OCICARBON
ASOCIACIÓN GESTORA PARA LA INVESTIGACIÓN

Informes de Difusión de Proyectos

Diseño de la Morfología y Red de Drenaje en las Restauraciones Mineras

(C-12-444)

Titular: MINAS Y FERROCARRIL DE UTRILLAS, S.A.

MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

OCICARBON
ASOCIACIÓN GESTORA PARA LA INVESTIGACIÓN

Informes de Difusión de Proyectos

74

Diseño de la Morfología y Red de Drenaje en las Restauraciones Mineras

(C-12-444)

Titular: MINAS Y FERROCARRIL DE UTRILLAS, S.A.

MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Ciemat Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

Depósito Legal: M-4557-1998
ISSN: 1138-7041
NIPO: 238-00-003-6

LANDFORM DESIGN CONDITIONS RUNOFF AND EROSION CONTROL ON RECLAIMED AREAS

SUMMARY

Landform construction in Utrillas coalfield, where the MFUSA Company is operating, is based on the runoff sharing out, making up different hydrological catchments.

Artificial slopes, flat platforms, and the dramage network, with channels and small ponds, compose reclaimed catchments, which are connected to the natural drainage network.

The goal of the project is to set up some tools for Landform design, i.e. hydrological and erosion models. The models give a quantitative base for predicting the long-term stability of reclaimed catchments.

Empirical values of the parameters have been obtained by measuring runoff and sediments rates at the slope and catchments level.

Runoff is predicted by applying the Curve Number Method. RUSLE 1.06, Rusle for Mined Lands, Construction Sites and Reclaimed Lands, is applied for soil erosion prediction at slope scale and MUSLE at catchment scale.

It is explained the methodology for applying these models in others coalfields.
Finally rules for conservation and manegement of the reclaimed catchments are given, emphasizing the influence of the Mediterranean-Continental climate.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto se realizó entre abril de 1996 y octubre de 1991 en las explotaciones de Alemanes y Sabina de la empresa MFUSA en la cuenca de Utrillas, Teruel. Con fecha 30 de julio de 1996 el Comité Mixto acordó la participación de Ocicarbón en el desarrollo del presente proyecto asignando una subvención para su realización con el objetivo de desarrollar una metodología para el diseño de las formas de relieve de restauración basada en las experiencias llevadas a cabo en las explotaciones mineras de Utrillas.

En el proyecto han participado la empresa Minas y Ferrocarril de Utrillas, S.A., la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC) y el Departamento de Ecología de la universidad de Alcalá. Asimismo ha colaborado el Departamento de Geografía de la universidad de Zaragoza.

El equipo investigador estaba formado por el Dr. Francisco Alberto Giménez y Dr. José Manuel Nicolau.

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

ANTECEDENTES

Un aspecto clave en las restauraciones mineras es el diseño de las formas de relieve, que han de ser estables, no sólo en términos estructurales o geotécnicos, sino también ecológicos. Esto quiere decir que han de ser capaces de sustentar ecosistemas funcionales, con capacidad de retener la humedad que las plantas necesitan, de desarrollar un suelo biológicamente activo y de propiciar el automantenimiento de una comunidad vegetal. La erosión suele ser un importante factor de inestabilidad ecológica en las zonas restauradas, especialmente en ambientes mediterráneo-continentales y semiáridos.

La estabilidad es también fundamental en relación con los ecosistemas situados aguas abajo de las áreas restauradas, para que el impacto hidrológico y geomorfológico que reciban de éstas sea el menor posible.

Por otro lado, la conformación del relieve final es el apartado más caro de las restauraciones, por lo que garantizar su estabilidad a largo plazo se convierte en un objetivo prioritario, también desde el punto de vista de la operatividad minera.

Al ser la restauración una disciplina nueva en nuestro país, su puesta en práctica ha requerido el desarrollo de técnicas de restauración para los distintos aspectos que comprende la recuperación de los espacios afectados por la minería: diseño de las formas de relieve, manejo del suelo, revegetación. La mayor parte de las técnicas se han apoyado en otras ya disponibles en campos próximos, como el agrícola o el forestal. No obstante, algunas características particulares de las áreas derivadas de la minería hacen que sea necesario desarrollar métodos y técnicas propios, los cuales, han de fundamentarse en el conocimiento científico del fenómeno natural que se trate en cada caso.

La morfología de los relieves de las áreas restauradas ha experimentado una notable evolución en la cuenca de Utrillas. Inicialmente se perseguía únicamente la estabilidad geotécnica de los rellenos, construyéndose escombreras en forma de pirámide truncada, con pendientes de 30º. Esas morfologías no eran capaces de albergar ecosistemas funcionales donde desarrollar usos agrarios o de naturaleza debido a su escasa capacidad de retención de agua y a la intensa erosión hídrica superficial.

Posteriormente se han diseñado formas más suaves y estables ecológicamente, teniendo como unidad funcional la cuenca de drenaje. Así, se ha aplicado un modelo conceptual basado en la compartimentación de las áreas restauradas, dividiéndose la escorrentía en distintas cuencas hidrológicas con una gran capacidad de almacenar y regular en sí mismas la escorrentía procedente de la precipitación pluvial. Estas se hallan conectadas con la red de drenaje natural, recibiendo caudales de los barrancos situados aguas arriba y vertiéndolos aguas abajo en los eventos extremos, tras ser regulados internamente.

Como cualquier cuenca hidrológica sus dos elementos básicos son las vertientes y la red de drenaje, los cuales han de estar ajustados entre ellos. En las vertientes se incluyen las laderas artificiales de diversos tipos, las plataformas horizontales y las pistas de acceso, aunque éstas también forman parte de la red de drenaje. Ésta está constituida por pequeñas balsas de regulación a la entrada de los barrancos naturales y de los manantiales en el área restaurada, balsas de regulación intermedias y balsas finales de regulación, situadas en el extremo de la red de drenaje artificial, antes de su conexión con la red natural aguas abajo. Cunetas y cauces, con distintos sistemas de amortiguación de la energía del flujo hídrico, conectan las balsas.

Este sistema se ha revelado eficaz para el control de las escorrentías internas, evitándose las afecciones de las tormentas tanto sobre los cauces naturales situados aguas abajo, como sobre los propios cauces internos. Asimismo, las laderas artificiales se mantienen estables facilitándose el desarrollo de la vegetación.

OBJETIVO DEL PROYECTO

Este modelo conceptual de la morfología del relieve de restauración se ha puesto en práctica de forma empírica, ajustándose mediante pruebas de ensayo y error, sin contar con herramientas –modelos hidrológicos y de erosión- que facilitasen el dimensionamiento cuantitativo de las estructuras.

Este constituye el objetivo del presente proyecto: Poner a punto la metodología necesaria para aplicar modelos hidrológicos y de erosión en el diseño de las formas de relieve en las restauraciones mineras en la cuenca de Utrillas, según el sistema de cuencas compartimentadas. Porque para incorporar con éxito el diseño de las formas de relieve a la planificación minera hay que poder predecir la estabilidad de las formas de relieve finales, lo cual implica la aplicación de modelos hidrológicos y de erosión.

LADERAS

PLANTEAMIENTO

El éxito en el diseño de las laderas requiere la predicción a largo plazo de su estabilidad, lo cual implica la aplicación de modelos hidrológicos y de erosión.

ANTECEDENTES

Los modelos hidrológicos y de erosión existentes fueron desarrollados para suelos agrícolas o naturales, lo que hace que en la práctica no resulten óptimos para la industria minera, dado que la agregación y el particulado del material superficial es diferente en los suelos agrícolas y naturales que en los mineros y además las propiedades de los suelos mineros cambian rápidamente conforme la vegetación se va desarrollando. Esto supone un grave problema a la hora de asignar valores a los parámetros de los modelos para los suelos mineros pues no se corresponden con los de los suelos naturales que figuran en las tablas.

En consecuencia, es recomendable utilizar modelos específicos para las áreas mineras, aunque hoy en día no están totalmente disponibles, encontrándose en fase de elaboración.

De los modelos disponibles no hay ninguno específico para áreas mineras de hidrología y sólo uno de erosión, la reciente versión 1.06 de la RUSLE, denominada *RUSLE for Mined Lands, Construction Sites and Reclaimed Lands* (Toy & Foster, 1998).

La práctica más habitual es combinar un modelo hidrológico sencillo (el método del Número de Curva) con la USLE y así tener una predicción del volumen de escorrentía y de la pérdida de suelo. Esto es lo que realiza la MUSLE. Fifield (1995) ha elaborado un programa informático comercial "Evaluating the effectiveness of erosion and sediment control plans" para la elaboración de planes de control de la erosión en áreas generadas por el hombre (minería) que es una adaptación de la Musle. Este manual es comercializado, en unidades internacionales, por la International Erosion Control Association a través de la dirección: http//www.ieca.org/.

Bajo este mismo esquema se ha desarrollado en Australia otra metodología para el diseño de relieves en minería que combina el método del Número de Curva para la hidrología, la RUSLE-MUSLE para los sedimentos y el GRASP, modelo sobre el crecimiento de la vegetación herbácea (Loch, 1997). Esta metodología, fruto de un proyecto en el que colaboraron universidades, administración minera y medioambiental y empresas privadas, ha sido desarrollado específicamente en áreas mineras, e incluye la dinámica de la vegetación de forma explícita, y la RUSLE en sustitución de la USLE, lo que supone un notable avance.

En fase experimental se encuentra el modelo SIBERIA, desarrollado en la universidad de Newcastle, Australia, el cual pertenece a otra generación de modelos: los que predicen la evolución de la topografía, además de cuantificar las pérdidas de suelo.

Como conclusión a la revisión del estado de la cuestión del diseño de relieves mineros en el ámbito internacional podemos aceptar como aconsejable, de cara a las empresas españolas, trabajar con el método del Número de Curva y con la versión 1.06 de la RUSLE. Ello supone un avance respecto a la metodología vigente, basada en la USLE, lo suficientemente gradual como para poder ser adoptado sin grandes dificultades. No obstante también vamos a aplicar la USLE, por la mayor experiencia de uso que tiene en nuestro país, aunque calculando el valor local de los parámetros de forma experimental.

Los fundamentos del Método del Número de Curva y de la USLE vienen explicados con detalle en su versión general en la siguiente publicación:

- Tragsa 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ediciones Mundi-Prensa.

Y la RUSLE 1.06 se puede adquirir a través del USDA de Estados Unidos de forma gratuita a través de internet.

OBJETIVOS Y CONTENIDO

El objetivo general es poner a punto la metodología necesaria para aplicar el modelo hidrológico "Método del Número de Curva" y los de erosión USLE y RUSLE 1.06 al diseño de las laderas artificiales.

Para ello se van a ir explicando todos los pasos necesarios para determinar la escorrentía y la erosión de las laderas en fase de proyecto, de manera que puedan modificarse la pendiente, longitud y/o tipo de sustrato en las mismas, hasta alcanzar los niveles de erosión y escorrentía deseados. Estos pasos son los siguientes:

- Estimación de la magnitud de las precipitaciones máximas en la zona para distintos períodos de recurrencia. La estabilidad de la ladera proyectada se valorará determinando la erosión y escorrentía producida por la lluvia máxima posible cada 100 años.

