

ANEJO 4

**DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS Y EL PROCEDIMIENTO
SEGUIDO EN EL ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CON EL
MÉTODO DEL TALUD INFINITO EN EL DESLIZAMIENTO
DE VALLCEBRE****Datos utilizados para el análisis**

Los datos disponibles utilizados en Vallcebre son:

1. El Modelo Digital de Elevaciones
2. Datos sobre la profundidad de la superficie de rotura
3. Datos de la profundidad de los niveles piezométricos máximo y mínimo
4. Datos de la geometría del deslizamiento (contorno, límites)

Asimismo se han utilizado un último grupo de datos para validar los resultados. Estos datos son valores de velocidad de movimiento calculada en base a la instrumentación de que es objeto el deslizamiento desde el año 1996 y el control con GPS que se realiza del mismo.

En los siguientes párrafos se describen estos datos utilizados. En el mismo anejo se muestran los mapas con los datos utilizados (el MDE, puntos para interpolar la rotura y las piezometrías), las superficies interpoladas (la de rotura y la de piezometría máxima y mínima) y los parámetros derivados de éstas y utilizados en el análisis (pendiente superficie de rotura, espesor del material movilizado y espesor saturado sobre la superficie de rotura). Las superficies interpoladas se muestran en mapas de curvas de nivel mientras que los parámetros como la pendiente de la superficie de rotura se muestran como malla regular.

1. Modelo Digital de Elevaciones

Se trata de la variable Altitud sobre el nivel del mar de los puntos que forman la malla regular del Modelo Digital de Elevaciones. Es una variable cuantitativa continua medida en metros y de la que se puede derivar más información como la pendiente, etc (ver mapa 1). El tamaño de la celda es de 15 * 15 m.

El modelo de Elevaciones se utiliza en este procedimiento para obtener las alturas sobre el nivel del mar de la superficie de rotura y de las superficies piezométricas máxima y mínima. El MDE se utiliza como nivel de referencia de altitud de los puntos con información del subsuelo. El MDE también se utiliza para ajustar la superficie de rotura obtenida mediante interpolación en aquellas celdas donde debido a la escasez de puntos o al método de interpolación, la superficie de rotura queda por encima de la superficie del terreno. Lo mismo se puede aplicar en el caso de las dos superficies piezométricas, en caso de que sea necesario.

2. Datos sobre la profundidad de la superficie de rotura

En Vallcebre se conoce la profundidad de la superficie de rotura a partir de los inclinómetros situados en las unidades inferior y media del deslizamiento (ver mapa de puntos en el anejo). Esta información, que se muestra en la tabla 1 se digitalizó en AutoCad y se introdujo en ARC/INFO como cobertura de puntos con un ítem específico.

PIEZOMETRÍA			ROTURA	
	Nivel	Nivel		Superfi.
Piezómet.	max (m)	min. (m)	Inclinóm.	rot. (m)
S2	0.63	6.25	S1	15.5
S11	0.96	5	S10	8.5
S4	0.94	4.16	S3	10
S5	2.56	6.05	S5	11.42
S9	1.28	5.18	S8	15

Tabla 1. Datos de partida sobre la profundidad de la superficie de rotura y los niveles piezométricos máximo y mínimo correspondientes al 16 de diciembre de 1997 y al 16 de octubre de 1998 respectivamente. Los valores son metros de profundidad respecto a la superficie del terreno.

Debido al limitado número de sondeos y a la relativa complejidad de la superficie de rotura del deslizamiento de Vallcebre, se ha utilizado información adicional para crear la superficie por interpolación (ver mapa 2). Por un lado, se han utilizado los grosores observados en el pie del deslizamiento en el torrente de Vallcebre y también los grosores estimados de los perfiles interpretativos realizados a partir de los sondeos (ver Figura 4.4). La obtención e introducción en ARC/INFO de estos puntos se describe a continuación.

Puntos situados en el pie del deslizamiento:

Estos puntos se pueden definir de dos maneras:

- 1- Situando mediante ARCEDIT (ESRI, ARCEDIT Commands, 1994; ESRI, ArcTools, 1994) los puntos con el cursor sobre la cobertura de ríos o sobre la cobertura con el límite del movimiento. Estos puntos se pueden llevar a una nueva cobertura de puntos y definir allí un ítem o campo que se utilizará para definir la profundidad de la superficie de rotura o la altura sobre el nivel del mar de la misma.
- 2- Utilizando el comando ARCPOINT para crear puntos a partir de una cobertura de arcos que contenga en este caso el río o el límite del movimiento que coincide con la traza del río. Según las especificaciones que demos al comando obtendremos más o menos puntos.

La definición de la altitud sobre el nivel del mar de estos puntos (donde aflora la superficie de deslizamiento) se obtiene mediante el comando LATTICESPOT que utiliza el MDE y la cobertura de puntos para definir, mediante interpolación, la altitud de cada punto (ESRI, ARC Commands, 1994).

