

Libros de **Cátedra**

Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas

Fernanda J. Gaspari
Alfonso M. Rodríguez Vagaría
Gabriela E. Senisterra
María Isabel Delgado
Sebastián I. Besteiro

FACULTAD DE
CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES

n
naturales



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

*Fernanda J. Gaspari, Alfonso M. Rodríguez Vagaría,
Gabriela E. Senisterra, María Isabel Delgado, Sebastián I. Besteiro*

Curso de manejo de cuencas hidrográficas

**Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
Universidad Nacional de La Plata**



2013

Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas /
Fernanda J. Gaspari ... [et.al.]. - 1a ed. - La Plata : Universidad
Nacional de La Plata, 2013.
E-Book.
ISBN 978-950-34-0963-3
1. Cuenca Hidrográfica. 2. Ordenamiento Territorial. I. Gaspari,
Fernanda J.
CDD 551.46

Fecha de catalogación: 12/06/2013

Diseño de tapa: Dirección de Comunicación Visual de la UNLP



Universidad Nacional de La Plata – Editorial de la Universidad de La Plata

47 N.º 380 / La Plata B1900AJP / Buenos Aires, Argentina

+54 221 427 3992 / 427 4898

editorial@editorial.unlp.edu.ar

www.editorial.unlp.edu.ar

Edulp integra la Red de Editoriales Universitarias Nacionales (REUN)

Primera edición, 2013

La Plata, Buenos Aires, Argentina

ISBN 978-950-34-0963-3

© 2013. UNLP-Edulp

ELEMENTOS METODOLÓGICOS PARA EL MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

*Fernanda J. Gaspari, Alfonso M. Rodríguez Vagaría, Gabriela E.
Senisterra, María Isabel Delgado, Sebastián I. Besteiro.*

Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas.

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
Universidad Nacional de La Plata.

2013.

INDICE

PREFACIO	5
CONCEPCIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA	6
Comportamiento de una cuenca hidrográfica	8
Concepción de manejo de cuencas hidrográficas	9
Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable.....	11
ORDENAMIENTO TERRITORIAL	13
Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas (MICH)	14
Ordenación agrohidrológica	15
Importancia de la gestión integral de recursos hídricos (GIRH)	18
Los Recursos Hídricos en la Argentina	20
Principios Rectores de la Política Hídrica de la República Argentina	23
Organizaciones de cuencas hídricas	24
Legislación provincial	25
Código de aguas de la provincia de buenos aires	27
Plan de ordenación o manejo de cuencas hidrográficas	29
Ejemplo de aplicación.	35
ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA	37
Ciclo hidrológico	37
Componentes del ciclo hidrológico	39
Movimiento del agua subterránea.....	42
Cálculo de la descarga instantánea.	43
Simulación de la respuesta de una cuenca ante una lluvia	44
MORFOMETRÍA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.....	48
Parámetros morfométricos.....	48
Parámetros de forma.	51
Parámetros de relieve.	52
Parámetros de drenaje.	54
Ejemplo de aplicación.	56
CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE.....	59
Resolución de hidrogramas a través del método del hidrograma unitario.....	61
Ejemplo de aplicación	63
Creación de hietogramas e hidrogramas en un mismo gráfico.	65
DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL POR EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA	70