- Predicción de la tasa de escorrentía de los distintos tipos de sustrato disponibles, aplicando el método del Número de Curva. Estos valores de escorrentía se utilizarán para dimensionar el tamaño de las cuencas y de la red de drenaje, así como para seleccionar la superficie a restaurar con cada tipo de sustrato.

- Establecimiento de la tasa de erosión máxima compatible con la estabilidad ecológica de las laderas.

- Predicción de la erosión según el modelo RUSLE (o en su caso la USLE), realizando simulaciones para el rango de pendientes y longitudes deseado, a partir de las cuales se tomará la decisión de la longitud, pendiente y sustrato a asignar para cada ladera.

La aplicación de los modelos puede efectuarse asignando a los parámetros del mismo los valores que ofrecen las tablas al uso o bien realizando un trabajo experimental en la propia explotación para obtener valores de los parámetros específicos para los sustratos de la zona.

Ambas modalidades se van a presentar en este apartado.

Como objetivos complementarios en el presente capítulo están

- Estimar la tasa máxima de erosión tolerable en las laderas artificiales.

- Conocer la magnitud de la escorrentía y la erosión en las distintas zonas restauradas:

- Conocer la variación a lo largo del tiempo de la magnitud de la escorrentía y la erosión.

- Conocer los mecanismos por los que se genera la escorrentía y se produce la pérdida de materiales.

LA RESTAURACIÓN DE LADERAS EN UTRILLAS

Las laderas se construyen de la siguiente manera:

- Pendiente entre 18° y 21°.
- Aislamiento de la ladera de las escorrentías procedentes de las plataformas, pistas, o de las bermas superiores.
- Extendido de una capa de tierra vegetal de unos 50 cm. de espesor.
- Labrado transversal a la pendiente. Labor profunda.
- Aplicación de purines.
- Labrado para evitar los olores de los purines.
- Siembra de la mezcla de herbáceas a finales de febrero tras el frío invernal.
- Labor superficial para el enterramiento de las semillas.
- Dos años después, en febrero, se realiza la plantación de vegetación leñosa.

La mezcla de herbáceas está compuesta por las siguientes especies:

Lolium perenne, Bromus catharticus, Festuca arundinacea, Medicago sativa (alfalfa Tierra de Campos), *Onobrichys sativa* (esparceta), *Melilotus officinalis*.

La plantación de especies leñosas se realiza en surcos de labrado profundo (40-50 cm) a 2 m de distancia sin voltear la tierra. Otros sistemas como el ahoyado al tresbolillo y el labrado con volteo de la tierra se desecharon porque al concentrar las escorrentías favorecían la erosión en regueros. Las especies utilizadas son numerosas, aunque las principales son: *Pinus halepensis* (pino carrasco), *Pinus nigra* (pino laricio), *Quercus ilex ssp. rotundifolia* (encina carrasca), *Quercus faginea* (quejigo), *Rosmarinus officinalis* (romero) y *Atriplez sp.*

METODOLOGÍA

El trabajo de campo que se ha realizado ha estado enfocado a registrar la información necesaria para hacer operativos los modelos a las condiciones particulares de las áreas mineras de restauración. Esta misma metodología es la que se propone a las empresas que deseen aplicar los modelos a partir de valores de los parámetros propios, no tomados de las tablas generales.

En nuestro caso, las medidas se han realizado en laderas restauradas de las explotaciones Alemanes y Sabina durante un año: octubre de 1995-septiembre de 1996,

período mínimo para disponer de una serie de datos representativa. Además se incluyen los datos procedentes de una investigación anterior realizada en la mina El Moral para ampliar el tipo de laderas al que aplicar la metodología (Nicolau, 1992). En todos los casos se han estudiado laderas revegetadas de herbáceas, es decir, no se ha considerado el efecto de las plantaciones arbóreas.

La información experimental se ha obtenido de estaciones de registro de escorrentía y erosión (parcelas de erosión), pruebas de infiltración con simulador de lluvia y otras medidas complementarias como humedad del suelo, cobertura vegetal, análisis físico-químicos de los suelos

ESTACIONES DE REGISTRO DE ESCORRENTÍA Y EROSIÓN

Se ha dispuesto de 9 estaciones permanentes de registro de escorrentía y erosión compuestas cada una por una parcela de 2 x 10 metros, una de 0,5 x 2 y otra de 0,5 x 1, con colectores de escorrentía, y un pluviómetro totalizador. También se ha contado con una estación meteorológica completa con pluviógrafo que ha dado servicio al conjunto de las parcelas.

Además del volumen de escorrentía y el peso de los sedimentos en cada lluvia, se ha medido mensualmente la humedad del suelo, estacionalmente la cobertura vegetal y se han determinado en laboratorio diversos parámetros físico-químicos del suelo.

El diseño experimental ha tenido en cuenta los siguientes tres factores: El tipo de sustrato, la edad de la ladera y la longitud.

Los tipos de sustratos considerados en las parcelas son los siguientes:

- "Gravas con matriz de finos más abundante en arenas que en arcillas" procedentes de la Formación Utrillas. Reciben la denominación local de "glacis" o "glacis arenoso".

- "Gravas con matriz de finos más abundante en arcillas que en arenas" procedentes de la Formación Utrillas. En el ámbito local se denominan "glacis" o "glacis arcilloso"

- "Arcillas de las Formaciones Utrillas o Escucha".

- "Limos arenosos". Limos y arenas muy finas de la Formación Escucha.

- "Suelo agrícola de bancal". Suelo procedente de bancales de cultivo abandonados, originado a partir de materiales de la Formación Escucha.

(Las propiedades físico-químicas pueden ser consultadas en el proyecto original).

Las laderas estudiadas, combinando tipo de sustrato y edad, son las siguientes:

1. Laderas de sustrato "Arcillas de las Formaciones Utrillas o Escucha", en el primer año (comunidad incipiente de herbáceas), en el segundo (Melilotus officinalis) y al cabo de 4-5 años (comunidad rala de alfalfa). (Parcelas 1, 2 y 3: P1, P2 y P3).

2. Laderas de sustrato "Gravas con matriz de finos más abundante en arenas que en arcillas" en el primer año (comunidad incipiente de herbáceas), en el segundo (Melilotus officinalis) y al cabo de 4-5 años (comunidad herbácea desarrollada). (P4 y P6)

3. Laderas de sustrato de "Gravas con matriz de finos más abundante en arcillas que en arenas" en el primer año (comunidad incipiente de herbáceas), en el segundo (Melilotus officinalis) y al cabo de 4-5 años (comunidad herbácea desarrollada). (P7 y P8).

4. Ladera de sustrato "Limos y arenas muy finas de la Formación Escucha" a los 4-5 años de su construcción (comunidad rala de herbáceas). P5.

5. Ladera de sustrato de "Gravas con matriz de finos más abundante en arcillas que en arenas" a los 4-5 años (cubierta vegetal densa). (P9)

6. Ladera de sustrato de "Suelo agrícola de bancal" a los 3 años (comunidad de herbáceas desarrollada), labrado a favor de la pendiente. Ladera de El Moral.

7. Ladera de sustrato "Limos y arenas muy finas de la Formación. Escucha" a los 2 años, colonización vegetal fracasada, labrado a favor de la pendiente. Ladera de El Moral.

EXPERIMENTOS CON LLUVIA ARTIFICIAL

El simulador de lluvia utilizado es el diseñado por Calvo y colaboradores (1988). Las pruebas han consistido en lluvias de 45 minutos con intensidades entre 50-75 mm/h sobre suelo seco y otras posteriores de 15 minutos sobre suelo húmedo. Se han llevado a cabo dos repeticiones sobre los distintos tipos de sustrato y sobre la superficie de una pista de estéril arcilloso.

Las laderas de Alemanes y Sabina con sustrato de "glacis" experimentan una pérdida de suelo moderada, por debajo de 3 t/ha/año, valores admisibles que no comprometen la colonización vegetal. Sin embargo, los sustratos arcillosos y limo-arenosos dan valores muy elevados, próximos a los de las áreas de erosión más intensa en el ámbito mundial. Son especialmente elevados en la explotación El Moral debido al labrado a favor de la pendiente.

MODELOS DE ESCORRENTÍA Y EROSIÓN PARA EL DISEÑO DE LADERAS

CÁLCULO DE PRECIPITACIONES MÁXIMAS

El cálculo de precipitaciones máximas, obviamente no necesita de experimentación, por lo que se realizará aplicando uno de los métodos al uso. Se propone utilizar la fórmula que se basa en el ajuste de las series de precipitaciones máximas a la distribución de Gumbel, que viene bien explicada en los libros recomendados:

$$P24T = P24 + \{(YT - Yn) / Sn\}. Sx$$

P24: Media de las precipitaciones máximas en 24 horas, anuales
YT: Variable reducida para un periodo de retorno de T años.

Yn y Sn: Media y desviación típica de la variable reducida para una serie de n años.
Sx: Error típico de los máximos anuales
T(x): Periodo de retorno o de recurrencia

Los valores obtenidos para la estación de Montalbán se indican en la tabla siguiente:

Valores de precipitación máxima (mm) para diversos períodos de recurrencia.

	Períodos de recurrencia				
	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Máxima en 24 horas	54,9	64,4	76,0	84,9	93,5
Máxima en 6 horas	39,4	46,2	54,6	61,0	67,2
Máxima en 1 Hora	21,2	24,9	29,4	32,8	36,1

3.5.2. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCORRENTÍA POR EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA

El fundamento de este método es bien conocido, por lo que no se hará referencia al mismo. Su aplicación a partir de las tablas requiere encontrar en ellas el tipo de suelo agrícola más parecido al sustrato de restauración para tomar el Número de Curva (CN) correspondiente. Para los sustratos estudiados se han tomado los siguientes:

Valores de CN tomados de las tablas.

- Sustrato arcilloso 1-2 años (P1): Cultivo alineado, según curvas de nivel, condiciones hidrológicas para la infiltración pobres, suelo grupo D. CN=88.
- Sustrato arcilloso 4-5 años (P2, P3): Barbecho, tierra desnuda, suelo grupo D. CN=94.
- Sustrato gravas arenosas 1-2 años (P4): Cultivo alineado, según curvas de nivel, condiciones hidrológicas para la infiltración pobres, suelo grupo C. CN=84.
- Sustrato gravas arenosas 4-5 años (P6): Cultivo alineado, según curvas de nivel, condiciones hidrológicas para la infiltración entre pobres y buenas, suelo grupo C. CN=84-82. O también: Cultivo no alineado (surcos difuminados) condiciones hidrológicas para la infiltración entre pobres y buenas, suelo grupo C. CN=81-82.
- Sustrato gravas arcillosas 1-2 años (P7): Cultivo alineado, según curvas de nivel, condiciones hidrológicas para la infiltración buenas, suelo grupo C. CN=82
- Sustrato gravas arcillosas 4-5 años (P8): Cultivo alineado, según curvas de nivel, condiciones hidrológicas para la infiltración entre pobres y buenas, suelo grupo C. CN=84-82. O también: Cultivo no alineado (surcos difuminados) condiciones hidrológicas para la infiltración entre pobres y buenas, suelo grupo C. CN=81-82.
- Sustrato gravas arcillosas 4-5 años (P9): Cultivo alineado, según curvas de nivel, condiciones hidrológicas para la infiltración buenas, suelo grupo C. CN=82. O también: Cultivo no alineado (surcos difuminados) condiciones hidrológicas para la infiltración buenas, suelo grupo C. CN=81.
- Sustrato limo-arenoso 4-5 años (P5): Barbecho, tierra desnuda, suelo grupo C. CN=91
- El Moral sustrato limo-arenoso: Barbecho, tierra desnuda, suelo grupo C. CN=91.
- El Moral sustrato tierra de bancal: Cultivo no alineado, condiciones hidrológicas para la infiltración entre pobres y buenas, suelo grupo C. CN=81-82.