Puntos situados a lo largo de los perfiles interpretativos del deslizamiento:

La definición de estos puntos y su altitud sobre el nivel del mar se efectúa a partir de los perfiles interpretativos del deslizamiento dibujados en AutoCad. Para cada perfil se

definieron puntos con su altitud y la distancia horizontal de cada uno sobre el perfil hasta el sondeo número 8 que se tomaba como referencia. Una vez obtenida la información se traspasó a ARC/INFO donde se situaron los puntos encima de la cobertura arco de los perfiles y se introdujo también de manera manual las altitudes de estos puntos (que representan la superficie de rotura interpretada).

Finalmente se juntaron los puntos del pie del deslizamiento con los de los perfiles en una misma cobertura de puntos que se utilizó posteriormente para la interpolación de la superficie de rotura.

3. Datos sobre la profundidad del nivel piezométrico máximo y mínimo

La información de la piezometría se ha obtenido de los piezómetros instalados en el deslizamiento (ver tabla 1). Estos puntos digitalizados en AutoCad se han traspasado posteriormente a ARC/INFO constituyendo una cobertura de puntos.

Puntos adicionales se han introducido manualmente en el SIG utilizando alguna cobertura existente de arcos sobre el límite del deslizamiento para situar los puntos del pie y de las zonas encharcadas (ver mapa). Se crea un ítem con la profundidad del nivel piezométrico (o la altura de éste sobre el relieve en el caso de los puntos de las zonas encharcadas). Una vez situados, con el comando LATTICESPOT se obtiene la cota de los puntos sobre el nivel del mar a partir del MDE. Posteriormente se crea un ítem o campo de la tabla de atributos con la cota del nivel piezométrico, sumando o restando los valores de piezometrías a la altitud de los puntos.

4. Datos de la geometría superficial del deslizamiento

Para determinar el Factor de Seguridad del deslizamiento es necesario poseer información sobre los límites del deslizamiento en superficie y así delimitar las superficies a interpolar. La información del límite de la unidad inferior analizada se digitalizó en AutoCad y posteriormente se traspasó a ARC/INFO constituyendo una cobertura de polígonos.

Análisis de estabilidad: cálculo del Factor de Seguridad

Con los datos anteriores los pasos seguidos para el análisis han sido:

1. Interpolación de la superficie de rotura y de los niveles piezométricos máximo y mínimo
2. Derivación de los parámetros o variables necesarios para el cálculo
3. Cálculo del Factor de Seguridad

Estos tres pasos iniciales se han visto aumentados con dos adicionales más:

4. Cálculo de las fuerzas resistentes y las que conducen a inestabilidad
5. Cálculo de las fuerzas resultantes en los perfiles

1. Interpolación de superficies

Interpolación de la superficie de rotura

En este paso del procedimiento se trata de utilizar los métodos de interpolación disponibles en ARC/INFO para conseguir la superficie de rotura más adecuada para el análisis de estabilidad. Por tanto se trata de ir probando y familiarizándose con las funciones de interpolación del SIG para decidir las que mejor se adaptan a nuestros datos de partida, a nuestro análisis y a nuestras necesidades particulares según el deslizamiento a estudiar.

La obtención de la superficie de rotura final utilizada en el análisis de estabilidad del deslizamiento de Vallcebre ha seguido los siguientes pasos:

- 1- Creación de una cobertura límite utilizada para delimitar la interpolación.
- 2- Interpolación de la superficie de rotura mediante dos métodos por separado.
- 3- Ajuste de cada una de estas superficies al relieve (MDE) y combinación de las dos superficies en una sola.

- 1- Creación de una cobertura límite utilizada para delimitar la interpolación.

Esta cobertura se crea mediante un *buffer* para poder trabajar con todo el área deslizada que interesa. Con el comando BUFFER de ARC se crea un buffer de 8 metros sobre la cobertura arco o polígono que delimita el movimiento. La distancia de 8 metros se utiliza aquí debido al tamaño de las celdas del MDE con el que se está trabajando (15 * 15). Posteriormente en ARCEDIT (dentro de ARCTOOLS -Edit Tools-) se borran los arcos o polígonos internos dejando el arco o polígono exterior que servirá para delimitar el área de interpolación (ESRI, Arctools, 1994).

- 2- Interpolación de la superficie de rotura mediante dos métodos por separado.

En el caso de Vallcebre después de muchas pruebas con los distintos interpoladores disponibles en el SIG se ha tomado la decisión de utilizar dos de ellos por, según nuestro criterio, interpolar más acertadamente. Se han escogido dos superficies finales realizadas con las funciones KRIGING de GRID y TOPOGRID de ARC. La función KRIGING se ha definido con el método Universal1 y con la especificación Sample y 100 puntos de muestra. Un ejemplo del uso de la función es:

Grid: unive = kriging (puntos, rotura, buffer, grid, #, universal1, sample, 100, #, 15, 403097.5, 4673307.5, 404117.5, 4674327.5)

Para interpolar la superficie con TOPOGRID se han utilizado los siguientes comandos:

```
Arc: topogrid toporot 15
TopoGrid: boundary buffer
TopoGrid: datatype spot
TopoGrid: point puntos rotura
TopoGrid: enforce off
TopoGrid: end
```

Para visualizar las superficies creadas, además de visualizar las mallas regulares se puede utilizar el comando LATTICECONTOUR en ARC para visualizar la superficie resultante o bien en ARCPLOT, o en ARCTOOLS, o bien creando un archivo gráfico de la superficie transformada ahora en una cobertura de arcos representando curvas de nivel.

