

CÁLCULO DE CAUDALES PUNTA Y DISEÑO DE SISTEMAS DE DRENAJE

MODELOS DIGITALES DE FLUJO CORREGIDO (MDFC)

FRANCISCO JOSÉ FERNÁNDEZ RODRÍGUEZ. Dr. Geólogo.

Dpto. de Geología. Universidad de Oviedo

ROSANA MENÉNDEZ DUARTE. Dr. Geólogo.

INDUROT. Universidad de Oviedo

RAÚL RIERA VALDÉS. Ingeniero Técnico de Minas.

RESUMEN: La elaboración de una base de datos topográfica, geológica y de vegetación gestionada desde un sistema de información geográfica (SIG) ha permitido definir con precisión la red de drenaje del sistema hidráulico estudiado, así como calcular un coeficiente de escorrentía matricial, con una precisión de celda de 25 m². El coeficiente de escorrentía se aplica sobre el modelo de flujo acumulado (MDF) como un coeficiente reductor de área que genera un modelo de flujo acumulado corregido (MDFC). Se ha comprobado que este nuevo modelo es más real que el derivado del que se calcula siguiendo el método Racional, en el que se toman valores medios de pendiente, tipo de recubrimiento litológico y vegetal, ante la imposibilidad de calcular con precisión el coeficiente de escorrentía. El nuevo método se ha aplicado en el diseño de un sistema de drenaje perimetral de una explotación minera y se comprobó que los caudales punta calculados por el MDFC son siempre menores que los calculados por el método Racional tradicional, por lo que los sistemas de drenaje diseñados según este nuevo método son menos costosos y más eficaces.

PALABRAS CLAVE: MODELOS DIGITALES DE TERRENO, DRENAJE, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, CAUDALES

ABSTRACT: The development of a topographical, geological and the vegetable cover database manipulate from a Geographic Information System (GIS) has allowed a accurate definition of the drainage network from the hydraulic system analysed along with calculation of the runoff coefficient at 25 m² resolution. The runoff coefficient is applied to the accumulated flow model (FDM) as a size reduction coefficient. Using this coefficient we made a corrected accumulate flow model (CFDM) that allows the design of the drainage system. We have proved that this new model is more accurate than that the calculated following the Rational method, where the slope and lithological and vegetable cover have average values because the evaluation of the actual runoff coefficient is impossible by traditional methods at this scale. The new hydrometrical method has been applied in order to design the drainage network of a mine. We observe that the peak discharge data calculate by the CFDM are always lower than those calculated by the traditional Rational method. This indicates that the drainage system designed by this new method is more accurate and efficient.

KEYWORDS: DIGITAL TERRAIN MODELS, DRAINAGE, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM, RIVER CAUDAL

INTRODUCCIÓN

El relieve presenta sistemas de drenaje diseñados por la propia naturaleza que son consecuencia del equilibrio dinámico entre la erosión y la sedimentación (Brookes, 1993). Este equilibrio se alcanza para periodos de tiempo mayores que cualquier registro humano, aunque circunstancialmente los cauces de los ríos se pueden desbordar cuando se alcanzan caudales punta anómalamente altos para los que la red de drenaje no se encuentra adaptada y en los que se suelen

producir cuantiosos daños. Así, los caudales pueden aumentar de forma repentina e inusual y la red de drenaje se ajusta a estas condiciones hidráulicas anómalas produciendo transformaciones drásticas en la red de drenaje, mediante la modificación de sus márgenes, fondo y trazado con efectos colaterales que casi siempre resultan catastróficos en zonas habitadas.

Gran parte de las obras de ingeniería se ubican en un medio físico natural, el cual se modifica para favorecer el desarrollo de la misma. Este hecho justifica la intervención

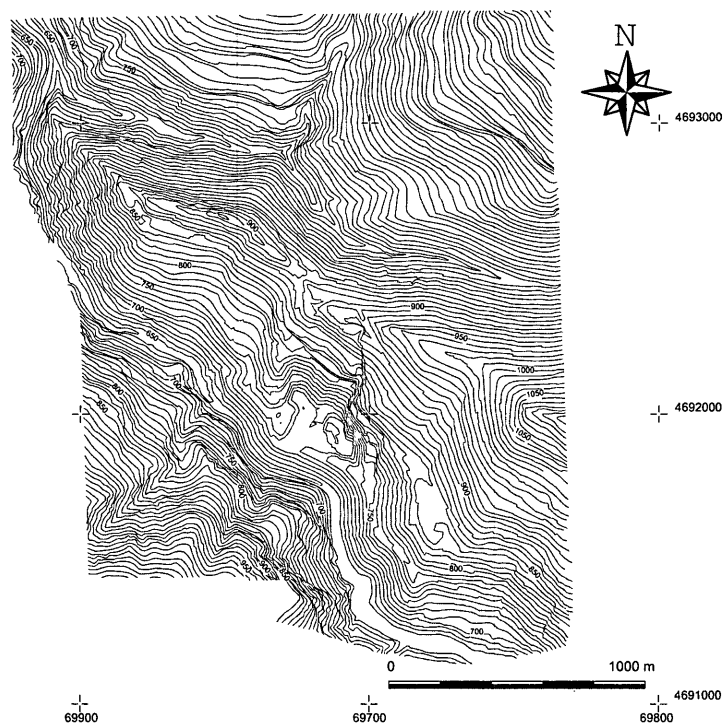


Figura 1:
Topografía
Base de la
concesión
minera.

en el sistema hidráulico afectado para que la obra de ingeniería altere en la menor medida de lo posible el sistema hidráulico natural, y para que el sistema de drenaje de la obra de ingeniería favorezca directa e indirectamente la operatividad de dicha obra. Para ello se hace imprescindible un estudio hidrométrico del área afectada que permita hacer un modelo fiable de la red de drenaje y de sus caudales punta, sobre el que diseñar un sistema de drenaje. Los cálculos hidrométricos para la estimación de caudales punta y la geometría precisa de la red de drenaje son los elementos básicos, sobre los que se elaboran los sistemas de drenaje de cualquier obra pública (Chow, 1962; Waananen, 1977). Sin embargo la falta de registros pluviométricos precisos, la extensión de parámetros hidráulicos de forma subjetiva, la asunción de constantes empíricas definidas para otras zonas diferentes a las estudiadas y la subjetividad en la definición de las cuencas hidráulicas estudiadas, invalidan en tal forma los cálculos realizados que obligan a asumir estrategias constructivas muy conservadoras y por lo tanto más costosas de lo necesario y, en el peor de los casos, a diseñar sistemas de drenaje no operativos.