Para la determinación del CN a partir de los datos propios procedentes de las parcelas se ha seguido la metodología de Ritter y Gardner (1991), aunque tomando I_0=0.2S, como asume Schroeder (1987). Se calcula el CN para cada evento al conocer las tres incógnitas: P, Q e Ia. Se representan todos los eventos (con su CN) en un gráfico, que recoge en abscisas la lluvia total y en ordenadas la escorrentía total. Se ajusta una curva a esos puntos, la cual representa el CN en condiciones de humedad normales o medias. Las envolventes por arriba y por abajo dan el CN en condiciones de humedad y de sequedad.

Los resultados muestran una apreciable diferencia entre los datos asignados a partir de las tablas y los calculados. Estas diferencias son estadísticamente significativas, por lo que es recomendable calcular empíricamente los valores de CN para cada tipo de suelo. Además el trabajo experimental permite obtener Cns distintos para una misma ladera a lo largo de los años, según van cambiando las condiciones de suelo y vegetación.

La aplicación del método del Número de Curva culmina con el cálculo del volumen de escorrentía generado por las precipitaciones máximas en distintos períodos de recurrencia en cada uno de los sustratos. La siguiente tabla recoge dichos datos para el caso de las laderas de las explotaciones Alemanes y El Moral

Predicción de valores de escorrentía según el método del Número de Curva.

		Período de recurrencia					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
Volumen de Precipitación máx. En 24 horas (mm)		41	55	64	76	85	94
Ladera	Número Curva	Volumen de escorrentía (l/m²)					
		2 años	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
S. arcilloso 1-2 años	90	19,6	31	40	50	58	67
S. arcilloso 4-5 años	94	26	39	48	60	68	77
S. gravas-Arenas 1-2	85	13	23	31	40	48	55
S. gravas-Arenas 4-5	91	21	33	42	52	61	69
S. gravas-Arcilla 1-2	83	11	21	27	37	44	51
S. gravas-Arcilla 4-5	91	21	33	42	52	61	69
S. limos-Arenas 4-5	94	26	39	48	60	68	77
El Moral S. limo-Arenoso	92	23	35	44	55	63	71
El Moral S. t. labor	89	18	30	38	48	56	64
S. limos-Arenas 4-5 Primavera	92	23	35	44	55	63	71
S. limos-Arenas 4-5 Compact.	95	28	42	51	62	71	79

S. gravas-Arenas 4-5 Primavera	86	14	25	32	42	50	57
S. gravas-Arenas 4-5 Compact.	91	21	33	42	52	61	69
S. gravas-Arcillas 4-5 Primavera	89	18	30	38	48	56	64
S. gravas-Arcillas 4-5 Compact.	92	23	35	44	55	63	71
El Moral S. limo-arenoso primavera	93	24	37	46	57	66	74
El Moral S. limo-Arenoso Compact.	95	28	42	51	62	71	79

DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE MÁXIMO DE ESCORRENTÍA

El caudal máximo de un evento es una característica de la escorrentía necesaria para dimensionar la red de drenaje así como estimar la erosión de una cuenca mediante la M.U.S.L.E. Para el cálculo del pico de crecida de una cuenca es necesario conocer el coeficiente de escorrentía máximo de las diferentes laderas artificiales.

En caso de no disponer de datos de escorrentía propios se recomienda aplicar una variante del método del Número de Curva según la siguiente ecuación:

$$C = \{(Pd / P0)\ (Pd + 23\ P0)\} / (Pd + 11P0)2$$

C: Coeficiente de escorrentía
Pd: Precipitación máxima diaria en mm para el periodo de retorno deseado.
P0: Precipitación umbral para la escorrentía.

A este valor de C se le aplica un factor multiplicador regional, que vale 3 para Teruel.

La aplicación del método basado en el número de curva a los sustratos mineros resulta difícil porque éstos no están considerados en las tablas, por lo que hay que asimilarlos a otras categorías agrícolas o forestales.

En nuestro caso la asimilación realizada y los valores de P_0 obtenidos se recogen en la tabla siguiente:

Valores de P_0, para el coeficiente máximo de escorrentía, asignados a las parcelas

Ladera	Grupo de suelo	Caracte-rísticas	Clase	P_0 (tabla)	P_0 Teruel
Sus. arcilloso 1-2 años (P1)	D	R	Cultivo en hilera	6	18
Sus. arcilloso 4-5 años (P2-3)	D	R	Barbecho	4	12
Sust. gravas-Arenosas 1-2 años (P4)	C	N	Cultivo en hilera	11	33
Sust. gravas-Arenosas 4-5 años (P6)	C	R	Pradera pobre*	8	24
Sust. gravas-Arcillosas 1-2 años (P7)	C	N	Cultivo en hilera	11	33
Sust. gravas-arcillosas 4-5 años (P8)	C	R	Pradera pobre*	8	24
Sust. gravas-arcillosas 4-5 años (P9)	C	R	Pradera media*	14	42
Sust. limo-Arenoso 4-5 años	D	R	Barbecho	4	12
El Moral Sust. limo-Arenoso	D	R	Barbecho	4	12
El Moral Sust. tierra de labor	C	R	Pradera pobre*	8	24

*Las laderas clasificadas como "cultivos no alineados" se han incluído aquí en la categoría de "praderas", al no existir la categoría de "cultivo no alineado" en la tabla del parámetro P_0.

A partir de los datos tabulados de P_0 se calculan los valores de C para diversos periodos de recurrencia mediante la fórmula anteriormente indicada. Los resultados obtenidos para las laderas de Utrillas se presentan en la tabla siguiente:

Valores de los coeficientes máximos de escorrentía a partir de las tablas
(unidades en % de escorrentía)

Ladera	C 2 años	C 5 años	C 10 años	C 25 años	C 50 años	C 100 años
Sus. arcilloso 1-2 años (P1)	1,81	2,24	2,49	2,76	2,94	3,10

Sus. arcilloso 4-5 años (P2)	3,61	4,33	4,74	5,15	5,43	5,66
Sust. gravas-arenosas 1-2 años (P4)	0,61	0,78	0,88	1,00	1,08	1,16
Sust. gravas-arenosas 4-5 años (P6)	1,09	1,37	1,53	1,72	1,85	1,97
Sust. gravas-arcillosas 1-2 años (P7)	0,61	0,78	0,88	1,00	1,08	1,16
Sust. gravas-arcillosas 4-5 años (P8)	1,09	1,37	1,53	1,72	1,85	1,97
Sust. gravas-arcillosas 4-5 años (P9)	1,27	1,59	1,78	1,99	2,13	2,26
Sust. limo-arenoso 4-5 años (P5)	3,61	4,33	4,74	5,15	5,43	5,66
El Moral Sust. limo-arenoso	3,61	4,33	4,74	5,15	5,43	5,66
El Moral Sust. tierra de labor	1,09	1,37	1,53	1,72	1,85	1,97

Para el cálculo de los coeficientes máximos de escorrentía a partir de los datos empíricos de las parcelas se ha seguido el siguiente procedimiento:

- Se han establecido las relaciones matemáticas entre el volumen de precipitación en 24 horas y el coeficiente de escorrentía de los 18 eventos registrados en cada parcela

- A partir del ajuste anterior se han estimado los coeficientes de escorrentía que corresponderían a las precipitaciones máximas en 24 horas con distintos periodos de recurrencia: 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

- Se ha obtenido el coeficiente de escorrentía máximo como el valor superior del intervalo de confianza de los coeficientes predichos para los distintos periodos de recurrencia.

Ecuaciones de ajuste entre el coeficiente de escorrentía y la intensidad máxima de precipitación en 24 horas

Ladera	Ecuación	Coeficiente determinación R^2
Sustrato arcilloso 1-2 años (P1)	$y = 11,8\ Ln(x)-14,95$	0,37
Sustrato arcilloso 4-5 años (P2)	$y = -0,098\ x^2+3,79\ x +5,74$	0,27
Sustrato gravas-arenas 1-2 años (P4)	$y = 0,072\ x^2+0,086\ x +0,61$	0,23
Sustrato gravas-arenas 4-5 años (P6)	$y = -0,02\ x^2+2,05\ x -6,96$	0,608
Sustrato gravas-arcillas 1-2-años (P7)	$y = -0,02\ x^2+0,76\ x -3,11$	0,37
Sustrato gravas-arcillas 4-5 años (P8)	$y = -0,08\ x^2+3,11\ x -11,5$	0,425
Sustrato gravas-arcillas 4-5 años (P9)	$y = -0,07\ x^2+1,53\ x +6,57$	0,89
Sustrato limos-arenas 4-5 años (P5)	$y = 0,106\ x^{1,94}$	0,55

y: coeficiente de escorrentía

x: Intensidad máxima de precipitación en 24 horas

Los valores de C obtenidos experimentalmente son notablemente más elevados que los calculados a partir de las tablas. Por un lado ha podido haber inexactitud en la correspondencia de suelos agrícolas y mineros, dada la dificultad que ello entraña y, por otro, los suelos mineros son más impermeables que los suelos agrícolas correspondientes.

Valores experimentales de los Coeficientes de escorrentía máximos.

	C máxima 2 años	C máxima 5 años	C máxima 10 años	C máxima 25 años	C máxima 50 años	C máxima 100 años
Sus. arcilloso 1-2 años	29	32	34	36	37	39
Sus. arcilloso 4-5 años	50	53	55	57	59	60
Sust. gravas-Arenosas 1-2 años	9	10	10	11	11	12
Sust. gravas-Arenosas 4-5 años	37	41	44	46	48	50
Sust. gravas-Arcillosas 1-2 años	6	7	8	8	8	9
Sust. gravas-arcillosas 4-5 años	24	27	28	30	31	32
Sust. limo-Arenoso 4-5 años	42	47	49	52	54	55
El Moral Sust. limo-Arenoso	23	25	26	28	29	29
El Moral Sust. tierra de labor	6	7	8	8	8	9

NIVELES MÁXIMOS DE EROSIÓN TOLERABLES

Es difícil fijar las tasas máximas tolerables, y es un problema todavía no resuelto en Geomorfología. Un criterio que se ha utilizado en restauraciones mineras de carbón ha sido no tolerar una tasa de erosión superior a la tasa de formación de suelo, de manera que el balance de conservación de suelo sea positivo. El problema que presenta esta aproximación es que es muy difícil medir o estimar la tasa de formación del suelo.