- 3- Ajuste de cada una de estas superficies al relieve (MDE) y combinación de las dos superficies en una sola.

La superficie de rotura final proviene de dos métodos de interpolación distintos en áreas distintas donde cada uno de los métodos interpolaba, a nuestro criterio, más acertadamente. Estas superficies se han ajustado al relieve debido a que cada una de ellas tenía algunas celdas cuya cota aparecía por encima de la del MDE. Una vez ajustada cada una de las superficies se ha creado una superficie resultante con la combinación de las dos anteriores, con la zona inferior realizada con TOPOGRID y la zona superior de la unidad inferior obtenida con KRIGING. El procedimiento para realizar los ajustes con el relieve, así como para crear la superficie combinada final se realiza en GRID y se puede hacer de dos maneras: utilizando la función CON (condicional) o utilizando la expresión condicional IF (con ELSE). En las siguientes líneas se muestran las expresiones utilizadas en este caso con la función CON.

Ajuste de la superficie obtenida con KRIGING con el relieve:

Grid: univefi = con ((unive > MDE), (MDE - 1), unive)

Ajuste de la superficie obtenida con TOPOGRID con el relieve:

Grid : toporotfi = con ((toporot > MDE), (MDE - 1), toporot)

Combinación de las dos superficies resultantes ajustadas con el relieve en una sola superficie para obtener la superficie final (ver mapa 1):

Grid: rotura = con ((toporotfi < 990), toporotfi, univefi)

Interpolación de las superficies piezométricas máxima y mínima

La superficie piezométrica máxima se ha interpolado utilizando la función KRIGING con el método Universal1 (ver mapa 3). Es la función de interpolación que se ha creído mejor para la piezometría. Lo mismo cabe decir para la superficie piezométrica mínima.

2. Derivación de parámetros utilizados en el cálculo

Una vez se obtienen las superficies necesarias, que son mallas regulares, se derivan los parámetros necesarios para calcular el Factor de Seguridad. Estos parámetros son:

1. La pendiente de la superficie de rotura que se deriva mediante una función del SIG aplicada a la superficie de rotura final (ver mapa 4).

$$\text{Pend} = \text{slope} (\text{rotura})$$

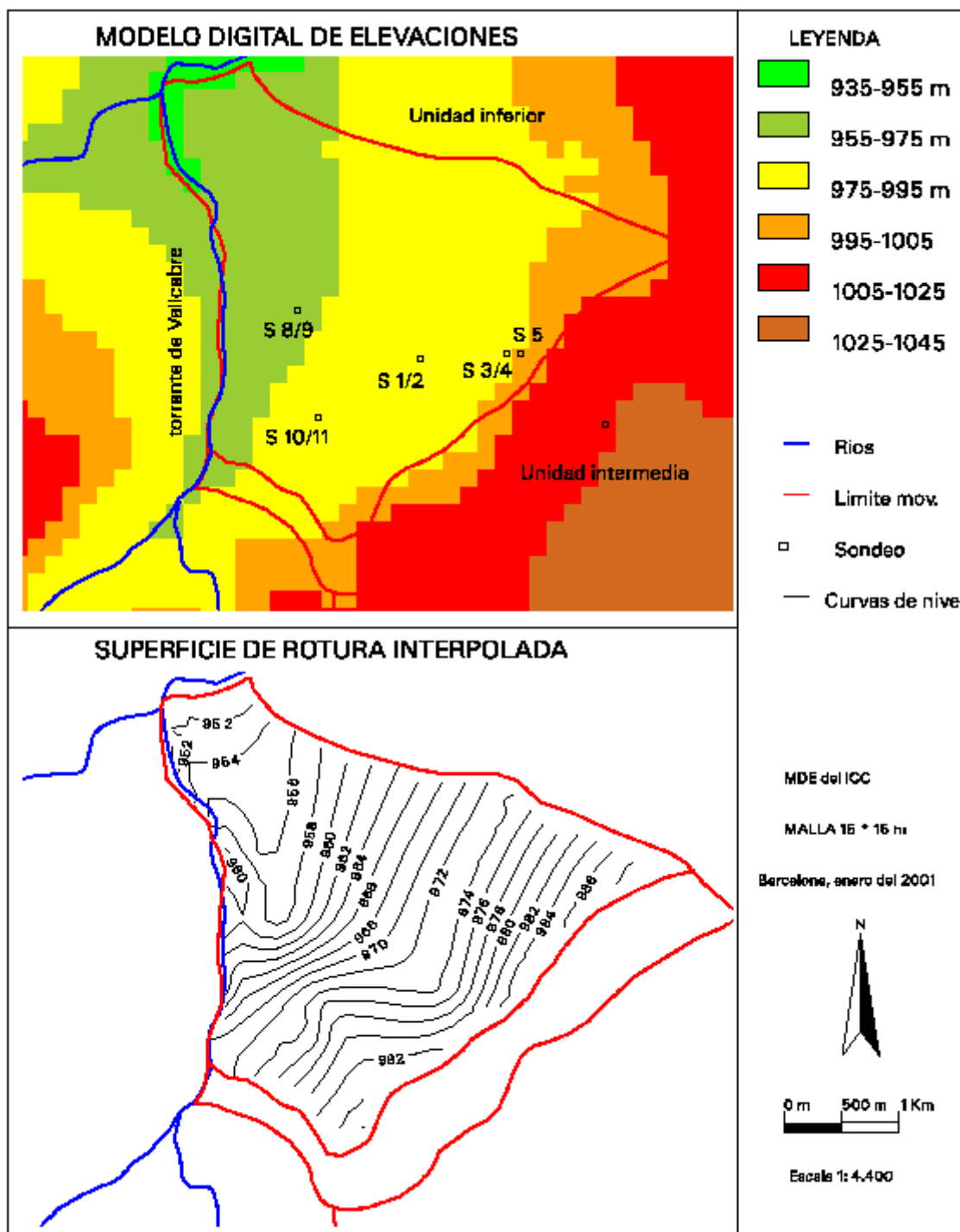
2. La profundidad de la superficie de rotura obtenida restando al MDE la superficie de rotura final (que es, a su vez, una malla regular de elevaciones).

