celda de la unidad inferior del deslizamiento de Vallcebre con el ángulo de fricción 10° para los dos niveles piezométricos contemplados. Las fuerzas están expresadas en Kn/m^2 siendo las negativas las resistentes y las positivas las que conducen a inestabilidad. En el mapa superior se localizan los 4 perfiles longitudinales.

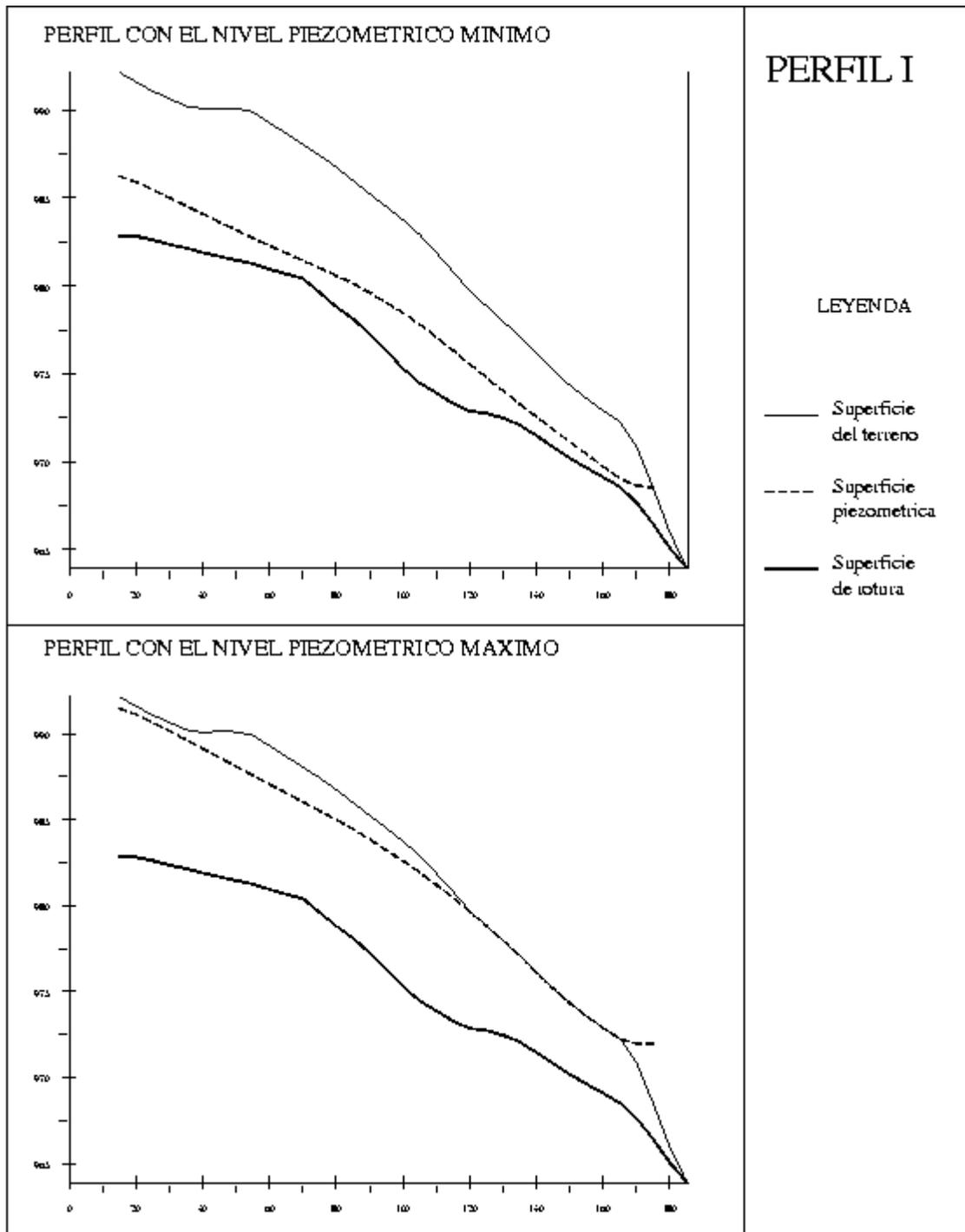


Figura 4.12: Perfil longitudinal I realizado con las funciones del subprograma TIN (ARC/INFO, 1997) donde se observan los dos niveles piezométricos (máximo y mínimo). Perfil orientado ESE (izquierda)-WNW (derecha).