El desarrollo de bases de datos pluritemáticas gestionadas desde un SIG para el estudio de redes de drenaje naturales (Fernández et al., 1997; Menéndez Duarte et al., 1997) y la elaboración de modelos digitales del terreno (MDT's) para el estudio del relieve (Doyle, 1978; Walton, 1989; Moore, et al 1993) empiezan a ser herramientas de trabajo habituales en el análisis de cuencas hidrográficas

(Jenson, 1999; Montgomery et al, 1998; Lane et al, 1998). Sin embargo, en raras ocasiones se trata de calcular caudales punta por el método Racional con el apoyo del SIG (Francés y Benito, 1995; Ferrer et al., 1995) y la elaboración de MDT's auxiliares para el cálculo del coeficiente de escorrentía. En este trabajo se propone una nueva estimación de los caudales punta, mediante una adaptación de las unidades litológicas y de vegetación definidas para el método racional utilizado por el Soil Conservation Service (SCS) de los EE.UU, y la construcción final de un modelo de flujo acumulado corregido (MDFC). Este MDFC permite, además de obtener los caudales punta de las cuencas que se definen en el área de estudio, diseñar el sistema de drenaje más conveniente para las necesidades de la obra. En este artículo se describe el procedimiento para realizar estos cálculos y se muestra un ejemplo de aplicación en una concesión de explotación minera de pizarra para techar.

DEFINICIÓN DE LAS CUENCAS Y REDES DE DRENAJE

Una cuenca hidrográfica se define como un área cuyo perímetro incluye todo el terreno que vierte aguas hacia la red de drenaje presente aguas arriba de un punto denominado nivel de base. La mayor parte de los estudios hidrométricos de caudales punta toman como áreas de cuenca el total del área estudiada, sin tener en cuenta el hecho de que viertan o no a un único punto, ante la dificultad que supone un estudio detallado del relieve del área estudiada. Ciertamente, la definición de las cuencas de una determinada zona no es sencilla. Así, la utilización de la topografía permite establecer una aproximación a la definición de la cuenca que siempre dependerá de la escala utilizada, al ser el relieve una variable fractal. Teniendo esto en cuenta se deben seleccionar escalas adecuadas al sistema estudiado, es decir la topografía base tiene que representar todos los elementos del relieve que modifiquen el sistema de drenaje. De ellos los más importantes son la red de drenaje natural junto con la red viaria. Si se considera como anchura media de los caminos carreteros 5 m, las topografías de escalas mayor a 1:5.000 resultan muy inadecuadas para este tipo de estudios.

Una vez seleccionada la escala, la forma convencional de definir la cuenca hidrográfica y su red de drenaje es mediante la identificación de las divisorias de aguas y los fondos de valle, considerando también la red viaria que los puede atravesar, con ayuda del trazado cartográfico de las curvas de nivel (Figura 1).

Sin embargo en la actualidad es posible definir con gran precisión las cuencas hidrográficas y su red de drenaje mediante la utilización de modelos digitales del terreno (MDT), puesto que al tratar exclusivamente de la distribución espacial de variables cuantitativas y continuas, pueden considerarse en este contexto, como una aportación de los SIG que permite la entrada de nueva información en los procesos de modelización

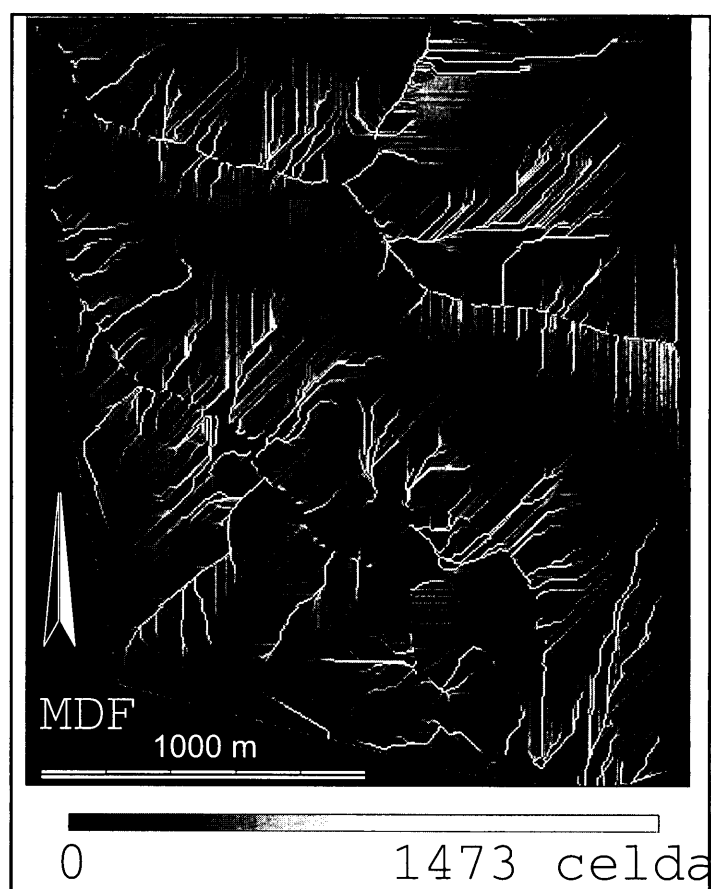
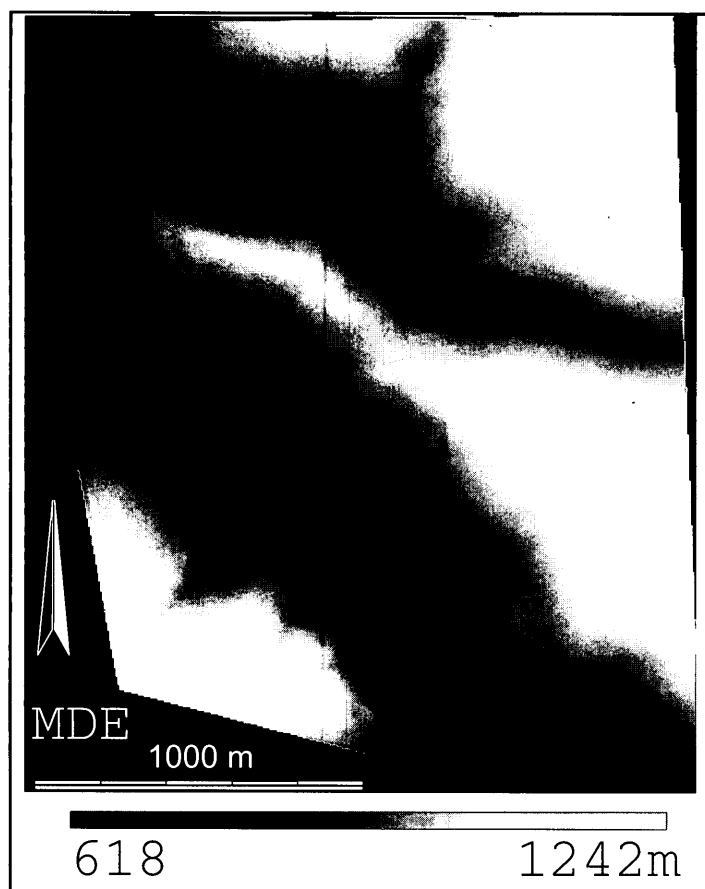


Figura 2: Modelo digital de elevaciones de la concesión minera. Figura 3: Modelo digital de flujo acumulado de la concesión minera.

cartográfica (Tomlin, 1980). En el ejemplo aplicado se ha empleado un sistema de información geográfico (SIG) (Software ARC/INFO, versión 7.1.2.) y se ha creado un modelo digital de elevaciones (MDE) matricial (Figura 2) interpolando a partir de la topografía de una concesión de explotación minera de pizarra para techar. La escala original del levantamiento topográfico es la 1:2.000 y se dispuso del mismo en formato vectorial, con curvas de nivel cada 2 m. Este MDE matricial se construyó con celdas regulares de 25 m² (5x5 m), una resolución que está de acuerdo con la escala de la topografía original y suficiente para el análisis planteado.