Algunos organismos han publicado tablas de la erosión máxima tolerable en agricultura y en el ámbito de cuencas hidrológicas por lo que no es muy correcta su aplicación a nuestro caso.

El criterio que vamos a seguir es tomar como referencia la tasa de erosión en laderas restauradas en las que se aprecia que la erosión no está impidiendo el desarrollo de la vegetación. De éstas, las laderas que soportan la mayor tasa erosiva, manteniendo una comunidad vegetal viable son las de sustrato de gravas arenosas (P4 y P6). Tomándolas

como referencia, la erosión máxima tolerable no debería superar las 10 Tm/ha/año en la fase inicial (dos primeros años) y podría llegar hasta las 20 Tm/ha/año en la fase más avanzada (cuatro-cinco años). Estos valores serían sólo de aplicación en el estadio inicial de la sucesión ecológica en el que las laderas presentan una comunidad de herbáceas. Respecto al estadio de vegetación leñosa (arbustiva, arbórea) no disponemos de información.

PREDICCIÓN DE LA EROSIÓN CON EL MODELO RUSLE

El modelo se aplica utilizando el programa informático de la versión 1.06 de la RUSLE, de distribución gratuita. Consta de un conjunto de ecuaciones, cuyos parámetros requieren de la asignación de valores. Algunos de estos valores se asignan a partir de las opciones que ofrece el programa y otros proceden de análisis y mediciones experimentales.

El trabajo que hemos realizado ha consistido en:

- la obtención de los valores de los parámetros de entrada al modelo, con la mayor base empírica posible.

- el ajuste de dichos parámetros, adecuando los valores de erosión estimados por el modelo a los valores reales registrados en las parcelas.

- aplicar el modelo para realizar la predicción de erosión para el año pluviométrico medio en distintas laderas.

En aras de la sencillez se ha trabajado con las laderas que se considera más estables, por la consolidación del sustrato y de la cubierta vegetal. Se trata de las de 4-5 años, tanto de sustrato de tierra vegetal (gravas) como de material no edáfico (arcillas y limos-arenas).

RUSLE consta de un conjunto de ecuaciones matemáticas que estiman la pérdida media anual de suelo y la exportación de sedimentos resultantes de la erosión en regueros y en inter-regueros, manteniendo la estructura de su predecesor, la USLE:

$$A = R\,K\,LS\,C\,P$$

A = Pérdida media de suelo anual en toneladas por acre por año.
R = Erosividad de la lluvia/escorrentía
K = Erodibilidad del suelo
LS = Longitud y pendiente de la ladera
C = Cobertura - manejo del suelo
P = Prácticas de mantenimiento

El desarrollo de la RUSLE incluyó varias modificaciones en la USLE de importancia para la aplicación a las áreas mineras, las derivadas de la ingeniería civil y las restauradas.El factor K ha sido modificado para contabilizar la variabilidad de la erodibilidad del suelo a lo largo del año. Este factor y el C tienen ahora en cuenta la influencia de los fragmentos de piedras del interior y de la superficie del suelo.

Las ecuaciones usadas para estimar el factor LS fueron reformadas para mejorar su precisión y ampliadas para incluir laderas de mayor pendiente que las de la USLE. El método para determinar el factor C fue modificado, usando una aproximación de subfactores, que incorpora valores de entrada que describen las principales características de diversas posibilidades de manejo y cubrimiento de la superficie del suelo.

Para estimar el valor de la P se desarrollaron nuevas ecuaciones basadas en los procesos, pudiéndose estimar la erosión en laderas cóncavas. Tanto en este factor como en el C se contemplan prácticas de conservación y tipos de vegetación y suelo propias de las áreas mineras, construidas y restauradas.

Lo más relevante de cara al manejo de los factores del modelo es lo siguiente:

Factor R: Para el factor R es necesario crear ficheros propios de la localidad de estudio en la base de datos CITY. Se trata de datos fácilmente disponibles en la bibliografía, quizá con la excepción de la R máxima en 10 años, para la cual se ha tomado como referencia el evento máximo ocurrido durante el período de estudio, en agosto de 1996.

Factor K: Los parámetros que utiliza el programa para obtener el valor de K-estimado son los mismos que el nomograma de la Usle. A partir del K-estimado calcula un K-ajustado en función de las características climáticas de cada localidad, en concreto la variación estacional de la temperatura, la precipitación y la humedad del suelo. No se ha aplicado el factor de corrección de la pedregosidad porque el propio programa lo desaconseja para áreas mineras y restauradas cuando K>0,15, como era nuestro caso. El efecto de la pedregosidad se incorpora en el factor de permeabilidad. No obstante, no queda claro por qué no se incluye el factor de pedregosidad, y pensamos que, posiblemente, los valores de K estén sobreestimados.

Factor LS: Es el parámetro más sencillo para la asignación de valores y no requiere comentarios.

Factor C: Se ha tomado la opción invariante en el tiempo, pues las laderas de 4-5 años no reciben ningún tratamiento y se ha considerado que no evolucionan apreciablemente durante el período de la predicción, que es entre el cuarto y quinto año.

Los datos de cobertura que requiere el programa se han proporcionado a partir de las medidas de campo realizadas.

La variable de entrada relacionada con la biomasa de raíces es de costosa medición en campo. Su valor se ha asignado a partir de las indicaciones que da el propio programa para comunidades herbáceas en áreas restauradas, teniendo como referencia la cobertura vegetal medida en cada parcela. Su influencia sobre el valor de C es pequeña, del orden de las centésimas.

Igualmente se ha procedido con la variable referente a la rugosidad, que se ha tomado de la tabla que ofrece el programa: 1 para los sustratos de tierra vegetal, 0,7 para el limo-arenoso y 0,5 para el arcilloso. Este parámetro tiene un peso grande en el valor de C, (décimas) por lo que ha de estimarse con cuidado.

El parámetro b, indicador de la efectividad de la cobertura sobre el control de la erosión, ha sido calculado por el modelo, asignando una mayor efectividad en las parcelas de

sustrato no edáfico (0,035) que en las de tierra vegetal (0,030) por sus más favorables condiciones a la formación de regueros.

El tiempo de consolidación del sustrato, aunque es un parámetro que se introduce asociado al factor K, actúa sobre el factor C. Se trata de un parámetro cuyo concepto e influencia sobre la cubierta vegetal no han quedado totalmente claros. No obstante, la diferencia entre la asignación de un valor propio o del calculado por la RUSLE influye en una desviación sistemática del factor C y de la tasa de erosión, que son asumibles.

Factor P: Expresa los efectos de prácticas de conservación como labrado transversal, fajas de vegetación y terrazas. La única práctica de conservación realizada en las laderas de la mina Alemanes ha sido el laboreo transversal a la pendiente ("contouring").

Para determinar la efectividad del laboreo transversal sobre el control de la erosión RUSLE tiene en cuenta dos parámetros: El tamaño de los surcos y el paralelismo de éstos respecto a las curvas de nivel. La influencia de ambos sobre el valor de P y sobre la tasa de erosión final es alta, por lo que su valoración ha de hacerse con la mayor exactitud.

El tamaño de los surcos en las parcelas de 4-5 años corresponde a la categoría de "muy pequeño"(1,25 a 5 cm). Excepto en la parcela de sustrato arcilloso (P2), en la que no quedaba rastro de los mismos.

La inclinación de los surcos respecto a la pendiente se ha estimado en el 0,5%.

Las predicciones de la RUSLE para el año de estudio, así como para el año medio en la cuenca de Utrillas se recogen en la tabla 3.15. Se observa que RUSLE predice valores de erosión superiores a los registrados. No obstante, se mantiene siempre dentro del orden de magnitud de la erosión real y el mayor desajuste se produce en las tasas de erosión menores, aproximándose mejor en las más altas. Ello hace que su capacidad predictiva resulte útil para la gestión de estos espacios y sea un modelo recomendable para las empresas de los sectores de la minería y de la restauración paisajística.

CONCLUSIONES SOBRE LA RUSLE

Entre las consideraciones que se pueden hacer sobre las ventajas e inconvenientes para su aplicación se destacan los siguientes:

- El factor K parece sobreestimado, al no incluir la corrección de la pedregosidad para las condiciones de las laderas de Utrillas. Ello puede justificar los valores de erosión más altos respecto a los reales en todas las laderas excepto en la de sustrato arcilloso, carente de pedregosidad. Por otro lado, conceptualmente los autores de la RUSLE reconocen una contradicción entre su consideración de la pedregosidad como negativa para las condiciones hídricas y erosivas del suelo –favoreciendo por tanto la erosión- y el de la experiencia de técnicos en restauraciones mineras, positiva respecto del papel de la pedregosidad en el control de la erosión y en el mantenimiento de la humedad edáfica en zonas con sequía.

- El concepto de "tiempo de consolidación del sustrato" y su influencia sobre el factor C no han quedado lo suficientemente claros, a partir de la información disponible. Es necesaria una consulta directa con equipos técnicos más experimentados en el uso del modelo y una mayor experiencia práctica en nuestro país.

- Los parámetros del factor C (rugosidad) y del factor P (inclinación de los surcos respecto a las curvas de nivel), que tienen un peso elevado en la estimación final de la erosión, son de difícil medición en campo, principalmente por la variación espacial que pueden presentar. Ello hace que su manejo sea arriesgado y que se requiera mucha prudencia en su estimación.

- El número de datos que requiere la RUSLE es elevado, aunque su consecución no es difícil. Por otro lado, aunque es un modelo reciente, en el que todavía se tiene poca experiencia, proporciona tablas e información de apoyo suficientes para estimar los valores de los parámetros que no han podido ser medidos en campo.

- RUSLE permite considerar los efectos sobre la erosión de un elevado número de prácticas de conservación y de manejos de la cobertura vegetal, muchas de ellas propias de las áreas mineras, restauradas y construidas.

- Para el usuario, el manejo del programa es cómodo, sencillo y fácil, con una ayuda muy explicativa. Además el programa es gratuito y puede accederse a él a través de internet.

- La precisión de la RUSLE es superior a la de la USLE (ver apartado 3.5.5) por lo que su utilización es recomendable también respecto a la USLE.

3.5.6. EL MODELO USLE

La aplicación de la USLE que se propone incorpora en sus parámetros las principales particularidades de las áreas restauradas. Se han considerado las siguientes:

- Los factores K, C no tienen un valor fijo en el tiempo, sino que evolucionan a lo largo de los años, conforme el sustrato se va consolidando y desarrollando, y la vegetación creciendo, respectivamente. A ello responde el diseño experimental de las parcelas, el cual nos permite disponer de valores de K y de C para el período inicial (primer y segundo año) y el avanzado (cuarto-quinto): K1-2 años, K4-5 años, C1-2 años, C4-5 años. Por ello se han utilizado todas las parcelas en la aplicación de la USLE, lo cual no se había hecho con la RUSLE.

- La cobertura de las comunidades de herbáceas restauradas presenta una variación estacional contrastada en los ambientes mediterráneo-continentales. Para ello se han realizado dos muestreos anuales, disponiéndose de valores de la C para el período activo (primavera-verano) y el inactivo (otoño-invierno): C período inactivo, C período activo.