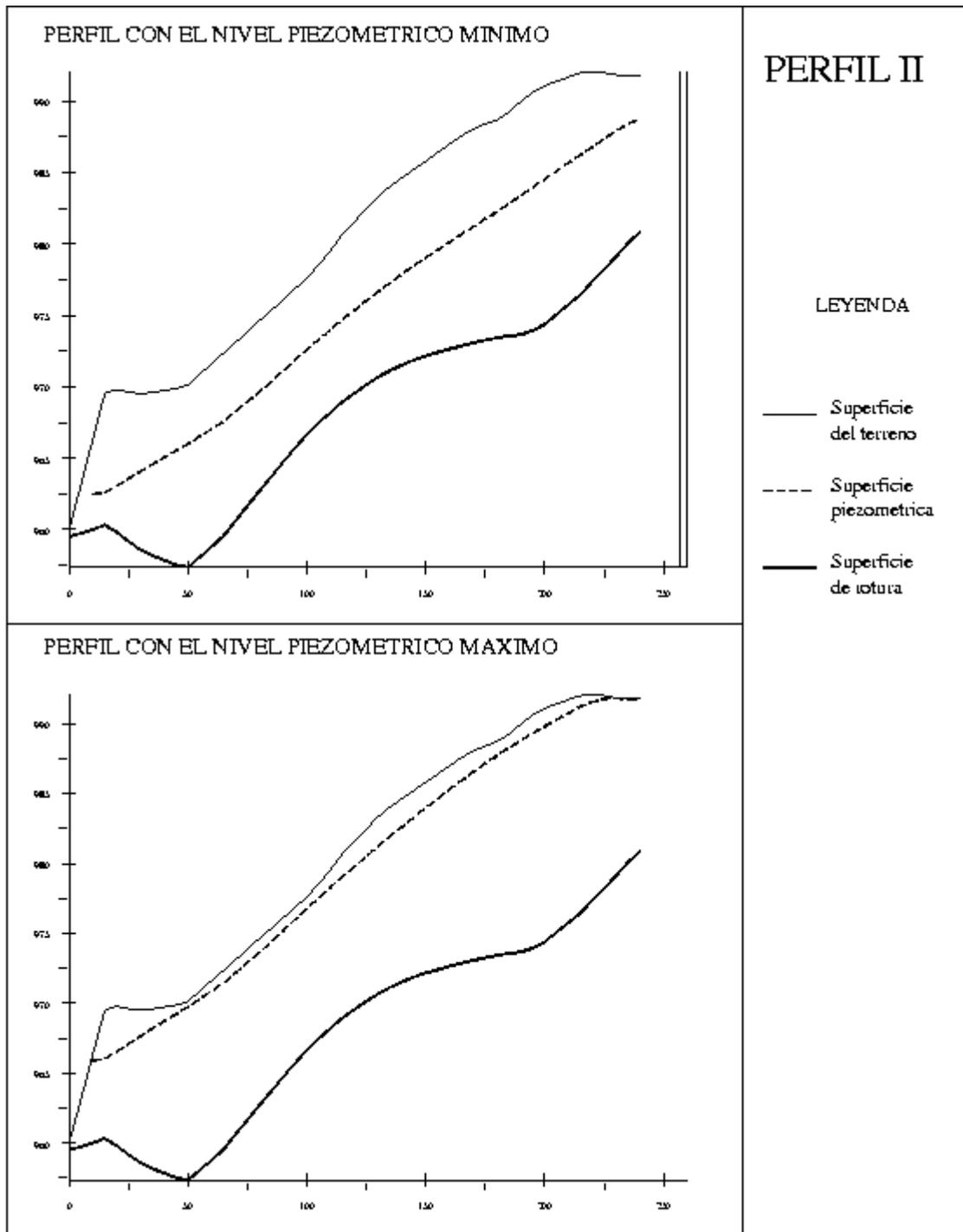


Figura 4.13: Perfil longitudinal II realizado con las funciones del subprograma TIN (ARC/INFO, 1997) donde se observan los dos niveles piezométricos (máximo y mínimo). Perfil orientado WNW (izquierda)-ESE (derecha).