A partir del MDE, en el que la altitud es tratada como una variable continua, se puede construir un modelo de flujo acumulado (MDF) (Figura 3), calculando, para cada celda, el número de celdas que vierten a ella (Jenson y Domingue, 1988). Esto es posible mediante el cálculo de la máxima pendiente desde cada celda a las ocho adyacentes. Con este criterio se crea un modelo intermedio de dirección de flujo (MDD: Modelo Digital Dirección de Flujo), en el que cada celda dice a cual vierte en función de las elevaciones. A través de este modelo se calculará el MDF que permite conocer cuales son los puntos de máxima acumulación de caudal (red de drenaje potencial) y sobre la base de ellos diseñar el trazado del sistema de drenaje.

En la concesión minera utilizada como ejemplo se han diferenciado 19 cuencas de extensión muy variada, tal y como se observa en la Figura 4, al tratarse de una ladera de una montaña y no propiamente de una cuenca de drenaje. Como todas las cuencas encontradas son de superficie menor a 1 km² no se verán afectadas por el efecto de "no simultaneidad de lluvia" y por lo tanto el factor reductor de área (ARF) no ha influido en el cálculo del caudal punta.

CÁLCULOS HIDROMÉTRICOS PARA UN ÁREA DETERMINADA

Una vez dividida el área de estudio en cuencas y subcuencas hidrográficas es posible calcular los caudales punta de las cuencas incluidas en el área a drenar.

Los caudales punta son una variable primaria para el diseño de sistemas de drenaje. Para su cálculo se pueden usar modelos calibrados en los que los caudales se calculan mediante un análisis de regresión de los registros pluviométricos para un periodo de tiempo denominado periodo de retorno, o modelos no calibrados en los que los caudales punta son calculados sobre la base de formulas empíricas en las que las variables que intervienen son el área de drenaje, el uso del

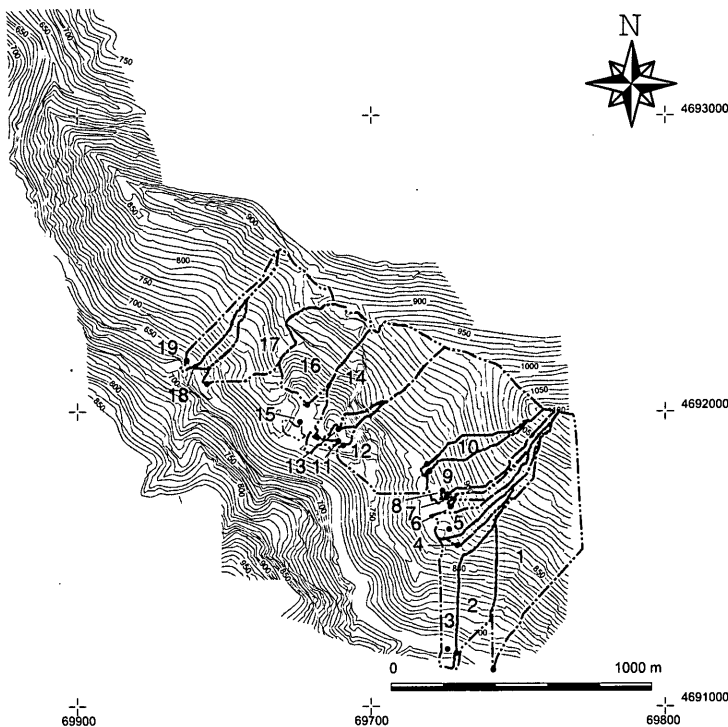


Figura 4:
Cuencas de
drenaje
diferenciadas
en la
concesión
minera.

suelo, la intensidad de la lluvia y la pendiente, junto con otros coeficientes empíricos que nunca tienen la importancia de las variables antes mencionadas (McCuen, 1989). De entre estos últimos métodos el más ampliamente utilizado es el método Racional (Pilgrim, 1986). Este método es publicado por Emil Kuichling en 1889 (Chow, 1962), mediante la ecuación (1)

$$Q = CIA \quad (1)$$

En la que el caudal punta (Q) se obtiene al multiplicar el área de la cuenca (A) por la intensidad media máxima de la lluvia (I) y por un coeficiente de escorrentía (C).

En el ejemplo de aplicación del presente trabajo se ha utilizado la ecuación (2)

$$Q = \frac{C_i A}{3.6} K \quad (2)$$

En la que también interviene el coeficiente de uniformidad (K) que cuantifica la influencia de las variaciones temporales de un episodio lluvioso y el factor empírico 3.6 (Temez, 1991) adaptado a la normativa 5.2-I.C. española (MOPU, 1990). Pa-

ZONA DE ESTUDIO



ra la estimación K se utiliza la ecuación (3) propuesta por Ferrer (1993)

$$K = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14} \quad (3)$$

En la que se calcula el tiempo de concentración según la ecuación (4)

$$T_c = 0.3 \cdot \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0.76} \quad (4)$$

Donde (L) es el recorrido máximo del agua dentro de la cuenca, desde su inicio hasta el punto de salida, y (J) la pendiente media de la cuenca.

En el ejemplo de la explotación minera el cálculo de T_c se apoyó en algunos de los MDT's derivados del modelo de elevaciones y descritos en la sección anterior.

Utilizando el modelo de direcciones de flujo (MDD), se calculó la longitud de flujo, creando un Modelo de Longitud de flujo (MDL) en el que para cada celda se calcula la longitud de llegada de agua de escorrentía a ella, siguiendo la línea de drenaje principal, desde la cabecera de su cuenca. Utilizando este MDL se asignó el valor L de la ecuación (4) al nivel de base de cada una de las 19 cuencas definidas (Figura 4).

También a partir del MDD y conocido el nivel de base de cada cuenca, se delimita cada cuenca y éstas se combinan con el modelo digital de pendientes (MDP), asignando a cada una de ellas un valor de pendiente media, J en la ecuación (4). Los valores el tiempo de concentración (T_c) así obtenidos, para cada una de las cuencas, se dan en las tablas 4 y 5.

Mientras que para la obtención de la intensidad media máxima (I) se utiliza la ecuación (5) propuesta por Temez (1987):

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_t}{I_d} \right)^{28^{0.1 - t^{0.1}}} \quad (5)$$

I_t (mm/h): Intensidad media correspondiente al intervalo de duración t deseado.