- El tipo de revegetación y de prácticas de conservación de suelo (y su influencia en los factores C y P, respectivamente) en las áreas restauradas no es equivalente a las de las áreas agrícolas, para las que se desarrolló la Usle. Por ello se han utilizado relaciones específicamente desarrolladas para los ambientes restaurados con siembras de herbáceas. Estas relaciones proceden del manual "Evaluating the effectiveness of erosion and sediment control plans", editado por Hydrodynamics, Inc., las cuales son de uso generalizado en Estados Unidos.

Factor R. El factor R de la lluvia para el año de estudio se ha calculado a partir de los datos del pluviógrafo (R=56,11), y para el año medio en Montalbán se ha tomado de la mencionada publicación del Ministerio de Agricultura (R=95).

Factor K. Es el factor más problemático por las distintas características de los suelos mineros respecto de los agrícolas y forestales. Para realizar la calibración experimental del factor K es necesario llevar a cabo experimentos con lluvia artificial sobre superficies superiores a 9 m^2 o en parcelas que registren la erosión de la lluvia natural en un período de 10 años.

Por ello, el valor de K se ha estimado mediante el nomograma de la USLE aplicándose posteriormente una corrección. El valor de K se ha reducido en un 3%, 6% ó 9% según la pedregosidad fuese baja, media y alta, respectivamente.ç

Factor LS. Se ha calculado mediante la fórmula propuesta por Wischmeier para pendientes uniformes mayores del 9%: L.S = (l/22,1)0,3. (s/9)1,3.

Factor C. Se ha estimado a partir de las medidas de cobertura vegetal realizadas en otoño y primavera, según protocolo descrito en el apartado de metodología. En la USLE, la cobertura se computa a partir de la suma de vegetación y mantillo. El valor del factor C se ha obtenido de la curva propuesta por Fifield, específica para laderas artificiales revegetadas.

Factor P. Los valores asignados proceden del manual de Fifield, que recoge las prácticas de conservación de suelos aplicadas en las restauraciones mineras.

En la P2 y parcelas de El Moral las prácticas de conservación son inexistentes (P=1); En las parcelas de 1-2 años el labrado transversal está aún bien marcado (P=0,7); en las parcelas de 4-5 años el labrado transversal es difuso (P=0,8).

La tasa de erosión, A se obtiene aplicando directamente la fórmula: A=R.K.LS.C.P. Para pasar de t/acre/año a t/ha/año se divide para 0,4047.

CONCLUSIONES SOBRE LA VALIDEZ DE LOS MODELOS USLE Y RUSLE

En la tabla 3.19 se comparan los valores de erosión estimados por la USLE, la RUSLE y los realmente registrados en las parcelas durante el período de estudio. Los resultados indican una sobreestimación de la erosión predicha por los modelos respecto a la registrada en campo. Esta sobreestimación es mayor en la USLE que en la RUSLE. En efecto, todos los parámetros de la ecuación son estimados al alza en la USLE. Así el factor K es menor en la RUSLE al incluir el efecto de la pedregosidad (de forma indirecta) y de la estacionalidad. El factor LS desciende de 4,44 a 3 en las nuevas ecuaciones de la RUSLE. También el factor C, ligeramente, al incluir el efecto de la rugosidad y la pedregosidad superficial. Y, en mayor medida la P, mucho más matizada en la RUSLE.

Ello nos lleva a recomendar el uso de la RUSLE por considerarse rentable el mayor esfuerzo de toma de datos que requiere en comparación con la precisión obtenida.

DETERMINACIÓN DE LA ESCORRENTÍA GENERADA EN LAS PISTAS DE ACCESO

Las pistas constituyen las superficies más impermeables y en algunas cuencas son la primera fuente de escorrentía y de sedimentos. No se ha estudiado la erosión lineal que se produce en las cunetas pero se ha valorado la contribución de las pistas a la escorrentía total. Para ello se han realizado medidas de infiltración con lluvia artificial sobre una pista de sustrato arcilloso.

La tasa de infiltración final osciló entre 4,3 y 9,8 mm/h, lo que indica que cualquier lluvia por encima de esos valores producirá escorrentía en las pistas. La oscilación de 4,3 a 9,8 mm/h depende del grado de compactación.

El coeficiente de escorrentía al estabilizarse el frente de humectación varió del 79 al 88%.

El Número de Curva ha dado un valor de 99 sobre sustrato seco y 100 sobre sustrato húmedo. Estos valores son los mismos que se obtienen de los datos tabulados.

Como coeficiente máximo de escorrentía, de cara al cálculo del pico máximo de crecida, se propone el valor de 88%, el máximo registrado en las condiciones experimentales (bajo una intensidad de lluvia de 39 mm/h).

3.6. CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DE LAS LADERAS

La dinámica hidrológica de las laderas estudiadas se resume en la tabla 3.20. Los rasgos principales de cara a la predicción de la escorrentía y la erosión, y en relación a la viabilidad ecológica de las mismas son los siguientes:

Laderas de sustrato arcilloso:

El CN se incrementa de 90 a 94 en los 4 primeros años y el coeficiente de 0.5 a 0.58. Constituyen una de las fuentes más importantes de escorrentía, contribuyendo en gran medida a la inestabilidad de las cuencas, por lo que han de ser consideradas específicamente en los cálculos para el diseño de las cuencas.

Las elevadas tasas de escorrentía y erosión hace inviable el desarrollo de la vegetación: La baja infiltración implica una limitada disponibilidad de agua para las plantas y la erosión intensa una pérdida de fertilidad, semillas e incluso sustento donde arraigar.

Laderas de sustrato de "gravas con arenas":

El valor del Número de Curva varía de 86 el primer año a 80 el segundo (con la cubierta de Melilotus) hasta 91 a los 4-5 años.

El coeficiente de escorrentía máximo para calcular el pico de crecida también varía de 0,26 en el primer-segundo año a 0,45 a los cuatro-cinco.

Las moderadas tasas de erosión no parecen afectar negativamente al mantenimiento de la mezcla de herbáceas, aunque ésta no sea muy densa (50-65 % de suelo desnudo).

El factor limitante en estos laderas es la disponibilidad hídrica por la baja capacidad de retención de agua ocasionada por la textura grosera y la falta de estructura. El fenómeno es más acusado en laderas de orientación solana, donde la situación de la vegetación es precaria.

Laderas con sustrato "Gravas arcillosas"

El CN toma un valor de 83 subiendo a 91 a los 4-5 años. Sin embargo no hay diferencias a lo largo de las estaciones del año ni entre el primero y el segundo año (Melilotus).
El coeficiente máximo de escorrentía para calcular el pico de crecida también varía de 0,12 el primer-segundo año a 0,37 a los 4-5 años.

Se trata de los mejores sustratos desde el punto de vista del éxito de la restauración, aquellos donde el desarrollo de la vegetación es mayor. La disponibilidad de agua para las plantas es superior al resto de laderas y la pérdida de fertilidad y suelo por erosión, la menor. El único factor limitante puede ser la potencia de la capa de tierra vegetal.

Laderas de sustrato de "Limos y arenas"

El CN a los 4-5 años es muy elevado: 94 y el coeficiente de escorrentía también: 0,7. Se trata de laderas en las que la implantación de la vegetación se halla muy limitada.

Además de la falta de fertilidad, la reducida disponibilidad de agua y la fuerte erosión superficial impiden el desarrollo de las plantas. Este tipo de laderas constituyen una de las principales fuentes de escorrentía en las cuencas, por lo que hay que considerarlas como un elemento desestabilizador.

Laderas de sustrato "Suelo de bancal", labradas a favor de la pendiente. El Moral

El Número de Curva calculado es de 86 y el coeficiente de escorrentía máximo de 0,12.

Se trata de laderas donde la vegetación herbácea sembrada se desarrolla bien y está habiendo una colonización natural activa. La orientación de umbría favorece el desarrollo de la vegetación.

Laderas de sustrato "Limos-arenas" labradas a favor de la pendiente. El Moral

El Número de Curva es de 90 y el coeficiente máximo de escorrentía fue de 0,52, muy elevado.

A causa de la intensa reguerización y de la baja disponibilidad hídrica la implantación de la vegetación se ve muy limitada. Tan sólo la alfalfa es capaz de sobrevivir en esas condiciones.

La inviabilidad de estos laderas se debe, además de a las adversas características de los sustratos de Limos-Arenas, a la práctica del labrado a favor de la pendiente.

CUENCAS Y RED DE DRENAJE.-

PLANTEAMIENTO.-

Las tendencias actuales en restauración señalan hacia la creación de paisajes que aúnen a la estabilidad geotécnica y ecológica, el estar desde el punto de vista orográfico y botánico en consonancia con el paisaje que los circunda o, al menos, no diferir sensiblemente de él; siempre y cuando éste no se encuentre en condiciones degradadas por previo mal-uso.

En la zona explotada, los materiales que constituyen el sustrato presentan, como consecuencia de su fracturado, remoción, transporte y reubicación, tres aspectos diferenciales respecto de los que provienen: 1.- una elevada susceptibilidad a ser movilizados por los agentes naturales agua y aire. 2.- la aparición de numerosas superficies no meteorizadas previamente, dispuestas a liberar nuevos iones al ciclo biogeoquímico. 3.- un incremento de algunos órdenes de magnitud en su capacidad de infiltración respecto de los estratos geológicos en disposición original.

El espacio a restaurar, está sometido a la influencia de las tierras más altas que le proporcionan agua, sales y sedimentos, que unidos a los que se liberen en la propia zona por efecto del agua de lluvia etc., se incorporarán a otras áreas más bajas conectadas a la red regional. Cuando a través de actuaciones se consiga que la calidad de los efluentes que abandonen la zona restaurada, no difieran sensiblemente de los que previamente a la explotación recibía la red regional en ese punto, se podrá decir que el medio se ha estabilizado en el espacio y en el tiempo; conseguirlo exige estructurar unos planes específicos acordes con el objetivo propuesto.

Con el planteamiento que se enuncia a continuación se pretende - sea cual sea el destino final del territorio - conferirle la máxima estabilidad reduciendo la posibilidad de movilización de sedimentos y sales actuando a través de dos mecanismos: frenando la velocidad de circulación superficial del agua que accede a la zona en restauración y reduciendo la magnitud de los caudales circulantes y su recorrido.

La energía del agua circulante se aminorará reduciendo pendientes, aumentando la rugosidad de los cauces por los que circula, etc. Para cumplir con la segunda propuesta anterior en las restauraciones llevadas a cabo por la compañía MFUSA en la cuenca minera de Utrillas, la red de drenaje a sobreimponer en la zona restaurada, se estructura en una red jerarquizada, compartimentada en pequeñas cuencas con sus balsas, que evitan la concentración de flujos y reducen el recorrido de las escorrentías generadas.

Cada cuenca y balsa constituyen una unidad en la que la cuenca actúa como fuente de agua, sedimentos y sales y la balsa como sumidero al depositar en ella las partículas y concentrarse y precipitar las sales por evaporación del agua.