Ejemplo de aplicación.....	76
GUÍA PRÁCTICA PARA LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO HEC – HMS	83
Ejemplo de aplicación.....	83
A) Creación de un proyecto en HEC-HMS 3.4.....	85
B) Creación del modelo de cuenca.....	87
C) Creación del modelo meteorológico	95
D) Creación de las especificaciones de control.....	99
E) Creación de una simulación hidrológica	101
F) Visualizar los resultados de la simulación hidrológica.....	103
APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	107
Proyección geográfica.....	107
Modelo cartográfico.....	108
Ejemplo de aplicación.....	110
Herramientas básicas del programa.....	110
Definición del proyecto – directorio de trabajo	110
Explorador de archivos	111
Caracterización de la base de datos.....	112
Presentación de mapas	112
Composición de mapas	113
Paleta de colores.....	114
Digitalización vectorial en pantalla.....	114
Importación de archivos	115
Conversión de archivos de formato vectorial a raster	116
Conversión de tipo de archivo.....	119
Cruzamiento de mapas	119
Edición del mapa de NC	122
Determinación de área y perímetro	124
Reclasificación en clases - categorías	126
Interpolación topográfica. Elaboración de un modelo digital del terreno.....	127
Generación de un mapa de pendientes	129
Elaboración de un mapa de Riesgo de erosión.....	133
Presentación de mapas	134
Guardar la presentación.....	134
DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA PÉRDIDA DE SUELO SUPERFICIAL POR ACCIÓN HÍDRICA.....	135
Modelos empíricos de evaluación de pérdida de suelo.....	136
Modelo USLE.....	136
Factor índice de erosión pluvial o erosionabilidad del aguacero (R)	137
Factor de erodabilidad del suelo (K).....	138
Factor topográfico (LS).....	139
Factor de ordenación de cultivos (C)	141
Factor prácticas de cultivo (P).....	142
Clasificación de Pérdidas de suelo	143
Modelo MUSLE	144

Determinación de la pérdida de suelo mediante el uso de sistema de información geográfica	145
Ejemplo de aplicación.....	146
Aplicación de la USLE	146
Aplicación de la MUSLE.....	153
RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA	155
Reforestación	156
Mejora de las coberturas vegetales	157
Terrazas	158
Bancales	158
Drenajes	159
Palizadas.....	159
Fajinas	160
Diques de consolidación	160
Diques de retención total o selectivo	161
Espigones	161
Muros de defensa de márgenes (malecones, escolleras)	162
Umbrales de fondo	162
Cubiertas vegetales a lo largo de los márgenes de los cauces.....	163
El fenómeno torrencial	164
Pendiente de compensación	164
Determinación de la pendiente de compensación	165
Ejemplo de aplicación.....	168
Diseño de pequeños diques para el control de torrentes.....	170
Consideraciones iniciales para el diseño de diques.....	170
Partes constitutivas de un dique	172
Etapas de funcionamiento del dique de corrección de torrentes.	173
Metodología de cálculo para el dimensionamiento de un dique de características torrenciales.	174
Dimensionamiento de la cubeta	174
Espesor de coronación (e).....	175
Ancho de la base (B).....	175
Condiciones de estabilidad del dique.....	175
Comprobaciones de estabilidad	177
Defensa al pie	179
Mechinales	180
Ejemplo de elaboración del Plano de dimensionamiento de un dique.	180
Ejemplo de aplicación.....	182
BIBLIOGRAFÍA	184

PREFACIO

El estudio de los procesos hidrológicos y su incidencia en el ambiente permitirán evaluar la posibilidad del desarrollo regional y la adopción de diferentes metodologías para un ordenamiento territorial. Su aplicación en estudios del Manejo de Cuencas Hidrográficas forma parte del hilo conductor de la docencia - investigación y extensión. Debido a que esta temática integra conocimientos prácticos y teóricos, la misma permite generar, diseñar, interpretar, desarrollar y aplicar métodos de investigación científica y de extensión participativa en forma dinámica para la interpretación de la realidad forestal, agropecuaria, ambiental y social.

Desde ese enfoque integral y multisectorial, el hombre en el espacio de la cuenca, con los recursos naturales que lo sustentan, es sujeto y al mismo tiempo objeto de estudio para formular las estrategias.

El manejo de cuencas hidrográficas implica conocer el funcionamiento del ecosistema. Ello significa la necesidad de un proceso de investigación en el cual esté presente, junto a la materialización de acciones para los distintos niveles de proyecto, la integración de disciplinas e instituciones, y la transacción entre los actores con un criterio de equidad.

La metodología de investigación es parte también del proceso investigativo, pues se trata de avanzar en el conocimiento de las variables físicas y biológicas de funcionamiento integral del sistema.