I_d (mm/h): Intensidad media diaria de precipitación, correspondiente al período de retorno considerado. Es igual a $P_d/24$.

P_d (mm): Precipitación total diaria correspondiente a dicho período de retorno.

I_t/I_d : Cociente entre la intensidad horaria y la diaria, independiente del período de retorno. Este cociente se obtiene directamente del Mapa para el cálculo de máximas precipitaciones diarias en la España peninsular (Figura 5) y que permite considerar explícitamente la situación geográfica de la cuenca objeto de estudio.

Los datos de intensidad de precipitaciones se calculan para un período de retorno determinado, en función de los datos

TABLA I: PERÍODO DE RETORNO, FRECUENCIA Y RIESGO DE FALLOS OBTENIDOS A PARTIR DE LA SERIE ANUAL DEL PLUVIÓMETRO DE ODOLO

AÑO	INTENSIDAD DIARIA (I_{24}) (mm/día)	PERÍODO DE RETORNO	FRECUENCIA	RIESGO DE FALLOS
81	19,00	1,00	1,000	1,000
85	21,00	1,06	0,944	0,953
94	31,60	1,13	0,889	0,916
90	33,80	1,20	0,833	0,884
82	36,00	1,29	0,778	0,855
86	37,00	1,38	0,722	0,830
83	39,90	1,50	0,667	0,808
98	42,40	1,64	0,611	0,787
91	43,20	1,80	0,556	0,768
87	45,00	2,00	0,500	0,750
84	45,00	2,25	0,444	0,734
95	45,20	2,57	0,389	0,718
88	48,00	3,00	0,333	0,704
92	53,50	3,60	0,278	0,690
97	55,00	4,50	0,222	0,677
89	55,00	6,00	0,167	0,665
96	61,10	9,00	0,111	0,654
93	62,20	18,00	0,056	0,643

disponibles en las estaciones pluviométricas presentes en el área de estudio, junto con el valor que se obtiene del Mapa para el cálculo de precipitaciones máximas diarias en la España peninsular.

El estudio pluviométrico fue realizado sobre una base de datos inicial de siete estaciones localizadas en un radio de 40 km sobre la zona objeto de estudio, situadas en las localidades de Odollo, Silván, Benuza, Quintanilla de Losada, Castrillo de cabra y Sigüenza, a cotas comprendidas entre los 840 y los 1068 m sobre el nivel del mar. De ellas se seleccionó el pluviómetro de Odollo por localizarse en la cuenca objeto de estudio. El registro de la estación de Odollo, propiedad de ENDESA, permite calcular un período de retorno máximo de 18 años en el que se registra una intensidad de precipitación máxima de 62,2 mm/día (Tabla I). Este período de retorno es significativo para este tipo de estudios puesto que es mayor que el período de vida del sistema de drenaje a diseñar y aunque algunas de las estaciones analizadas tienen registros pluviométricos más antiguos, éstos son discontinuos y alejados de la zona objeto de estudio. No obstante, es de destacar que el registro de precipitación máximo histórico es de 120 mm/día el 24 de Febrero de 1977 registrado en la estación de Quintanilla de Losada de la Confederación hidrográfica del Norte y que prácticamente dobla el valor máximo considerado en este trabajo.

Con estos datos el cociente (I_t/I_d) toma el valor de 50 mm/día y el resultado obtenido en la ecuación (5) se sustituye en la ecuación (2).

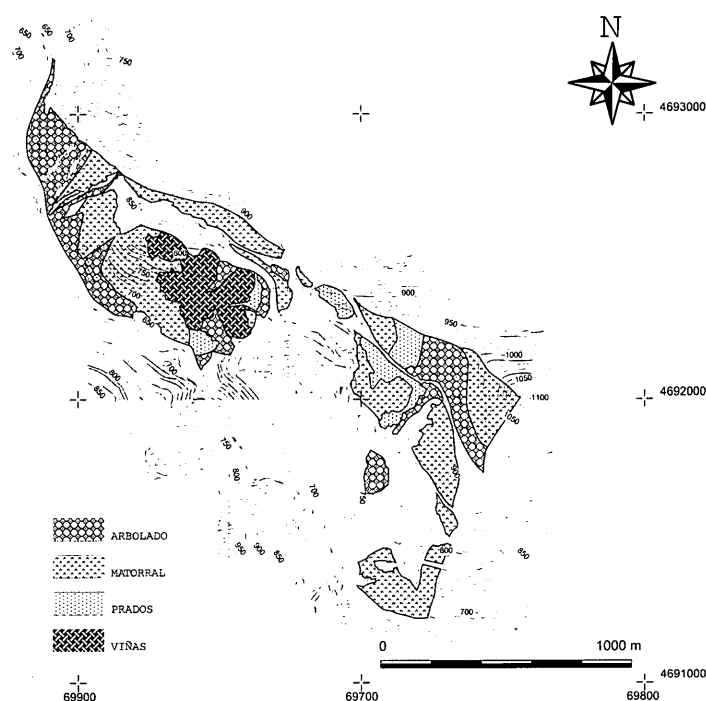
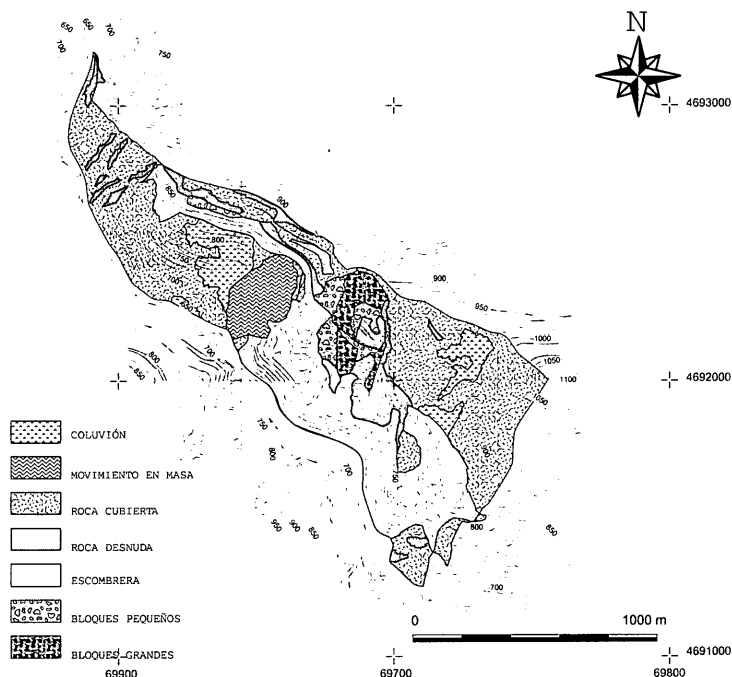


Figura 6.
Cartografía de
unidades
vegetales de la
CE.

Coefficiente de escorrentía (C)

Figura 7.
Cartografía de
recubrimientos
litológicos de
la CE.