$$\text{Profund} = \text{mde} - \text{rotura}$$

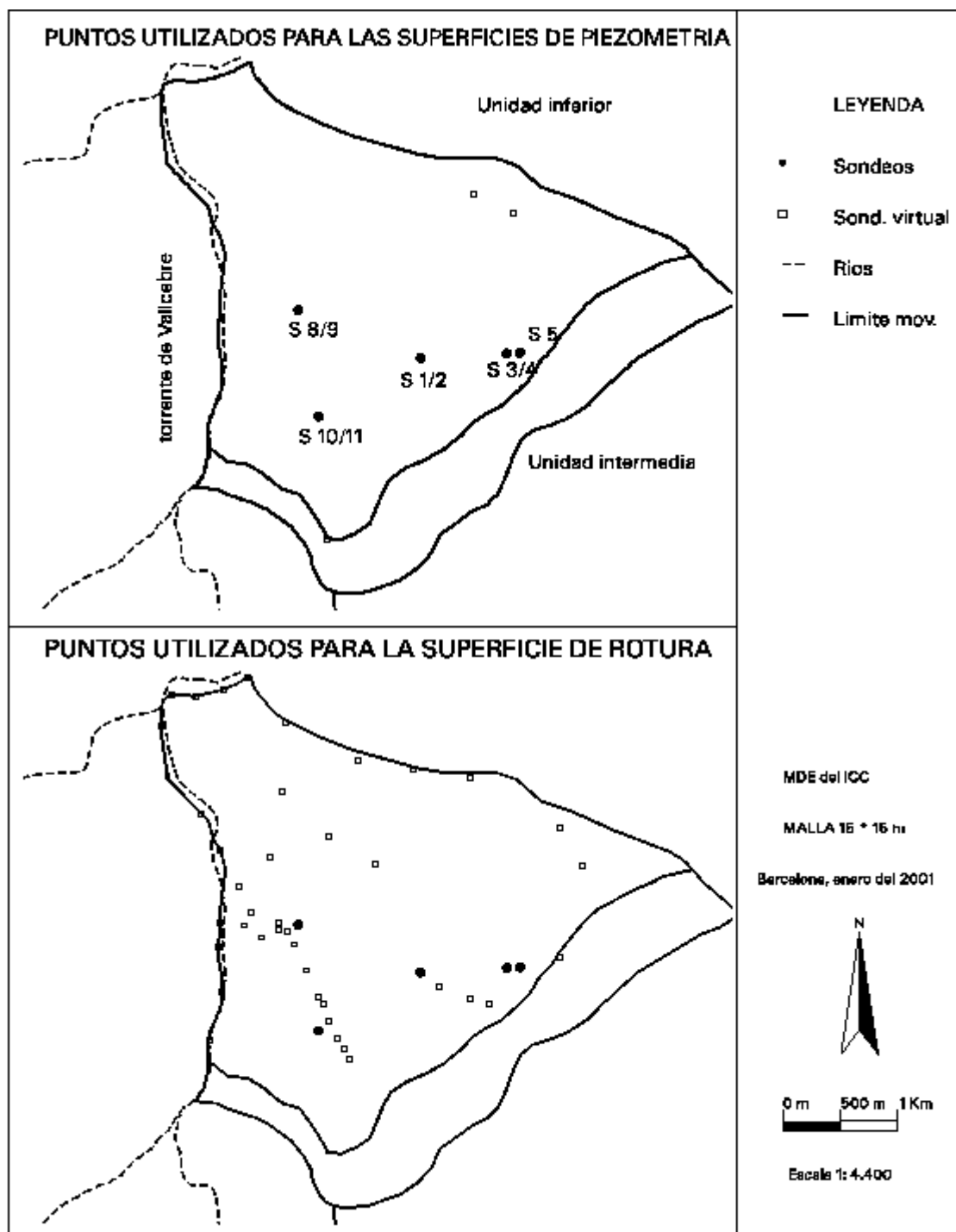
3. El grosor saturado sobre la superficie de rotura (en los casos de los niveles piezométricos máximo y mínimo). Este grosor saturado se obtiene de restar a la superficie piezométrica (que es una malla regular de elevaciones) la cota de la superficie de rotura (ver mapa 5).