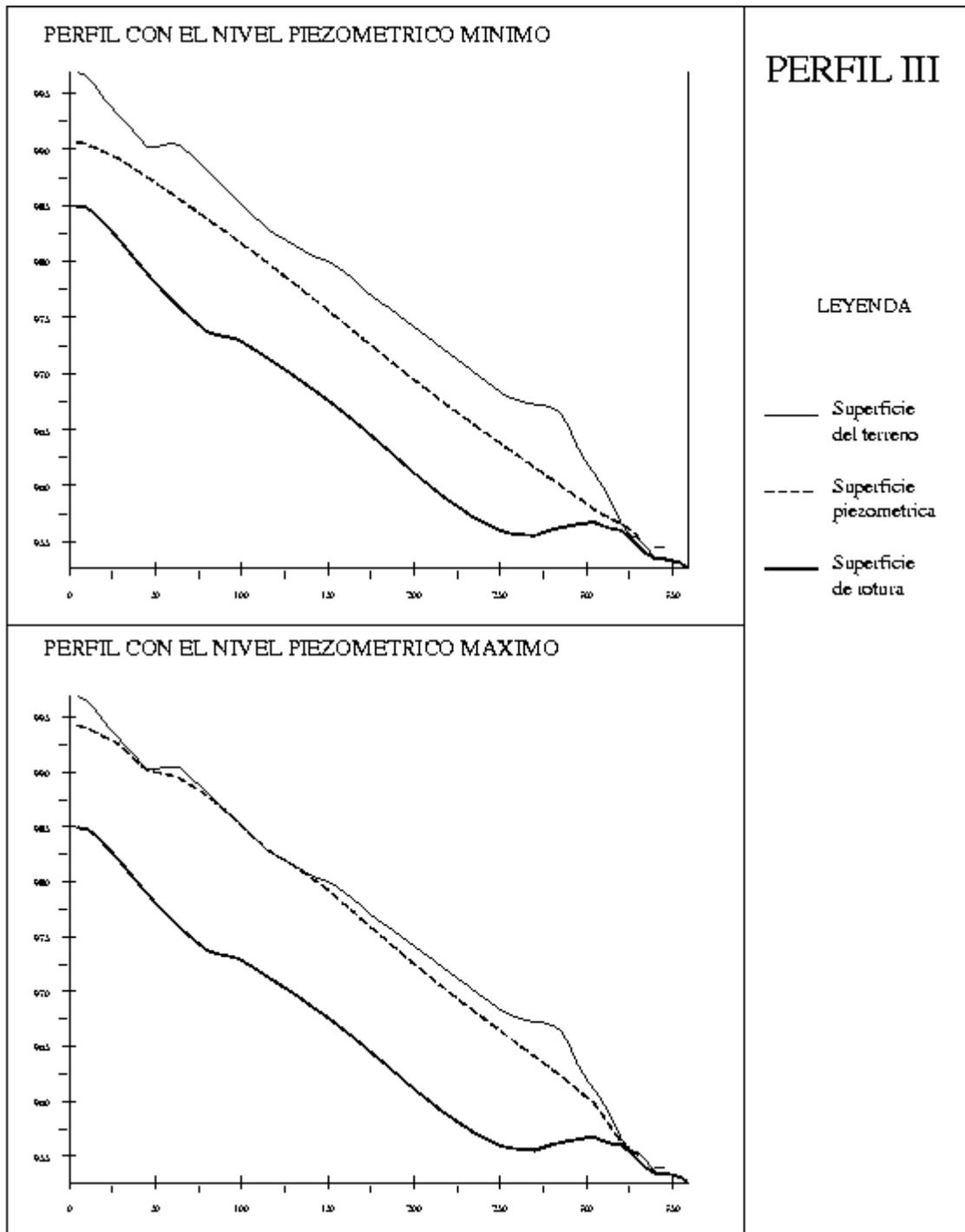


Figura 4.14: Perfil longitudinal III realizado con las funciones del subprograma TIN (ARC/INFO, 1997) donde se observan los dos niveles piezométricos (máximo y mínimo). Perfil orientado ESE (izquierda)-WNW (derecha).