De las variables que intervienen en la ecuación (2) la más difícil de determinar con precisión es el coeficiente de escorrentía, que se define como el cociente entre la lluvia total y la lluvia neta caída durante un intervalo de tiempo. Siendo la lluvia



total la cantidad absoluta de agua que cae sobre la cuenca durante dicho intervalo y la lluvia neta la parte de la lluvia que compone la escorrentía directa. Así, en un área heterogénea se deben definir tantos coeficientes de escorrentía como variaciones de las combinaciones entre los factores pendiente, tipo de terreno y tipo de cubierta vegetal que se observen en la zona estudiada, adjudicando a cada tipo resultante un coeficiente de escorrentía.

Existen distintos métodos para el cálculo de coeficientes de escorrentía (ver por ej. Capítulo 8 de McCuen, 1989), todos ellos basados en calibraciones empíricas derivadas de la relación entre el agua precipitada en una determinada zona y el agua recogida en superficie consecuencia de dicha precipitación. En este trabajo se ha seleccionado la ecuación (6) propuesta por el Soil Conservation Service (SCS) de los EE.UU. (SCS, 1972):

$$C = \frac{((P_d/P_0 - 1) \cdot ((P_d/P_0) + 23))}{((P_d/P_0 - 1) + 1)^2} \quad (6)$$

Siendo C el coeficiente de escorrentía, P_d la precipitación diaria y P_0 el umbral de escorrentía. Para determinar P_0 , que es el que fija las magnitudes absolutas del coeficiente de permeabilidad, es necesario conocer si la pendiente del terreno es mayor o menor del 3%, el tipo de suelo o substrato litológico y el tipo de cubierta vegetal. Con esta información el SCS elaboró una tabla en la que se definen unos P_0 determinados.

En la concesión minera utilizada como ejemplo en este trabajo se partió de la adaptación de la tabla del SCS para las características climáticas y territoriales de España (Ferrer, 1993). Se realizó una cartografía de tipo de recubrimientos litológicos presentes en una concesión de explotación minera (Figura 6) y de tipos de cubierta vegetal (Figura 7) y finalmente se estableció una correlación entre las 30 unidades de escorrentía encontradas con las unidades equivalentes del SCS (Tabla II).

La cartografía se ha realizado mediante trabajo de campo, con el apoyo de la fotografía aérea. Una vez elaborados los mapas, a escala original 1:2.000, fueron digitalizados e incorporados a la base de datos y en el SIG se generó un mapa sintético de las cartografías de recubrimientos litológicos y de vegetación. Para completar la información necesaria para el cálculo de los coeficientes de escorrentía, se seleccionaron del Modelo Digital de Pendientes (MDP) las celdas de pendiente < 3°.

La combinación en el SIG de las capas de depósitos, vegetación y pendientes menores de 3° permitió crear un nuevo mapa en el que a cada unidad del territorio se le asigna un valor corrector correspondiente a su coeficiente de escorrentía, de acuerdo con las unidades establecidas en la Tabla II.

Finalmente, se ha considerado el estado previo de humedad del suelo en los valores obtenidos del umbral de escorrentía.

TABLA II: CORRESPONDENCIA ENTRE LAS UNIDADES DEFINIDAS Y LAS ELABORADAS POR EL SCS

Unidad	Pendiente %	UNIDAD DEFINIDA		UNIDAD EQUIVALENTE S.C.S.	
		DEPÓSITO	VEGETACIÓN	DEPÓSITO	VEGETACIÓN
1	> 3	Bloque grande		Roca permeable	
2	> 3	Bloque grande	Praderías	Grupo D	Praderas (Pobre)
3	< 3	Bloque grande	Praderías	Grupo D	Praderas (Pobre)
4	> 3	Bloque pequeño		Grupo A	Barbecho (R)
5	> 3	Coluvión		Grupo C	Barbecho (N)
6	> 3	Coluvión	Arboleda	Grupo C	Masa forestal (Clara)
7	> 3	Coluvión	Matorral	Grupo C	Masa forestal (Media)
8	> 3	Coluvión	Praderías	Grupo C	Praderas (Pobre)
9	> 3	Coluvión	Viñas	Grupo C	Barbecho (N)
10	> 3	Escombreras		Grupo A	Barbecho (N)
11	< 3	Escombreras		Grupo A	Barbecho (N)
12	> 3	Escombreras	Arboleda	Grupo A	Masa forestal (Clara)
13	> 3	Escombreras	Matorral	Grupo A	Masa forestal (Media)
14	> 3	Escombreras	Praderías	Grupo A	Praderas (Pobre)
15	> 3	Movimiento en masa	Arboleda	Grupo C	Masa forestal (Clara)
16	> 3	Movimiento en masa	Matorral	Grupo C	Masa forestal (Media)
17	> 3	Movimiento en masa	Praderías	Grupo C	Praderas (Pobre)
18	> 3	Movimiento en masa	Viñas	Grupo C	Barbecho (R)
19	> 3	Roca cubierta		Grupo D	Masa forestal (Muy clara)
20	< 3	Roca cubierta		Grupo D	Masa forestal (Muy clara)
21	> 3	Roca cubierta	Arboleda	Grupo D	Masa forestal (Clara)
22	< 3	Roca cubierta	Arboleda	Grupo D	Masa forestal (Clara)
23	> 3	Roca cubierta	Matorral	Grupo D	Masa forestal (Media)
24	> 3	Roca cubierta	Praderías	Grupo D	Praderas (Pobre)
25	> 3	Roca cubierta	Viñas	Grupo D	Barbecho (R)
26	> 3	Roca desnuda		Roca impermeable	
27	< 3	Roca desnuda		Roca impermeable	
28	> 3	Roca desnuda	Arboleda	Roca impermeable	
29	> 3	Roca desnuda	Matorral	Roca impermeable	
30	> 3	Roca desnuda	Praderías	Roca impermeable	

TABLA III. CONDICIONES DE HUMEDAD DEL SUELO SEGÚN LA PROPUESTA DEL SCS (1972), SEGÚN LA PRECIPITACIÓN TOTAL (MM) DE LOS CINCO DÍAS ANTERIORES

Condición	Estación de latencia	Estación de crecimiento
I SECO	PT≤13	PT≤36
II MEDIO	13≤PT≤28	36≤PT≤53
III HUMEDO	PT≥28	PT≥53

tía (P_0). Así el SCS considera tres condiciones de humedad diferentes para dos situaciones de la cubierta vegetal (Tabla III).

En la concesión de explotación minera utilizada como ejemplo de aplicación, la precipitación total en los cinco días anteriores al momento en que se produjo la precipitación utilizada en este proyecto fue de 64.7 mm y por lo tanto se utilizarán los P_0 del Tipo III (húmedo), según las equivalencias definidas en la Tabla IV.