$$\text{Piemax} = \text{pimax} - \text{rotura} \quad \text{y} \quad \text{Piemin} = \text{pimin} - \text{rotura}$$

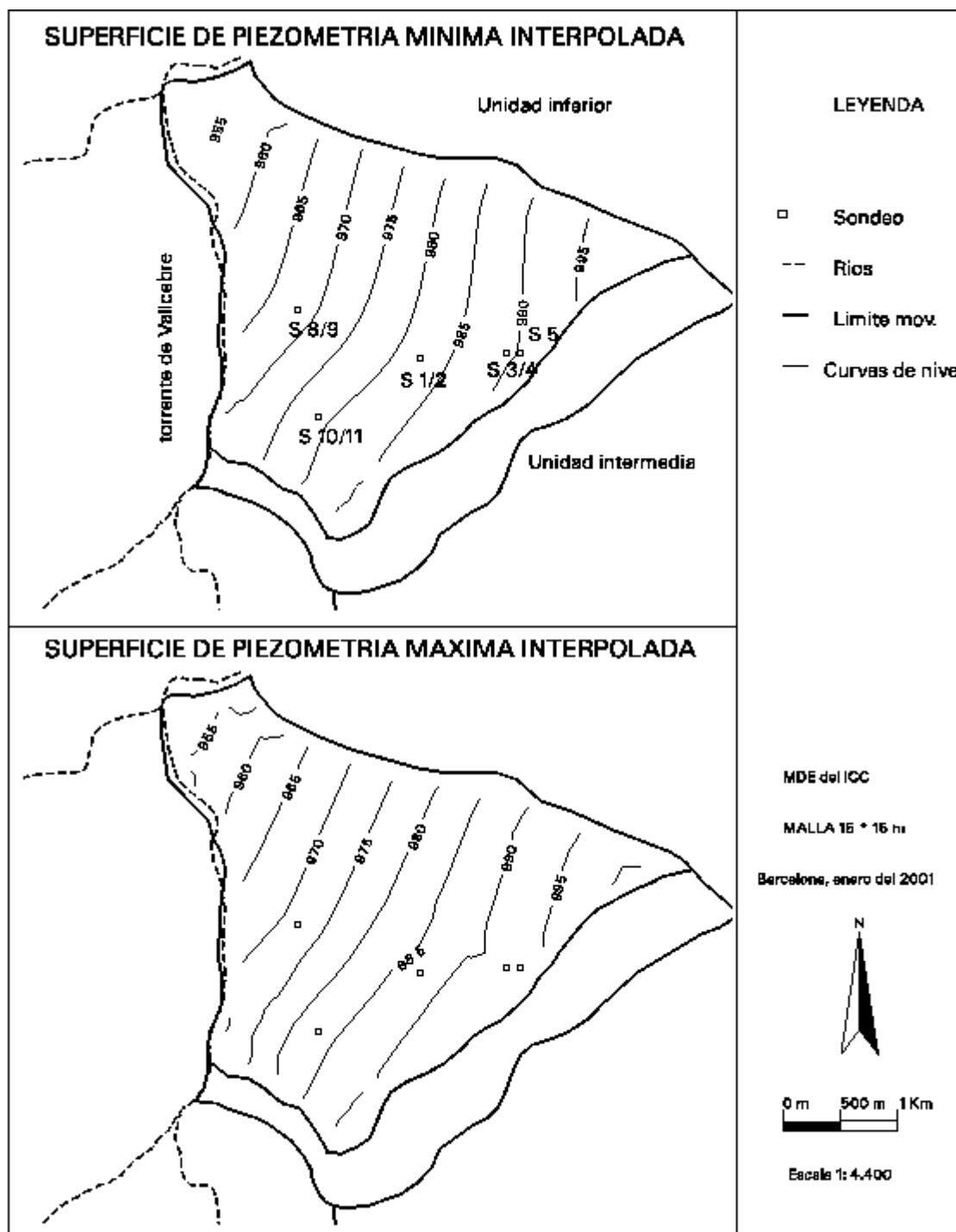
- Unidad inferior del deslizamiento de VALLCEBRE (Barcelona) -



Mapa 1: MDE y superficie de rotura interpolada de la unidad inferior del deslizamiento.