El conjunto se dimensiona de modo que las balsas sean capaces de retener las escorrentías producidas en las cuencas en las condiciones meteorológicas habituales del entorno y las distintas unidades cuenca - balsa se conectan entre sí consiguiéndose de este modo incrementar su capacidad de respuesta ante eventos pluviales extraordinarios. Finalmente vierten a la red regional.

En el manejo de todas las aguas que penetran en la zona de restauración (incluyendo las procedentes de cauces superficiales que atraviesan la zona, las de escorrentía local o las retenidas en las balsas), se debe evitar que se infiltren en profundidad ya que, como se señalaba más arriba, el sustrato de estériles de la minería del carbón contiene abundantes sales que se arrastrarán con el agua infiltrada y aflorarán con ella promoviendo, sin duda alguna, problemas ambientales en tiempo y lugar difíciles de prever.

En un contexto semiárido como el de las restauraciones de MFUSA en Utrillas, las balsas se constituyen en elementos de diversidad del paisaje y biotopos muy diferenciados cuya estabilidad ecológica viene asociada a la estabilidad de la calidad del agua. Pero además, dado el impacto que las explotaciones mineras tienen sobre los manantiales y otras unidades hidrológicas preexistentes, las balsas de la red tienen allí una función adicional ya que se constituyen en muchos casos en los puntos de suministro de agua para la fauna salvaje y otros usos.

4.2. EL CICLO HIDROLÓGICO Y BALANCE HIDROSALINO.-

Llevar a buen fin la propuesta de diversificación de la red pasa por promover la distribución selectiva del agua que accede al área en restauración entre los compartimentos del ciclo hidrológico que, en nuestro caso debe ir acompañado del previo y correcto dimensionado de alguno de ellos.

El ciclo hidrológico propio de cada una de los dos tipos de unidades cuenca – balsa: el correspondiente a balsas de plataforma y el correspondiente a balsas de hueco final de explotación, se pueden cuantificar en un balance hidrosalino al tomar en consideración, junto a los volúmenes de agua, el contenido salino de cada uno de los componentes.

Componentes del ciclo hidrológico en los terrenos en restauración.-

Agua de intercepción.-En conjunto, el agua de intercepción escapa a nuestro control ya que se pierde por evaporación directa desde la superficie de la roca, del suelo o de la planta.

Agua de escorrentía.-De los componentes de la escorrentía, (superficial y subsuperficial) la fracción que no se infiltra circula por la superficie del terreno en flujo laminar (fundamentalmente en la cabecera de la ladera) o a través de canalículos superficiales y pequeñas cárcavas (al final de la misma), hasta alcanzar la red de drenaje permanente y finalmente la balsa. En las zonas en restauración su magnitud respecto de los otros términos del ciclo es tanto mayor cuanto más degradadas son las condiciones físicas, menor la capacidad de infiltración de los suelos, o menor la densidad de vegetación que frene el impacto y la velocidad de circulación, etc. Es la fracción activa del ciclo hidrológico en cuanto a capacidad erosiva.

El agua de escorrentía subsuperficial es, en este contexto, de corto recorrido, ya que, o se incorpora a la infiltración profunda o aflora al encontrar una capa compactada incorporándose a la superficial.

Agua retenida por el suelo.- Constituye la fracción que hay que recrecer a expensas de la escorrentía y de otros componentes del ciclo para favorecer el crecimiento de la

vegetación que frenará el impacto de la lluvia, la velocidad de circulación del agua en superficie, etc.

Agua de infiltración profunda.- En nuestro medio, la discontinuidad litológica establecida entre el estéril y el suelo, presupone que el agua de infiltración que rebasa el suelo a través de grietas o por saturación del mismo, cuando alcanza el nivel de estériles queda definitivamente segregada del ciclo del agua edáfica al circular en profundidad por acción de la gravedad entre los grandes huecos que dejan los estériles (después de saturarlos en cuanto a su capacidad de retención de agua), hasta alcanzar el nivel de base de la explotación minera, generalmente muy alejado de la superficie del suelo.

De las aguas acumuladas en las balsas pueden producirse pérdidas por infiltración profunda, a veces en una magnitud tal que se constituye en el componente mayoritario del ciclo. En el término quedan incluidas las pérdidas por rezumes laterales. Si la estabilidad geotécnica se consolida, normalmente la infiltración profunda tiende a disminuir en el tiempo como consecuencia de la sedimentación de partículas y de procesos microbianos.

Agua retenida en las balsas.- Además del agua de precipitación directa y fundamentalmente de la de escorrentía, llegan a la balsa, o pueden hacerlo, aportes directos procedentes de cauces naturales permanentes o efímeros. También pueden hacerlo, y el diseño de la red de drenaje lo promueve, aguas previamente retenidas en otras balsas a las que se da salida por gravedad o por procedimientos mecánicos en el proceso de gestión de la red.

A las balsas de plataforma, sin apoyo sobre estructuras geológicas no disturbadas, no es posible el acceso de niveles freáticos cuya participación quedará restringida a las balsas de hueco final.

Agua evaporada y evapotranspirada.- A partir de las aguas acumuladas en las balsas se producen pérdidas por evaporación directa a partir de la lámina de agua (en función de su extensión) y por transpiración de la vegetación de freatofitas si la balsa ha sido colonizada por ellas (proporcional a la población y por tanto a la superficie que ocupan).

Para el conjunto balsa – cuenca, como para el balance de agua en las balsas en el tiempo que transcurre entre un episodio y el siguiente o para un periodo concreto de tiempo se debe satisfacer la ley de conservación de masas:

Agua balsa = Precip. directa + Escorrentía ± Cauces superf. ± Aguas freát. – E-T

El balance tiene aquí una función de control verificando la congruencia entre las estimaciones individuales de los componentes del ciclo.

El balance salino se establece con la masa de sales que aporta o detrae cada uno de los componentes del balance hídrico; es decir con los valores obtenidos del producto de cada volumen de agua considerado por su concentración salina. De igual modo que se aplica a la concentración salina total, el cálculo puede aplicarse a iones concretos como calcio, sulfatos, sodio o cloruros.

Conocida la complejidad de la dinámica de las sales en el medio natural, nuestro objetivo se limitó a caracterizar los niveles de salinidad de los términos del balance por considerarla una variable determinante del destino final de algunas balsas a construir.

Contenido salino de los términos del balance hidráulico.-

Agua de lluvia.- En las circunstancias de Utrillas, la proximidad de la Central Térmica de Escucha condiciona en determinados momentos unos valores de contenido salino superiores a los medios. El promedio de 10 muestras alcanza 0.122 dS m.1, oscilando entre 0.244 y 0.028.

Aguas de escorrentía, aguas superficiales y freáticas.- Para las agua de escorrentía y las aguas superficiales y freáticas, su contenido salino es muy variable y específico del entorno. Las aguas superficiales tienen una salinidad de alrededor de 0.90 dS m-1, con valores extremos entre 0.78 y 0.97. Las procedentes de freáticos aflorados, en dos grupos diferenciados con valores medios de 0.70 y 1.40 dSm-1 y valores extremos entre 0.58 y 1.74.

Agua evapotranspirada.- La evaporación directa a partir de la lámina de agua libre no supone una detracción simultánea de sales. La vegetación de freatofitas, detrae selectivamente determinados iones (NO_3^- , PO_4^{3-}, Ca^{2+} ,Mg^{2+} , K^+ , etc.) que metabolizan, pero su masa no suele ser significativa en el contexto salino de las balsas.

Disolución y precipitación de sales en las balsas.- Determinados procesos físicos, físico - químicos o biológicos, pueden incrementar o rebajar la concentración salina de las aguas de las balsas.

El contenido de sales en el agua de la balsa puede incrementarse a través de la disolución directa de las presentes en los materiales del vaso (que pueden proceder de las precipitadas en episodios anteriores) o como consecuencia de la meteorización de los mismos. Los fenómenos de intercambio iónico entre las aguas de la balsa y los materiales del vaso no tendrán influencia en la concentración salina de estas, pero pueden tenerla en la diversificación de la población de iones que la componen.

Por otro lado, la masa de sales disueltas en las aguas de las balsas puede reducirse como consecuencia de la precipitación de sales por rebasar su producto de solubilidad; unas veces al evaporarse o evapotranspirarse parte del agua (carbonatos, yeso, etc.), o por ascenso o descenso de su temperatura (carbonatos, sulfato sódico), o por adsorción y fijación selectiva de determinados iones en las arcillas etc. Procesos microbiológicos de oxidación y reducción provocan igualmente variaciones en su contenido.

Las sales pueden abandonar las aguas de las balsas únicamente junto con las aguas de infiltración profunda o por trasvase de caudales hacia otras balsas.

METODOLOGÍA.-

La cuantificación de los términos del balance hidrológico y salino en las unidades cuenca – balsa exige la determinación de parámetros climáticos, hidrológicos, topográficos y químicos o de calidad de las aguas. La instrumentación utilizada ha sido la siguiente:

El control de parámetros climáticos.-

Estación meteorológica de apoyo.- La estación meteorológica alquilada al Servicio Meteorológico Nacional ubicada en la mina Alemanes, se completó con un tanque de evaporación Clase A, proporcionado por la Estación Experimental de Aula Dei. Como referencia se contó con los datos de la estación meteorológica automática de Escucha CT, gestionada por la Central Térmica de dicho nombre y con la de Montalbán D.G.A..

Equipamiento meteorológico adjunto a las balsas y cuencas.- Dada la variabilidad espacial encontrada en lo referente al parámetro pluviometría, las cuencas y balsas alejadas de la estación de apoyo y de la red de parcelas de control de erosión se dotaron con pluviómetros propios.

El control de parámetros hidrológicos.

Seguimiento de las variaciones de nivel de agua en las balsas.- En el seguimiento de las variaciones de nivel de agua en las balsas se han utilizado limnígrafos convencionales pero fundamentalmente unos dispositivos constituidos por una plataforma- base de cemento, que soporta las guías y estas una barra de referencia de lectura de nivel de agua que simultáneamente sirve como línea de referencia de jalón topográfico. Un flotador que porta una escala dividida en mm se desliza a lo largo de las guías.

El buen comportamiento del prototipo definitivo, el número de balsas a controlar y su tamaño, las posibilidades que ofrecían para cubrir un amplio espectro de variación de nivel de agua y para vigilar la subsidencia y la infiltración profunda determinaron, junto a las disponibilidades de personal para efectuar las lecturas, que fueran los utilizados en el trabajo.

Medidas nocturnas de nivel y durante los meses fríos mostraron las diferencias en la infiltración profunda entre balsas; en una de ellas se determinó una infiltración de 1.5 mm día-1, de 1mm en otras dos, presentando el resto valores menores cuya cuantificación precisa exige de periodos de observación más largos en condiciones climáticas apropiadas.

Seguimiento de la extensión de la lámina de agua y volúmenes de agua almacenados.- El balance de agua en cuencas y balsas exige operar con volúmenes, en tanto que los dispositivos utilizados miden únicamente fluctuaciones de nivel. Para estimar las variaciones en volumen a partir de variaciones en nivel se establecieron las correspondientes relaciones entre ambos parámetros.