TABLA IV: EQUIVALENCIA DE LOS VALORES DE P_0 ENTRE DISTINTAS CONDICIONES DE HUMEDAD PARA CADA UNO DE LOS TIPOS DE TERRENO DEFINIDOS EN LA TABLA 1

P_0 (mm)	P_0 (mm) correspondientes	
Condición II	Condición I	Condición III
3	7	0.5
6	14	1
9	21	2
13	29	3
17	38	5
21	48	7
27	61	10
33	75	13
41	93	17
50	112	21
61	135	27
75	167	33
93	213	41
117	283	50

DISCUSIÓN: EL MDFC VERSUS LOS MÉTODOS TRADICIONALES

Los cálculos hidrométricos por procedimientos tradicionales asumen una serie de variables constantes y uniformizan el tratamiento de la cuenca, de tal manera que sus datos resultan finalmente poco fiables. Así la definición de las cuencas de drenaje es imprecisa e incluso se llega a tratar el área total objeto de estudio como una cuenca de drenaje unitaria. Además, se simplifican los coeficientes de escorrentía, ante la imposibilidad de cuantificar a partir de la cartografía tres o más variables independientes de forma simultánea, elaborando valores promedio de los coeficientes de escorrentía combinando las variables dos a dos mediante ecuaciones del tipo:

TABLA V: CAUDALES PUNTA DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS Y PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN SU CÁLCULO, SEGUN EL MDF

CUENCAS	Tiempo de concentración (horas)	Coefficiente de uniformidad	Precipitación diaria máxima(mm)	Intensidad máxima de lluvia (mm/h)	Area de cuenca (Km²)	Caudal Punta (m³/s)
1	0,3266	1,0173	62,2	42,0033	0,1353	1,6063
2	0,2006	1,0095	62,2	53,2018	0,0379	0,5654
3	0,2979	1,0155	62,2	43,9580	0,0693	0,8587
4	0,1517	1,0067	62,2	60,6105	0,0045	0,0767
5	0,2133	1,0102	62,2	51,6742	0,0129	0,1863
6	0,1987	1,0094	62,2	53,4418	0,0089	0,1326
7	0,2019	1,0096	62,2	53,0394	0,0079	0,1179
8	0,2076	1,0099	62,2	52,3439	0,0083	0,1211
9	0,2332	1,0114	62,2	49,5164	0,0403	0,5607
10	0,1666	1,0075	62,2	58,0414	0,0132	0,2148
11	0,1087	1,0044	62,2	70,4784	0,0031	0,0605
12	0,2995	1,0156	62,2	43,8422	0,1625	2,0101
13	0,0988	1,0039	62,2	73,5234	0,0044	0,0892
14	0,1975	1,0093	62,2	53,5950	0,0727	1,0920
15	0,3646	1,0198	62,2	39,7563	0,0028	0,0313
16	0,1635	1,0074	62,2	58,5495	0,0601	0,9851
17	0,2377	1,0117	62,2	49,0634	0,0746	1,0279
18	0,1314	1,0056	62,2	64,7217	0,0088	0,1591
19	0,1948	1,0092	62,2	53,9445	0,0087	0,1308

TABLA VI: CAUDALES MÁXIMOS PARA LAS CUENCAS ESTUDIADAS Y PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN SU CÁLCULO, SEGUN EL MDFC

CUENCAS	Tiempo de concentración (horas)	Coefficiente de uniformidad	Precipitación diaria máxima(mm)	Intensidad máxima de lluvia (mm/h)	Area de cuenca (Km²)	Caudal Punta (m³/s)
1	0,3266	1,0173	62,2	42,0033	0,0000	0
2	0,2006	1,0095	62,2	53,2018	0,0000	0
3	0,2979	1,0155	62,2	43,9580	0,0693	0,8587
4	0,1517	1,0067	62,2	60,6105	0,0035	0,0589
5	0,2133	1,0102	62,2	51,6742	0,0077	0,1120
6	0,1987	1,0094	62,2	53,4418	0,0043	0,0637
7	0,2019	1,0096	62,2	53,0394	0,0027	0,0405
8	0,2076	1,0099	62,2	52,3439	0,0030	0,0437
9	0,2332	1,0114	62,2	49,5164	0,0265	0,3690
10	0,1666	1,0075	62,2	58,0414	0,0106	0,1714
11	0,1087	1,0044	62,2	70,4784	0,0024	0,0467
12	0,2995	1,0156	62,2	43,8422	0,1374	1,6991
13	0,0988	1,0039	62,2	73,5234	0,0041	0,0841
14	0,1975	1,0093	62,2	53,5950	0,0659	0,9895
15	0,3646	1,0198	62,2	39,7563	0,0020	0,0225
16	0,1635	1,0074	62,2	58,5495	0,0527	0,8638
17	0,2377	1,0117	62,2	49,0634	0,0611	0,8421
18	0,1314	1,0056	62,2	64,7217	0,0080	0,1451
19	0,1948	1,0092	62,2	53,9445	0,0075	0,1127

$$C_w = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7)$$

En la que es el coeficiente C_w de escorrentía medio de los sumatorios de los coeficientes de escorrentía parciales (C_i), aplicados sobre sus correspondientes áreas (A_i) y dividido por el área total.

Como alternativa a este procedimiento, en este trabajo se propone utilizar la base de datos SIG creada, que incluye el mapa combinación de la información litológica, la vegetación, las pendientes y varios MDT's.

Como se ha visto, la combinación de litología, vegetación y pendientes permite establecer unidades del territorio a las que asignar un valor corregido de escorrentía. El mapa de unidades de escorrentía, convertido a formato matricial, puede ser utilizado como un modelo corrector en la función que genera el MDF a partir del MDD, de modo que en el cómputo del número de celdas que vierten a una determinada, las celdas vertientes no se contabilizan todas con el mismo valor, 1 por defecto, sino un valor corregido con el modelo de coeficiente de escorrentía.

Es decir, al calcular el área que vierte aguas a un punto se introduce el coeficiente como factor corrector de área mediante:

$$A_d = A_r C \quad (8)$$

Siendo A_d el área resultante de multiplicar el área real de la celda base de información por el coeficiente de escorrentía (C) correspondiente al polígono combinación de las capas de litología, vegetación y pendientes. El trabajar con un SIG y los MDT's permite obtener un valor corregido para cada unidad del territorio, celdas de 25m² en el ejemplo que se presenta.

Aplicando esta corrección se creó un nuevo Modelo de Flujo Acumulado Corregido (MDFC). A partir de él se han calculado directamente los caudales punta para cada uno de los niveles base de las subcuencas definidas en la concesión minera. Esto es prácticamente imposible de realizar por métodos tradicionales, pues el análisis subjetivo del relieve a partir de la topografía no permite definir con exactitud la red de drenaje completa y, especialmente, porque resulta imposible cuantificar la incidencia areal de las unidades cartografiadas para calcular el coeficiente de escorrentía de forma precisa y con una resolución comparable a la de un modelo matricial de celdas de 5x5m.