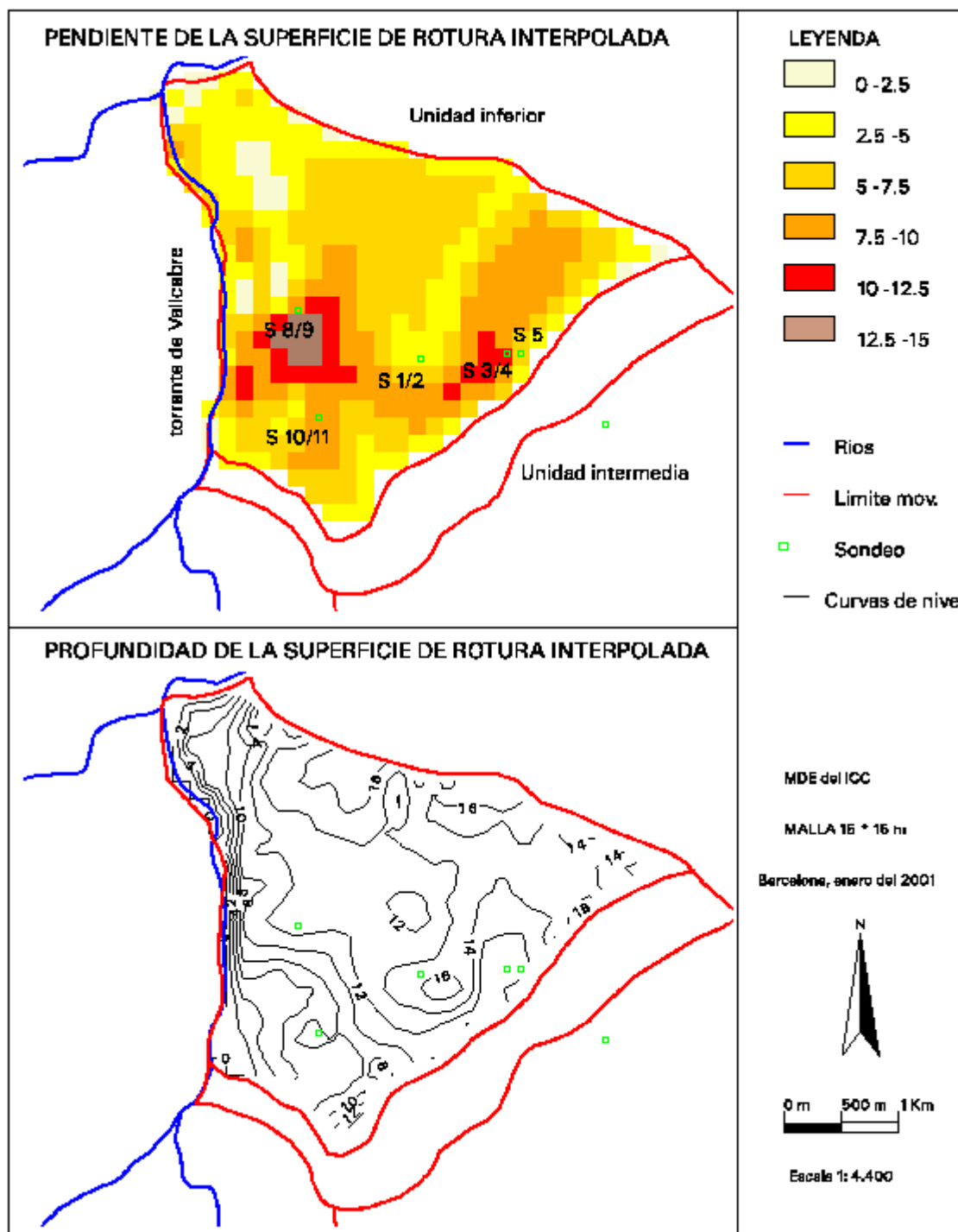


Mapa 2: Mapas con los puntos utilizados para interpolar las superficies.