Aforo de caudales de aguas superficiales.- Cuando ha sido necesario, dada la variable capacidad de infiltración de los materiales, la cuantificación de caudales aportados por aguas superficiales se ha realizado en la inmediatez de su desembocadura en la balsa.

El control de parámetros topográficos. -

Seguimiento de la subsidencia.- El efecto que englobamos bajo el concepto de subsidencia, tiene dos implicaciones diferenciadas en el contexto de las balsas; por un

lado puede afectar a las medidas de nivel de agua utilizadas en diversos términos del balance y por otro es un indicador de la estabilidad geotécnica e hidrológica de la balsa.

A pesar de su interés en las condiciones de las zonas en restauración, el seguimiento de la subsidencia relativa en toda la superficie del vaso de la balsa se sale de nuestros objetivos. En nuestro caso nos limitamos a observaciones puntuales con los dispositivos utilizados para seguir las variaciones de nivel de agua que simultáneamente sirvieron de jalones topográficos.

Ubicando en la balsa más de uno de los dispositivos descritos, la línea del agua actúa de referencia común con lo que las variaciones relativas de nivel entre ellas, detectan diferencias en subsidencia entre emplazamientos. Tomando a uno de ellos como referencia y referenciándolo topográficamente con apoyo externo, los valores relativos se convierten en absolutos.

El control de parámetros químicos.-

Del grupo de unidades cuenca – balsa sometidos a estudio se tomaron muestras seriadas (ocho muestreos a lo largo de un ciclo anual) del agua de la balsa, de lluvia, freáticas afloradas y de cauces superficiales.

ANÁLISIS DE LOS TÉRMINOS DEL BALANCE.-

Con la aplicación de las metodologías indicadas más arriba a un grupo de cuencas y balsas funcionales se ha conseguido:

- Estimar, a través de medidas continuadas durante periodos de tiempo relativamente largos, la evaporación a partir de la lámina de agua y establecer la correlación estadística entre las medidas realizadas en la balsa y en el tanque de evaporación Clase A.

- Igualmente, entre las pérdidas de agua en las balsas y las estimaciones obtenidas por aplicación de otros métodos basados en determinados parámetros climáticos, como el método de Penman, nos permitirán, fuera del periodo de medidas directas, establecer ajustadas predicciones de pérdidas de agua por evaporación recurriendo a dichos coeficientes estadísticos.

Para diseñar las nuevas balsas de modo que se comporten específicamente como biotopos estables con láminas de agua permanente, como humedales estacionales o como charcas de evaporación, se precisan las tasas de evaporación, que pueden conseguirse con equivalente precisión a través de datos de estaciones meteorológicas complejas o a través de medidas de evaporación en el tanque clase A, más sencillo de manejo.

- Establecer la necesidad y la metodología para seguir la subsidencia y la infiltración profunda en balsas de nueva construcción.

- Determinar que, a pesar de la salinidad presente en algunos momentos, (hasta 4.38 dSm-1),en este contexto no parecía ser un factor limitante en la consecución de

biotopos estables a medio y largo plazo en la mayoría de las balsas. La salinidad de las aguas debe tomarse en cuenta como un criterio de calidad que debe compatibilizarse con su destino; en algún caso hasta puede imponerlo.

- Formular una metodología para cuantificar los volúmenes de escorrentía con los que determinar parámetros hidrológicos de interés (número de curva, coeficiente de escorrentía etc.), necesarias para el dimensionado de las unidades cuenca – balsa en las áreas en restauración.

- Seguir el balance hídrico en un grupo de pequeñas cuencas cuantificando los aportes a la balsa por escorrentía, por lluvia directa, y las pérdidas por evaporación, evapotranspiración por freatofitas Fig. 2, y por infiltración profunda.

- Con una instrumentación y metodología sencillas, que no por eso dejan de satisfacer las exigencias de precisión, pueden establecerse previsiones de comportamiento de cada unidad cuenca – balsa a lo largo de su proceso de " maduración " en el tiempo. Igualmente permite tomar decisiones entre las alternativas posibles para compensar las modificaciones que podrían introducirse en el balance como consecuencia de cambios en la dedicación de la cuenca, etc.

MODELOS DE TRANSFERENCIA DE AGUA Y SEDIMENTOS ENTRE CUENCAS Y BALSAS.-

DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA EN PEQUEÑAS CUENCAS.-

Se hace especial referencia a la metodología para la obtención del Número de Curva de una cuenca dada la variedad de previsiones que se pretenden fundamentar en él, (cálculo de volúmenes de escorrentía y picos de crecida para diferentes situaciones de partida, etc.), y por la trascendencia que los resultados derivados de su aplicación tendrán en diversos aspectos de interés: dimensionado relativo de cuencas y balsas, diseño de rebosaderos y canales de interconexión, control de las prácticas de preparación del suelo y selección de las más adecuadas, seguimiento de la" maduración" de las áreas restauradas etc.

Al comienzo de una nueva explotación, salvo situaciones excepcionales, los datos locales accesibles para el técnico referidos a los parámetros hidrológicos básicos necesarios con los que planificar la red de drenaje (dada la complejidad del proceso y la especificidad de todo él), suelen ser bastante escasos por lo que, como primera medida, debe plantearse su consecución progresiva para incorporarlos a sus tomas de decisión.

La minería extractiva de carbón a cielo abierto no es un proceso puntual, sino que se extiende en el espacio y tiempo; en el espacio puede serlo a lo largo de varios kilómetros cuadrados y en el tiempo a lo largo de varios años. Por ello, la estructuración de la red de drenaje de los espacios explotados también se convierte en una tarea a largo plazo con aproximaciones sucesivas en su perfeccionamiento hasta lograr los objetivos básicos que planteábamos para el conjunto de la zona sometida a explotación.

En su formulación clásica, a la metodología del Número de Curva desarrollada en principio para zonas con uso agrícola en su formulación clásica, se ha ampliado su campo de aplicación a otros usos del suelo (forestales etc.). Igualmente ha sido

utilizada para proporcionar estimaciones orientativas de CN en cuencas en restauración o restauradas, pues aunque no se ha llegado a establecer una normativa paralela o equivalente plenamente desarrollada, se ha podido inferir el comportamiento de algunos materiales a partir de resultados obtenidos de investigaciones puntuales realizadas por diversos autores en las que se ha seguido la evolución de las escorrentías de cuencas naturales hasta las correspondientes de las cuencas restauradas, construidas con los mismos materiales, y calculado para ambas el CN a partir de tales medidas. Los suelos así tratados (retirados de su emplazamiento primitivo, almacenados, redistribuidos etc.), a pesar de sus buenas condiciones de partida parecían comportarse, al menos en los primeros años de la restauración, como los correspondientes a los Grupos Hidrológicos peores, los Grupos C y D. Es una pauta que seguiremos a falta de datos experimentales.

Métodos gráficos y numéricos para la obtención de valores de CN aplicables a cuencas monitorizadas en función del número de datos disponibles.-

Por otro lado, si planteamos obtener datos propios,la expresada necesidad de incorporación progresiva de los datos obtenidos experimentalmente a los cálculos del CN, exige considerar las técnicas interpretativas apropiadas que exploten de modo óptimo el total de datos disponibles en cada momento.

En el cálculo del CN a partir de datos experimentales obtenidos por medidas directas de precipitación y escorrentía ofrecen las siguientes alternativas en función del volumen de datos.

A.- Escaso volumen de datos experimentales:

1.- Método aritmético.

B.- Número elevado de datos experimentales disponibles:

1.- Método gráfico.

2.- Método aritmético.

3.- Método estadístico.

A.- Escaso volumen de datos experimentales. Método aritmético.- A partir de los valores de P y Q, en mm, obtenidos de la monitorización de la cuenca, se calculan los parámetros S y CN aplicando las ecuaciones básicas del método. El valor así obtenido se corresponde a unas condiciones de humedad previa que hay que transformar a CNII, mediante la aplicación de las correspondientes fórmulas:

$$CNII = 2.334\ CNI / (1 + 0.01334\ CNI)$$

$$CNII = 0.4036\ CNIII / (1 - 0.0059\ CNIII)$$

De los valores así obtenidos se calcula el CN II de la cuenca.

Dada la variabilidad de las relaciones entre P y Q el resultado de este procedimiento debe considerarse con precaución. La precisión de la estimación viene más condicionada por la representatividad de las observaciones que por el número de ellas.

B.- Número elevado de datos experimentales disponibles. Método aritmético.- El procedimiento anterior se puede aplicar a un número elevado de datos estableciendo la

correspondencia cuantitativa relativa entre pluviometría y escorrentía para el conjunto de episodios controlados

Método gráfico.- Los pares de valores P, Q, se representan, con un símbolo que indique el estado de humedad en que tuvo lugar el episodio, sobre una plantilla con la trama de las líneas de los Números de Curva. Se estima a cual de ellas se aproxima más la nube de puntos y se toma como valor promedio; si es necesario se transforma a CNII.

Método estadístico.- Se agrupan los episodios de acuerdo con la condición de humedad del suelo en que cada uno tuvo lugar. Para cada grupo se ajusta, como se indica en el Cuadro 4, la ecuación con la que calcular su CN. Los CNI y CNIII así calculados se transforman a CNII. Se calcula la media ponderada de los tres valores de CN en función del número de datos con que se obtuvo cada uno.

Episodios pluviales de referencia en el entorno de las restauraciones.-

El Cuadro 5 proporciona la precipitación (en mm.día-1), para periodos de retorno comprendidos entre 2 y 500 años.

Cuadro 5 .- Precipitación esperada (mm.día-1) para distintos periodos de retorno (años) en el entorno de las restauraciones.

Periodo de retorno	2	5	10	25	50	100	200	500
Precipitación esperada	48	62	73	90	103	116	131	151

El Cuadro 6 contiene, en las mismas unidades, los datos de record de precipitación (la máxima precipitación que puede alcanzarse, pero no sobrepasarse), para episodios de variable duración considerados a nivel mundial (con datos actualizados a 1998),y con datos referidos al Reino Unido, quizá más próximos a nuestras condiciones.

Cuadro 6 .-Record de precipitación para episodios de diversa duración, a partir de distintos criterios de determinación.

Duración del episodio en horas	0.5	1	2	4	8	16	24	32
Mundial, $P = 353.07\ t^{0.519}$	246	353	506	725	1039	1489	1837	2133
Reino Unido, $P = 96\ t^{0.43}$	71	96	129	174	235	316	377	426

Predicción de caudales máximos de escorrentía a partir del número de curva.-

Para el cálculo de los caudales del pico de escorrentía conociendo el valor del CN se precisan, además de los datos pluviométricos, los de superficie y pendiente media de la cuenca. Con las figuras que se incluyen en el texto, el cálculo del caudal del pico de crecida es sencillo.

ESTIMACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA A TRAVÉS DEL MÉTODO RACIONAL.

En los estudios que estamos abordando, a diferencia de otros estudios técnicos mas frecuentes, la cuantificación de los volúmenes de escorrentía tienen prioridad sobre la determinación de caudales en los picos de crecida.

En la ecuación del Método Racional, que establece la relación entre volumen de escorrentía y precipitación, el único parámetro que desconocemos es el del coeficiente de escorrentía que deberemos estimar ateniéndonos al nivel de información disponible.