Si se comparan los resultados de los caudales punta obtenidos en la tabla V, en la que a pesar de utilizar la base elaborada y manipulada desde el SIG el método Racional se aplica sobre el MDF convencional, con los resultados obtenidos en la tabla VI, en los que los caudales punta se obtienen a partir de un MDFC, las diferencias son notables. Como se puede comprobar (Figura 8), los caudales son sensiblemente inferiores en

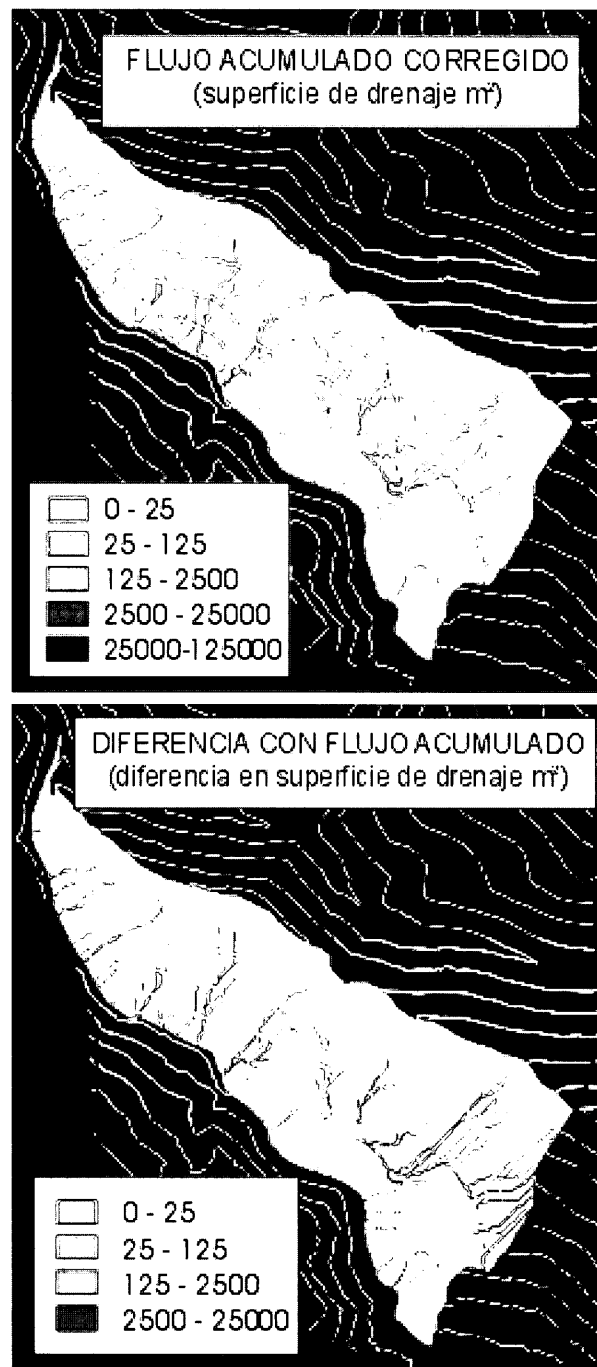


Figura 8. Modelo de flujo acumulado corregido (MDFC) en el modelo superior, y diferencia de drenaje en el modelo inferior, respecto al modelo de flujo acumulado convencional (MDF).

el MDFC y por lo tanto el sistema de drenaje a diseñar es menor y también es menor su coste. Las diferencias entre ambos modelos pueden ser tenidas en cuenta en el cálculo de las secciones de los canales de drene, arquetas y tuberías de el sistema diseñado aplicando siempre el principio conservador de seguridad.

En el MDFC las áreas que aparecen en la ecuación (2) son distintas ya que el coeficiente de escorrentía (C) que interviene en la ecuación (8) toma valores $0 \leq C \leq 1$.

DISEÑO DEL SISTEMA DE DRENAJE EN UN CASO PRÁCTICO

En la explotación minera utilizada como caso práctico de este trabajo se diseñó un sistema de drenaje, teniendo en cuenta las cuencas representadas en la Figura 4 y sus caudales punta, que han sido utilizados para dimensionar adecuadamente los elementos conductores del agua a lo largo de la red de drenaje. Estos elementos son las arquetas, tuberías de desagüe, canales abiertos y canales cerrados, que en conjunto configuran seis sistemas de drenaje independientes (Figura 9).

En el diseño del trazado de la red de drenaje, además de los cálculos hidrológicos que se han detallado, intervinieron los objetivos con que se planteó la obra que han sido:

- Mejorar la estabilidad de los taludes situados sobre los bancos de explotación a cielo abierto.
- Mejorar el estado de la red viaria de la concesión minera, es decir mejoras en los accesos a los bancos de explotación a cielo abierto, las minas, escombreras y talleres.
- Optimización de los sistemas de sostenimiento y disminución de los gastos derivados del bombeo de agua del interior de las explotaciones subterráneas.