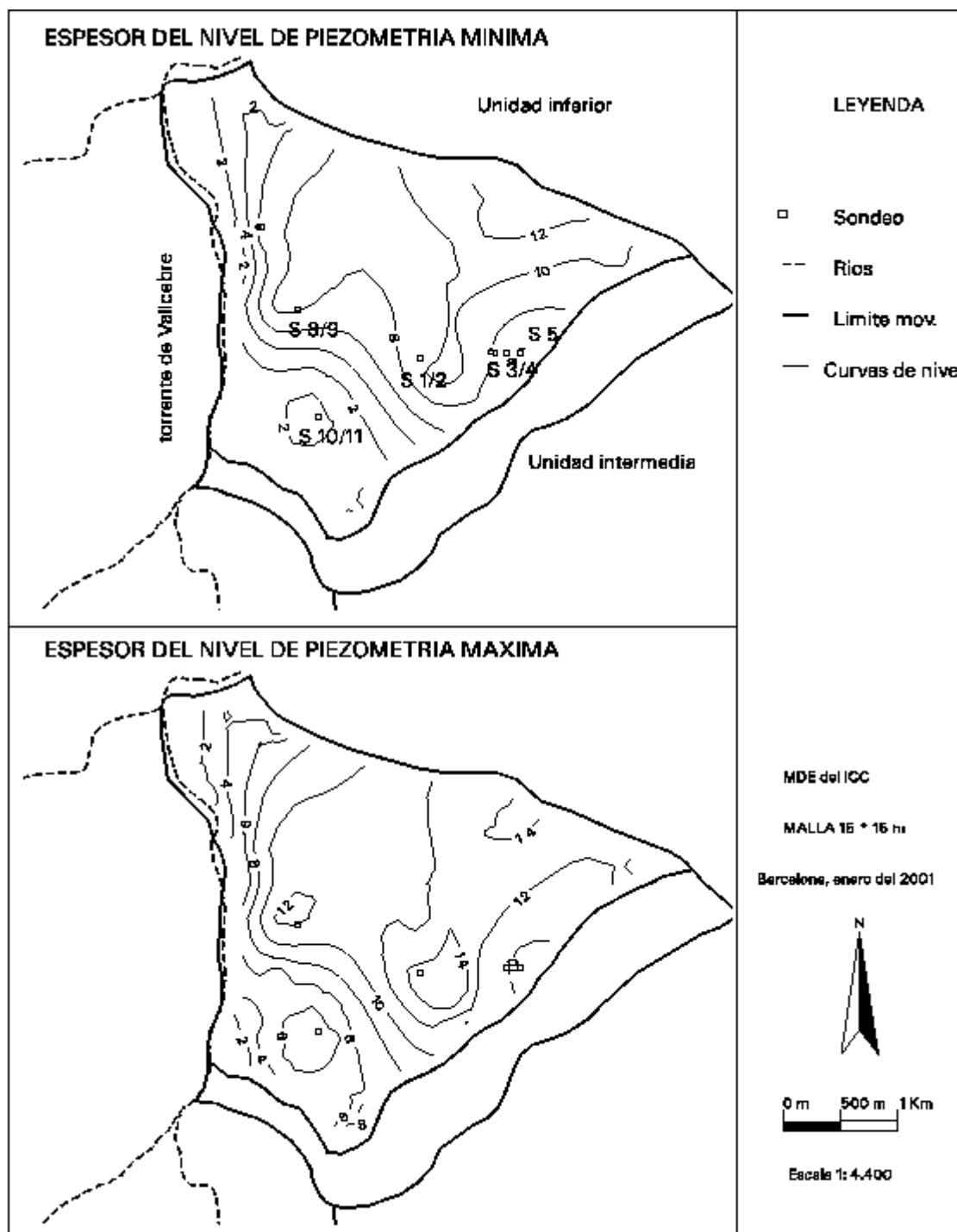


Mapa 3: Mapas de las superficies interpoladas de los niveles piezometricos.

- Unidad inferior del deslizamiento de VALLCEBRE (Barcelona) -



Mapa 4: Mapas de los parametros derivados (pendiente y profundidad de la superficie de rotura.



Mapa 5: Mapas de curvas de nivel de los espesores de la zona saturada sobre la rotura.

3. Cálculo del Factor de Seguridad

El Factor de Seguridad se calcula mediante el siguiente archivo de ejecución aml de ARC/INFO creado para tal efecto. Se calculan 4 situaciones según se utilice el ángulo de fricción 8 o 10 y con las dos superficies piezométricas (máxima y mínima):

```
&ARGS MAPA Z
&CALL %MAPA%
```

```
&ROUTINE FSEGFI188
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsegfi188 -DIRECTORY] &THEN KILL fsegfi188
grid
if ( DIFPIX < 0 ) fsegfi188 = ( FRIC8 div ( tan ( pendt div deg ) ) )
else FSEGFI188 = ( ( ( 21 * proftren * ( ( cos ( pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) ) -
( 10 * difpix ) ) * FRIC8 ) div ( 21 * proftren * ( cos ( pendt div deg ) ) * ( sin ( pendt div deg
) ) ) )
q
&STOP
```

```
&ROUTINE FSEGFIM88
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsegfim88 -DIRECTORY] &THEN KILL fsegfim88
grid
if ( DIFPIM < 0 ) fsegfim88 = ( FRIC8 div ( tan ( pendt div deg ) ) )
else FSEGFIM88 = ( ( ( 21 * proftren * ( ( cos ( pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) ) -
( 10 * DIFPIM ) ) * FRIC8 ) div ( 21 * proftren * ( cos ( pendt div deg ) ) * ( sin ( pendt div deg
) ) ) )
q
&STOP
```

```
&ROUTINE FSEGFI10
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsegfi10 -DIRECTORY] &THEN KILL fsegfi10
grid
if ( DIFPIX < 0 ) fsegfi10 = ( FRIC10 div ( tan ( pendt div deg ) ) )
else FSEGFI10 = ( ( ( 21 * proftren * ( ( cos ( pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) ) -
( 10 * difpix ) ) * FRIC10 ) div ( 21 * proftren * ( cos ( pendt div deg ) ) * ( sin ( pendt div deg
) ) ) )
q
&STOP
```

```
&ROUTINE FSEGFIM10
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsegfim10 -DIRECTORY] &THEN KILL fsegfim10
grid
if ( DIFPIM < 0 ) fsegfim10 = ( FRIC10 div ( tan ( pendt div deg ) ) )
else FSEGFIM10 = ( ( ( 21 * proftren * ( ( cos ( pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) ) -
( 10 * DIFPIM ) ) * FRIC10 ) div ( 21 * proftren * ( cos ( pendt div deg ) ) * ( sin ( pendt div deg
) ) ) )
```

q
&STOP

4. Cálculo de las fuerzas resistentes y de las que conducen a la inestabilidad

Los dos siguientes algoritmos definidos en archivos aml permiten calcular las fuerzas resistentes en cada celda y las inestabilizadoras respectivamente, en las mismas 4 situaciones analizadas.