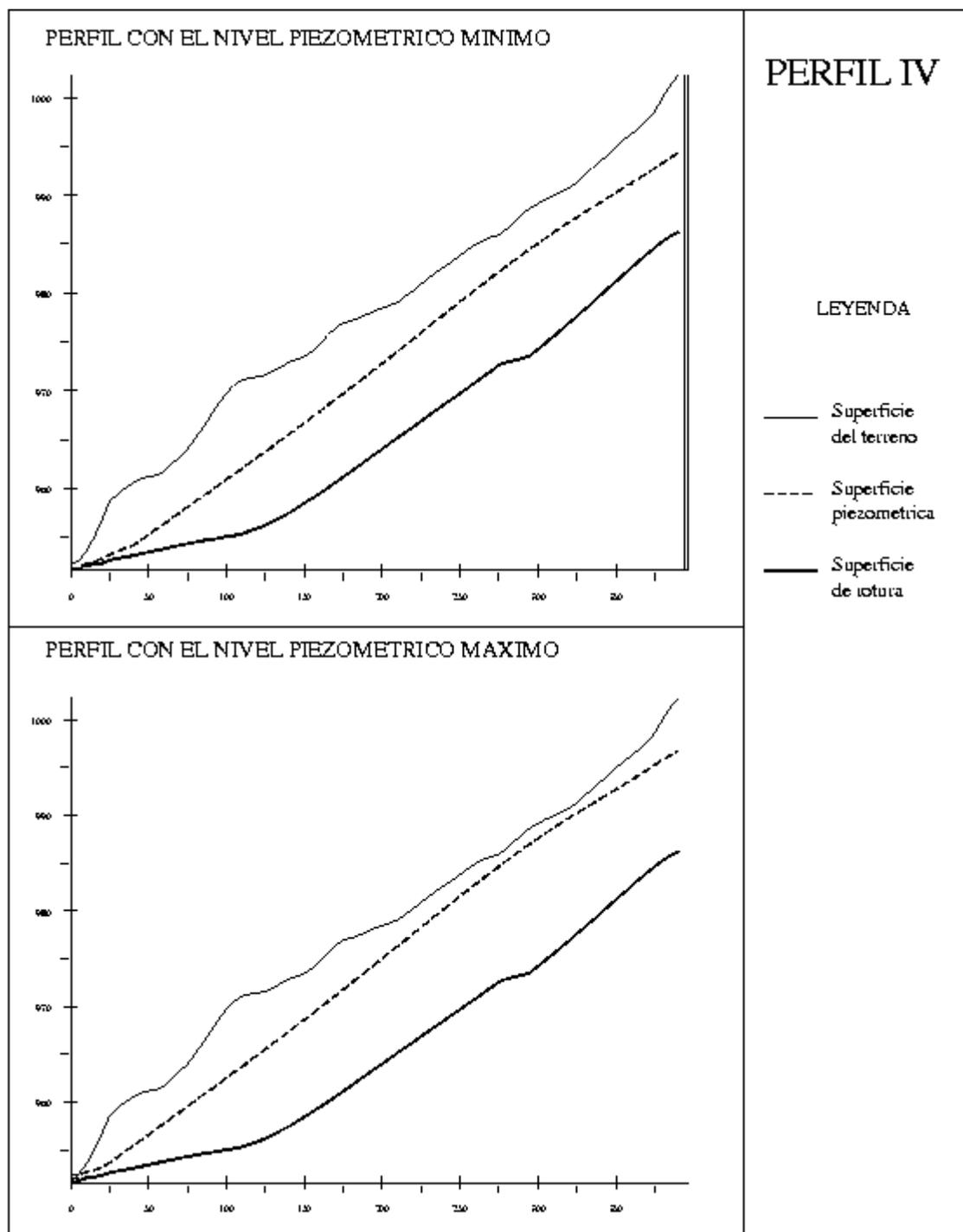


Figura 4.15: Perfil longitudinal IV realizado con las funciones del subprograma TIN (ARC/INFO, 1997) donde se observan los dos niveles piezométricos (máximo y mínimo). Perfil orientado WNW (izquierda)-ESE (derecha).

4.4.3. Comparación de los resultados con los obtenidos del análisis del programa STABL

Aunque los resultados sean consistentes se han comparado estos resultados obtenidos del análisis en SIG con métodos tradicionales de análisis de estabilidad. Para ello se ha realizado un análisis de equilibrio límite utilizando el programa PC-STABL-5M.

Para realizar la comparación hemos seleccionado una sección longitudinal, coincidente básicamente con la sección II del análisis con SIG, con la intención de utilizar una geometría relativamente bien definida del deslizamiento. Esta sección se ha dibujado a partir de datos de los sondeos S-8 y S-1 y la proyección de los sondeos S-3 y S-5, junto con datos de observaciones de campo (el surco localizado en el pie y la altura del escarpe al pie del deslizamiento). A partir de los límites bien definidos de la superficie del deslizamiento (graben que limita la unidad por la parte superior, afloramiento del pie del deslizamiento y lectura de inclinómetros) se ha introducido una geometría fija de la superficie de rotura.