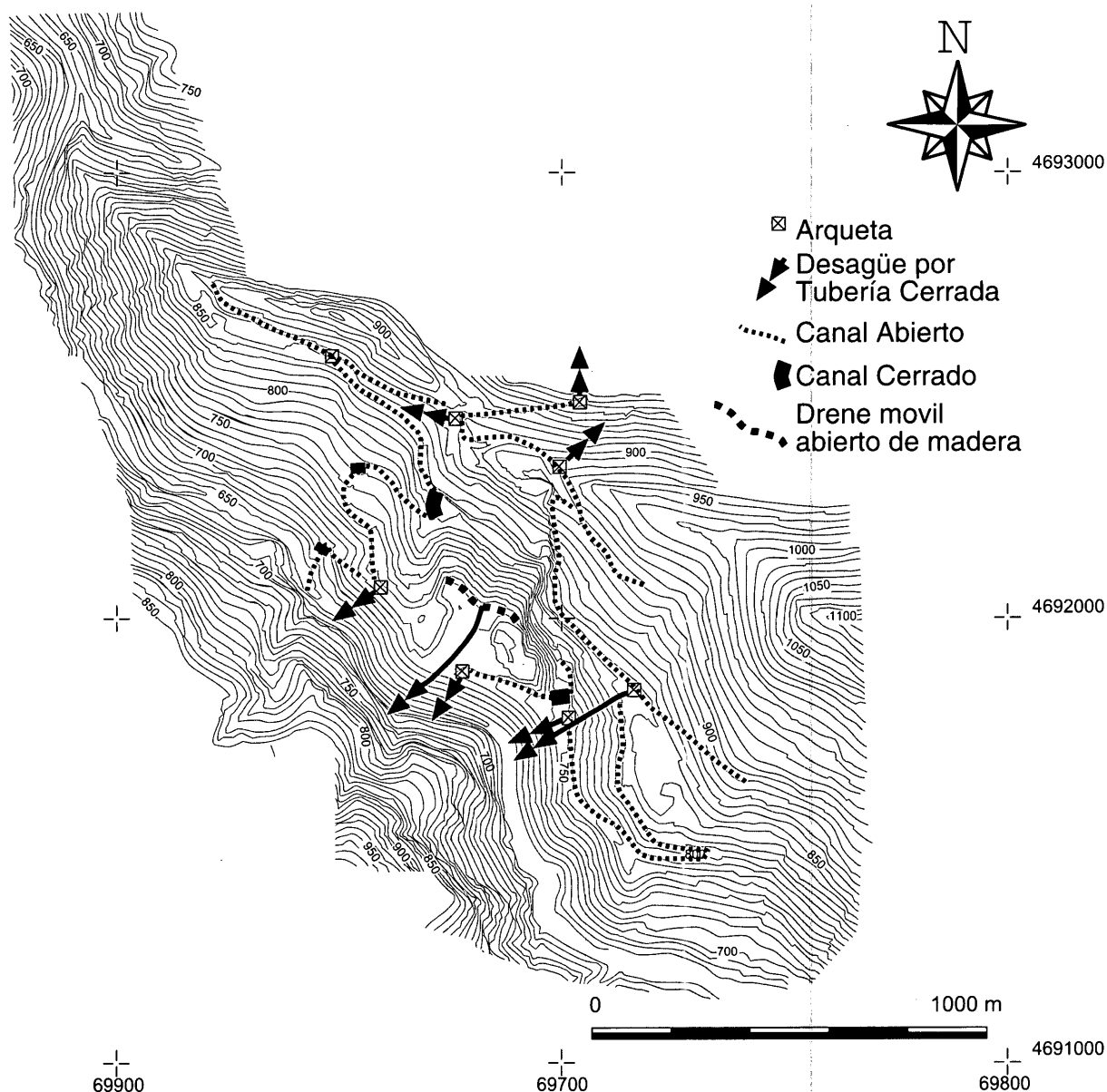


Figura 9. Trazado del sistema de drenaje de la CE.

- Mejorar las condiciones de trabajo y de la seguridad.
- Restauración del desmonte de la antigua explotación a cielo abierto como futura escombrera, mediante el relleno de este desmonte.

Con estas premisas se optó por diseñar un sistema de drenaje que aprovechara la red viaria de la explotación como trazado principal de la red de drenaje, al presentar como ventajas su fácil acceso durante su instalación y mantenimiento y su menor coste. Sin embargo se han previsto varios desagües para evitar dimensionar en exceso las cunetas y supeditar el correcto funcionamiento de la red de drenaje a un único tramo.

Finalmente también se tuvo en cuenta las pendientes, evitando que el agua alcanzase flujos supercríticos que desbordarían el canal. Así, en aquellos tramos en que fue im-

posible disminuir la pendiente del canal, éste se diseñó con elementos disipadores como escalones y superficies rugosas (Chow, 1994). Un elemento singular de este sistema de drenaje diseñado es el canal central sobre la base del antiguo banco de explotación que se ha diseñado móvil por lo que se construye en madera y capta agua para una tubería subterránea que drena aguas abajo de la concesión de explotación. Este sistema permite utilizar la antigua explotación a cielo abierto, como la escombrera, y modificar el drenaje conforme la escombrera aumenta de volumen, lo cual afianza la ladera y restaura el hueco creado durante su explotación.

Este trabajo se ha realizado dentro del proyecto 1FD97-0959-C03: Estudio geológico aplicado a la investigación de recursos mineros y de materias primas en las comarcas del Bierzo, la Cabrera, Sanabria y Valdeorras. ■

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brookes, A. (1993): River Channel Change. In: *The Rivers handbook* (Colow, P. and Petts, G.E. Edt.) Blackwell Scientific Publications, 2, 55-75.
- [2] Chow, V.T. (1994): *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York. 667p.
- [3] Chow, V.T. (1962): Hydrologic Determination of Waterway Areas for the Design of Drainage Structures on Small Drainage Areas, *University of Illinois Engineering Experiment Station Bulletin*, Urbana IL, 462p.
- [4] Doyle, F.J. (1978): Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44(12): 1481-1485.
- [5] Fernández, F.J., Menéndez-Duarte, R. y Marquínez, J. (1997): Aplicación de los sistemas de información geográfica en la cartografía temática y clasificación geomorfológica de los sistemas fluviales en Asturias. *Rev. Soc. Geol. España* 10(1-2), 117-130.
- [6] Ferrer, F.J. (1993): *Recomendaciones para el cálculo hidrométrico de avenidas*. Centro de estudios de experimentación de obras públicas. Monografías del MOPU, 76p.
- [7] Ferrer, M., Rodríguez, J. y Estrela, T. (1995): Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. *Rev. de Ingeniería del Agua*, 4 (2).
- [8] Francés, F. y Benito, J. (1995): La modelización distribuida con pocos parámetros de las crecidas. *Rev. de Ingeniería del Agua*, 4 (2).
- [9] Jenson, S.K. (1991) Application of hydrologic information automatically extracted from Digital Elevation Models. *Hydrological Processes*, 5, 31-44.
- [10] Jenson, S.K., Domingue, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11): 1493-1600.
- [11] Lane, S.N. (1998) The use of Digital Terrain Modelling in the understanding of Dynamic River Channel Systems. In: *Landform Monitoring and Analysis*. (S.N. Lane; K.S. Richard and Chandler, eds.). John Wiley & Sons Ltd.
- [12] McCuen, R.H. (1989): *Hydrologic analysis and design*. Prentice Hall, New Jersey. 867p.
- [13] Menéndez-Duarte, R., Marquínez, J. and Fernández, F.J. (1997): Application of a geographical information system for the assignment of characteristics of the river systems and to evaluate their state of conservation: The Asturian river system. In: *Proceedings of The Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology* (Pawloski, V.P. ed.) International Center of Numerical Methods in Engineering, Barcelona. 304-310.
- [14] Montgomery, D.R.; Dietrich, W.E. y Sullivan, K. (1998). The Role of GIS in Watershed Analysis. In: *Landform Monitoring and Analysis*. (S.N. Lane; K.S. Richard and Chandler, eds.). John Wiley & Sons Ltd.
- [15] Moore, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, S.K. and Band, L.E. (1993) GIS and Land Surface-Subsurface Process Modelling. In: *GIS and Environmental Modelling*. (M.F. Goodchild, B. Parks and L.T. Steyert (eds.). Oxford University Press.
- [16] MOPU (1990): Instrucción 5.2-I.C. Drenaje superficial. Dirección General de Carreteras.
- [17] Pilgrim, D.H. (1986): Bridging the gap between flood research and design practice. *Water Res. Res.* 22(9), 165-176.
- [18] SCS (1972): Soil Conservation Service. *National engineering hand book*, Secc. 4. U.S. Department of agriculture. Washington, D.C.
- [19] Témez, J.R. (1987): Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Dirección General de Carreteras. MOPU
- [20] Tomlin, C.D. (1980): *Geographic information system and cartographic modeling*. Prentice Hall. New Jersey, 249p.
- [21] Waananen, A. O. (1977): Flood-prone areas and land-use planning- selected samples from the San Francisco Bay Region, CA, *USGS Professional Paper* 942.
- [22] Walton, D.J. (1989): Contour map partitioning for computer processing. *Computing in civil Engineering Proceedings: Sixth Conference*, TCCP/ASCE. Atlanta, Georgia. 691-698.