Para las fuerzas resistentes se utiliza el siguiente algoritmo:

```
&ARGS MAPA Z
&CALL %MAPA%
```

```
&ROUTINE FS88
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fs88 -DIRECTORY] &THEN KILL fs88
grid
if ( DIFPIX < 0 ) fs88 = ( fric8 * 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div
deg ) ) )
else FS88 = ( ( ( 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) - ( 10 *
difpix ) ) * fric8 )
q
&STOP
```

```
&ROUTINE FSM88
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsm88 -DIRECTORY] &THEN KILL fsm88
grid
if ( DIFPIM < 0 ) fsm88 = ( FRIC8 * 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt
div deg ) ) )
else FSM88 = ( ( ( 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) - ( 10 *
difpiM ) ) * fric8 )
q
&STOP
```

```
&ROUTINE FS10
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fs10 -DIRECTORY] &THEN KILL fs10
grid
if ( DIFPIX < 0 ) fs10 = ( fric10 * 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div
deg ) ) )
else FS10 = ( ( ( 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) - ( 10 *
difpix ) ) * fric10 )
q
&STOP
```

```
&ROUTINE FSM10
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsm10 -DIRECTORY] &THEN KILL fsm10
grid
```

```

if ( DIFPIM < 0 ) fsM10 = ( FRic10 * 21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt
div deg ) ) )
else FSM10 = ( ((21 * proftren * ( cos (pendt div deg ) ) * ( cos ( pendt div deg ) ) ) - ( 10 *
difpiM ) ) * fric10)
q
&STOP

```

Las fuerzas inestabilizadoras se calculan con el algoritmo:

```

&ARGS MAPA Z
&CALL %MAPA%
&ROUTINE FSINES
&severity &error &ignore
&IF [EXIST fsINES -DIRECTORY] &THEN KILL fsINES
grid
fsINES = (21 * proftren * ( cos ( pendt div deg ) ) * ( sin ( pendt div deg ) ) )
q
&STOP

```

5. Cálculo de las fuerzas resultantes en los perfiles

El siguiente algoritmo definido en un archivo aml permite calcular las fuerzas resultantes (resistentes e inestabilizadoras) en cada perfil longitudinal.

```

&ARGS MAPA Z
mape dtmretclip
&CALL %MAPA%

&ROUTINE FS88
&severity &error &ignore
grid
setmask perfinf1
kk = select (orient, 'value > 68')
kk2 = select (orient, 'value < 68')
setmask off
setmask kk
KK1 = ZONALSUM (perfinf1, FS88)
Setmask off
Setmask kk2
Kk3 = zonalsum (perfinf1, fs88)
Setmask off
Setmask perfinf1
Kk4 = con (isnull (kk1), 0, kk1)
Kk5 = con (isnull (kk3), 0, kk3)
Gridshades kk4
Cellvalue kk4 *
&pause
Gridshades kk5
Cellvalue kk5 *
&pause
Setmask off

```

```

KILL KK ALL
KILL KK2 ALL
Kill kk1 all
KILL KK3 ALL
KILL KK4 ALL
Kill kk5 all
&stop

```

```

&ROUTINE FSM88
&severity &error &ignore
grid
setmask perfinf1
kk = select (orient, 'value > 68')
kk2 = select (orient, 'value < 68')
setmask off
setmask kk
KK1 = ZONALSUM (perfinf1, FSM88)
Setmask off
Setmask kk2
Kk3 = zonalsum (perfinf1, fsm88)
Setmask off
Setmask perfinf1
Kk4 = con (isnull (kk1), 0, kk1)
Kk5 = con (isnull (kk3), 0, kk3)
Gridshades kk4
Cellvalue kk4 *
&pause
Gridshades kk5
Cellvalue kk5 *
&pause
Setmask off
KILL KK ALL
KILL KK2 ALL
Kill kk1 all
KILL KK3 ALL
KILL KK4 ALL
Kill kk5 all
&stop

```

```

&ROUTINE FS10
&severity &error &ignore
grid
setmask perfinf1
kk = select (orient, 'value > 68')
kk2 = select (orient, 'value < 68')
setmask off
setmask kk
KK1 = ZONALSUM (perfinf1, FS10)
Setmask off
Setmask kk2
Kk3 = zonalsum (perfinf1, fs10)

```

```

Setmask off
Setmask perfinf1
Kk4 = con (isnull (kk1), 0, kk1)
Kk5 = con (isnull (kk3), 0, kk3)
Gridshades kk4
Cellvalue kk4 *
&pause
Gridshades kk5
Cellvalue kk5 *
&pause
Setmask off
KILL KK ALL
KILL KK2 ALL
Kill kk1 all
KILL KK3 ALL
KILL KK4 ALL
Kill kk5 all
&stop

```

```

&ROUTINE FSM10
&severity &error &ignore
grid
setmask perfinf1
kk = select (orient, 'value > 68')
kk2 = select (orient, 'value < 68')
setmask off
setmask kk
KK1 = ZONALSUM (perfinf1, FSm10)
Setmask off
Setmask kk2
Kk3 = zonalsum (perfinf1, fSm10)
Setmask off
Setmask perfinf1
Kk4 = con (isnull (kk1), 0, kk1)
Kk5 = con (isnull (kk3), 0, kk3)
Gridshades kk4
Cellvalue kk4 *
&pause
Gridshades kk5
Cellvalue kk5 *
&pause
Setmask off
KILL KK ALL
KILL KK2 ALL
Kill kk1 all
KILL KK3 ALL
KILL KK4 ALL
Kill kk5 all
&stop

```