Entre las Metodologías aplicables a la determinación de los coeficientes de escorrentía, como en el caso del cálculo del CN, consideraremos dos situaciones de partida:

- Sin datos experimentales de relación entre P y Q.
- Con datos experimentales sobre dicha relación para situaciones directamente equiparables con la nuestra.

PREDICCIÓN DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LAS CUENCAS. EL MODELO M.U.S.L.E.

Complementando la información obtenida sobre la escorrentía, la predicción de la cantidad de partículas en suspensión movilizadas, se presenta como una necesidad en la planificación de la red de drenaje.

La aplicación de un modelo de erosión a nuestras cuencas persigue dos objetivos: en primer lugar constatar la eficacia relativa de las diversas medidas de control de la erosión posibles en las condiciones de nuestro medio, para seleccionar las más adecuadas y en segundo evaluar de modo aproximado, en las condiciones de restauración seleccionadas como más adecuadas, la velocidad de aterramiento de las balsas para de ahí estimar los costes de mantenimiento.

Con el fin de reforzar el sentido de cuenca por encima del de parcela, más propio éste para la aplicación del modelo USLE, y aumentando la precisión de sus predicciones por incorporación de parámetros relacionados con la escorrentía que representan la energía utilizada en el transporte de materiales disgregados, se ha desarrollado el modelo MUSLE, íntimamente relacionado con aquél, que permite estimar el volumen de sedimentos que puede aportar una determinada pequeña cuenca para cada uno de los episodios pluviales.

Contiene un factor de escorrentía, obtenido del producto del volumen de escorrentía producida por el caudal del pico de crecida correspondientes al episodio (que podemos deducir de la relación establecida entre volumen de escorrentía y pico de crecida a partir del CN de la cuenca), junto al que considera otros índices, calculados mediante nomogramas y tablas apropiadas a partir de datos morfológicos y analíticos de los suelos, topográficos y relativos a la dedicación agronómica del medio.

ARTICULACIÓN, DISEÑO Y COMPONENTES DE LA RED DE DRENAJE.-

En el diseño y articulación de la red de drenaje entran en consideración además de las balsas, las siguientes estructuras:

Huecos finales de explotación.- Inevitables y por tanto presentes, salvo excepcionales circunstancias, en todas las explotaciones a cielo abierto. Se configuran como una pieza importante en la articulación de la red de drenaje.

Escorrentías de la red viaria y de otras superficies destinadas a servicios de la explotación.- Cualquier infraestructura de atención a los servicios demandados por la explotación, (parque de maquinaria y talleres), así como la red viaria imprescindible para acceder a distintos puntos de la explotación, presentan números de curva próximos a 100, por lo que los volúmenes de escorrentía se aproximan al valor de la precipitación. Generan por tanto volúmenes importantes que hay que integrar en la red general.

Caudales permanentes o semipermanentes de escasa magnitud.- Corresponden a pequeños cauces fluviales que acceden a la zona en explotación procedentes muchas veces de terrenos externos y otras del drenado de acuíferos aflorados sobre las paredes de la "corta" . En cualquier caso deben conectarse a la red de drenaje general.

Rebosaderos y canales de interconexión.- El espacio ocupado por las estructuras de conducción concentrada de caudales dentro de la red de drenaje representa solo una mínima parte del territorio a restaurar, aunque dada la susceptibilidad del medio al agua circulante, constituya una porción que requiere mucha atención.

CONDICIONES AGROCLIMÁTICAS SINGULARES. LAS BAJAS TEMPERATURAS

Dentro de la Península, la singularidad climática de esta zona debido a las bajas temperaturas, es generalmente reconocida. Las parameras del Sistema Ibérico, con las estaciones de Calamocha y Molina de Aragón, marcan el máximo de días con temperatura inferior a 0º C. "Las temperaturas mínimas extremas de –28.2º C en enero de 1952, en Molina de Aragón, y de –30.0º C en diciembre de 1963 en Calamocha, son las más bajas registradas en este siglo en las estaciones españolas situadas a altitudes no superiores a 1100m."

A las repetidamente enunciadas condiciones de semiaridez de la zona de estudio se añaden las bajas temperaturas del entorno como característica singular y específica. La conjunción de frío y semiaridez dificultan y ralentizan el proceso de revegetación y en consecuencia favorecen los procesos erosivos. La utilización de especies y variedades resistentes a las bajas temperaturas, junto a un manejo apropiado de las mismas, representan una garantía adicional de éxito.

De entre las especies pratenses utilizadas en las restauraciones de la zona de estudio la relativa resistencia al frío puede establecerse así: El Meliloto sp. resulta más resistente al frío que la alfalfa (Ranger) y esta más que el Trébol rojo. El Trébol blanco común es más resistente que el ladino. El Agropyron desertorum más resistente que el A. smithii y éste a su vez más que el Bromus sp.

Entre los cereales, a pesar de las diferencias apreciables entre variedades, parece bien establecido que el orden de resistencia al frío es: Centeno > trigo > cebada > avena.

Entre las especies y variedades de otros cultivos herbáceos varía mucho la resistencia al frío: La colza, (Brassica campestris L.), tiene aproximadamente la misma resistencia al frío que los cereales y ligeramente por debajo de ellos se sitúan las variedades más resistentes de girasol.

Las especies frutales de hueso, en conjunto, son más sensibles que las de pepita; sus yemas de flor comienzan a afectarse a partir de –15° C. El orden de sensibilidad a las bajas temperaturas es almendro > melocotón > albaricoque > cerezo. A –25° C prácticamente el 100% de las yemas mueren.

Los daños que pueden producir las bajas temperaturas invernales en las especies leñosas usadas en la revegetación de las restauraciones responden fundamentalmente a dos tipos de mecanismos: la superación de la temperatura de endurecimiento al frío y la desecación. Ambos deben tomarse en consideración.

Por lo que puede afectar a los trasplantes de especies leñosas, la temperatura del suelo requiere un comentario adicional. La temperatura del suelo afecta al crecimiento radicular en longitud, espesor, ramificación, masa de raicillas etc., es decir, que tiene un efecto directo sobre múltiples aspectos de la regeneración de las raíces de los plantones. Para temperaturas del suelo de 5° C o inferiores todos esos procesos se encuentran en niveles mínimos; en tales condiciones, cuando especies de hojas aciculares recientemente trasplantadas demanden altas tasas de transpiración como consecuencia de la presencia de fuertes vientos (nada infrecuentes en la zona), o de un corto ascenso de las temperaturas, sus raíces que no están activas serán incapaces de suministrarles el agua demandada con lo que las plantas se marchitarán, pudiendo llegar a morir si la situación de bajas temperaturas perdura o la disponibilidad de agua es muy baja .La época de realizar las plantaciones es pues crítica.

COMPONENTES DEL CLIMA.-

Un análisis climático propio debe acompañar a cualquier actuación de restauración por las mismas razones que debe hacerse en otras actuaciones puntuales de cierta entidad tales como reforestaciones, transformaciones en regadío etc.

En primer lugar porque al lado de las estaciones " oficiales "aparecen o pueden aparecer otras con buenos caudales de datos, a veces más próximas a la zona de actuación y por tanto representando mejor las condiciones del entorno, como ha sucedido con la estación de Escucha CT y otras. En segundo lugar porque los datos de las estaciones requieren completar los valores fallidos de sus series de observaciones con apoyo en las estaciones próximas. En tercero porque generalmente cada actuación precisa hacer énfasis en parámetros específicos, que aunque se deriven de los registros climáticos generales, casi nunca están disponibles o actualizados. En cuarto porque siendo frecuentemente necesaria la instalación de estaciones propias (actividad costosa en tiempo y dinero),se precisa de un conocimiento de la variabilidad territorial que garantice que el número a instalar será el imprescindible, su ubicación la apropiada y

contarán con la instrumentación adecuada para satisfacer plenamente nuestras necesidades de información.

Se ha analizado la variabilidad espacio – temporal de parámetros e indices climáticos; temporal estacional e interanual para los regímenes de temperatura y humedad del suelo, de las sequías, de la Eto etc. Se ha estudiado la variabilidad espacial de los valores máximos, mínimos o medios, diarios, decenales y mensuales de distintos parámetros con el fin de determinar para cada elemento la existencia de gradientes direccionales o altitudinales.

La estación complementaria que se montó con tanque de evaporación Clase A y la distribución de pluviómetros en las proximidades de las balsas quedan plenamente justificados con el análisis realizado.

CONSIDERACIONES PRÁCTICAS PARA UNA GESTIÓN EFICAZ DE LAS CUENCAS

Para una más clara exposición el capítulo se divide en dos apartado, el correspondiente a los suelos asentados sobre pendientes medias cuyo destino principal es la revegetación

con especies herbáceas de pastizal y posteriormente con arbustivas y arbóreas, para los que la mayoría de las actuaciones deben realizarse en fases previas a la implantación de la vegetación, pero cuyo efecto debe perdurar, y, el correspondiente a los suelos o superficies de poca pendiente, que generalmente se dedicarán al cultivo y en los que pueden introducirse modificaciones con cada ciclo permitiendo correcciones y reajustes menos costosos que en el caso anterior.

Superficies con pendientes medias.- Se hacen consideraciones sobre la selección y acondicionamiento de materiales, sobre la profundidad y calidad del suelo a disponer y sobre las técnicas de laboreo, manejo de la vegetación, etc.

Superficies con pendientes ligeras.- Paralelamente con el caso anterior, se discuten las normas de selección y acondicionamiento de materiales, el manejo de los suelos en los primeros años de puesta en cultivo y en los años siguientes.

Las mejores prácticas culturales de conservación de agua y de protección contra la erosión, de uso en la agricultura extensiva, tienen su campo de aplicación lógico y quizá más apropiado en este entorno de los suelos frágiles de las restauraciones. El laboreo de conservación, cultivo siguiendo curvas de nivel, aterrazamientos, etc. se señalan como técnicas apropiadas. Se discuten las ventajas e inconvenientes de los distintos cultivos y rotaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Calvo, A., Gisbert, J.M., Palau, E. Y Romero, M. 1988. Un simulador de lluvia portátil de fácil construcción. En: M. Sala y F. Gallart (eds.): Métodos y técnicas para la medición en el campo de procesos geomorfológicos. 6-15 pp. Monografía nº 1. Sociedad Española de Geomorfología.

Loch, R. 1997. Landform design. Better outcomes and reduced costs by applying science to above and below ground issues. 22nd Annual Environmental Workshop: 550-563. 12-17 October 1997, Adelaida, South Australia. Minerals Council of Australia.

Nicolau, J.M. 1992. Evolución geomorfológica de taludes de escombreras en ambiente mediterráneo-continental. Tesis doctoral no publicada. Universidad Autónoma de Madrid.

Ritter, J.B. and Gardner, T.W. 1991. Runoff Curve Numbers for Reclaimed Surface Mines in Pennsylvania. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, vol. 117, n. 5: 656-666.

Schroeder, S.A. 1987. Runoff Curve Number Estimations for Reshaped Fine-textured Spoils. Reclamation and Revegetation Research, 6: 129-136.

Tragsa 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. 902 pp. Ediciones Mundi-Prensa.