Asimismo, los parámetros de resistencia del suelo y los niveles de agua introducidos como parámetros de entrada para el análisis han sido los mismos que los utilizados en el análisis en el SIG. En la tabla 4.4 se muestran estos resultados, que como se puede comprobar en la tabla presentan una muy buena correspondencia entre los dos procedimientos.

	Sección II SIG Factor de Seguridad	Sección II STABL Factor de Seguridad
Ángulo de fricción 8		
Nivel alto de agua subterránea	0.69	0.75
Nivel bajo de agua subterránea	0.89	0.89
Ángulo de fricción 10		
Nivel alto de agua subterránea	0.86	0.92
Nivel bajo de agua subterránea	1.11	1.10

Tabla 4.4. Factores de seguridad de la sección longitudinal II obtenidos con los análisis de equilibrio límite con SIG y con el programa STABL.

4.5. Conclusiones

Los resultados del análisis de susceptibilidad a la rotura utilizando un SIG, con el método del talud infinito par calcular el factor de seguridad celda a celda en la unidad morfológica inferior del deslizamiento de Vallcebre, permiten definir una serie de conclusiones. Éstas se pueden separar en tres grupos referidos a la interpolación de las superficies por un lado, la idoneidad del análisis en SIG por otro y los resultados específicos del deslizamiento de Vallcebre.

Atendiendo a los procedimientos de interpolación se puede concluir lo siguiente:

- 1) Los procedimientos de interpolación del SIG utilizado son muy sensibles a la distribución espacial de los puntos conocidos utilizados en la misma, y las superficies resultantes

(rotura y nivel piezométrico), pueden cambiar significativamente según la localización de estos puntos.

- 2) Los interpoladores existentes en el SIG utilizado (ARC/INFO) son útiles para interpolar superficies del terreno y superficies hasta cierto punto predecibles o constantes como algunos casos de niveles de agua subterránea. No ocurre lo mismo con superficies geológicas como puede ser una superficie de rotura con características específicas como en el deslizamiento de Vallcebre.
- 3) Dado que se trabaja en formato raster, es posible obtener una superficie final como la de rotura, a partir de la combinación de superficies interpoladas con distintos métodos.

En cuanto al análisis de estabilidad basado en el método del talud infinito aplicando un SIG podemos concluir:

- 4) El análisis determinístico basado en SIG de deslizamientos de tipo traslacional es factible.
- 5) Los análisis de equilibrio límite de grandes deslizamientos en el SIG requieren la definición previa de los límites del deslizamiento y las condiciones de contorno.
- 6) Los factores de seguridad resultantes de cada celda y los mapas representando estos factores en deslizamientos, no se pueden interpretar de forma individual pudiendo llevar a conclusiones sin sentido o erróneas.
- 7) Para tener una idea del resultado del análisis determinístico de estabilidad es más indicado calcular las fuerzas resultantes de todo el deslizamiento o de alguna sección longitudinal.

Atendiendo al caso concreto analizado en este capítulo, se pueden definir las siguientes conclusiones:

- 8) En Vallcebre ha sido necesario utilizar información adicional (interpretación geológica e hidrogeológica basada en estudios de campo) para incorporar en el SIG con el objetivo de adecuar las superficies necesarias del análisis a la geometría interpretada del deslizamiento. Con todo, el utilizar puntos adicionales para definir o mejorar alguna característica, puede tener efectos secundarios no deseados en alguna otra parte de la superficie, lo que influye en el resultado final del análisis (como ocurre en el sondeo S-2).
- 9) Los resultados del deslizamiento de Vallcebre contrastados con los datos de su auscultación permiten validar el análisis de estabilidad realizado. En este sentido los resultados, utilizando dos niveles de agua subterránea, son coherentes con lo que se observa del deslizamiento.

Finalmente y con el trabajo realizado hasta aquí se puede añadir una última consideración:

- 10) Los análisis de susceptibilidad a la rotura mediante métodos determinísticos (normalmente el método del talud infinito) aplicados a grandes áreas (escala regional) con SIG, limitan su utilidad y interpretación en el caso que los deslizamientos esperados en el área son del tamaño de una sola celda de la malla regular utilizada. En caso contrario, los resultados y el mapa son difíciles de interpretar y pueden conducir a error.