Este manual, basado en el marco conceptual del Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, permitirá capacitar a estudiantes avanzados para desarrollar, elaborar, implementar e intervenir en la producción de proyectos adecuados a condiciones reales, mediante el procesamiento de datos geoespaciales (Sistema de Información Geográfica), el cual será el eje integrador de disciplinas. A partir de este material, se pretende brindar pautas metodológicas para diagnosticar y solucionar las necesidades de los actores, con el fin de garantizar la efectividad de los medios elegidos y de las técnicas utilizadas.

El objetivo de este manual es proporcionar elementos y herramientas metodológicas que permitan comprender el marco teórico y práctico del Manejo de Cuencas Hidrográficas, y difundir diferentes instrumentos de carácter biológico, hidrotécnico y tecnológico para la racionalización de la actividad humana en cuencas.

Además, pretende generar un proceso de autoformación de una conciencia crítica para el manejo de cuencas hidrográficas, permitiendo complementar los conocimientos adoptados durante el desarrollo de la carrera de grado, integrando temáticas como edafología, topografía, geomorfología, hidrología, climatología, entre otros; analizar el sistema cuenca hidrográfica, sus características, dinámica y limitaciones y desarrollar criterios de intervención profesional para el manejo de cuencas desde una perspectiva crítica.

CONCEPCIÓN DE CUENCA HIDROGRÁFICA

La naturaleza es una unidad indivisible, en donde los elementos naturales, el suelo, el agua, la vegetación, la fauna, el clima y el hombre, se encuentran íntimamente relacionados. Todos estos elementos, incluido el hombre con sus valores, su cultura, sus costumbres, su propia historia y las características de la sociedad, están íntimamente correlacionadas y afectan directa o indirectamente el comportamiento de la naturaleza.

Un enfoque integral y del conocimiento sistémico del hombre y la naturaleza permite establecer que una cuenca proporciona un marco de referencia para proyectar el desarrollo sustentable regional (Bruno, 2000).

Una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral, que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas, las cuales fluyen al mar a través de una red de cauces principales. En una cuenca hidrológica, además se incluye toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo, conformando un sistema integral, constituyendo un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad. La estabilidad y permanencia de todos sus componentes estructurales son propiedades y formas de comportamiento del sistema. (Gaspari et al, 2009).

La delimitación de una cuenca hidrográfica por su divisoria de aguas, establece un sistema de drenaje (con un río y sus afluentes), por el cual la precipitación caída corre por su superficie, y se concentra en un punto de desembocadura del cauce, contemplando simplemente elementos físicos (topográficos) y biológicos. Está conformada por diferentes unidades ecológicas, las cuales se definen por sus características naturales y unidades socio-políticas (comunidades, provincias o regiones).

A partir de un concepto integrador, la cuenca hidrográfica se define como un sistema de relaciones sociales y económicas, cuya base territorial y ambiental, es una red de drenaje superficial que fluye a un mismo río, lago o mar con un territorio que lo comprende.

Los componentes principales que determinan el funcionamiento de una cuenca son los elementos biofísicos (atmósfera, clima, suelo y subsuelo, hidrología, flora y fauna) y los antrópicos (socio-económicos-culturales (infraestructura, tecnología, niveles de calidad de vida, creencias, conocimientos, sistemas de producción, tenencia de tierra, entre otros), demográficos (tamaño y distribución de la población) y jurídico-institucionales (normas que regulan el uso de los recursos naturales, leyes, políticas de desarrollo, tenencia de las tierras, instituciones involucradas)). Estos conforman diversos subsistemas: el biofísico, el social, el económico y el demográfico, los cuales interactúan definiendo a la cuenca hidrográfica como un territorio que compone un sistema integral.

En síntesis, las cuencas hidrográficas son unidades físicas que sirven como marco práctico objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sustentable, donde la disponibilidad de recursos hídrico, -biológico y edáfico en una cuenca hidrográfica depende de:

- a) La tendencia dinámica de funcionamiento espacio - temporal;
- b) La influencia de tratamientos integrados de producción y protección regionales, según elementos sociales, económicos;
- c) El grado de alteración ambiental y/o social.

El límite de una cuenca hidrográfica (L.C.) se debe identificar a partir de las divisorias de agua o topográficas (D.A) que son los puntos altimétricos más altos que definen la dirección de circulación del escurrimiento superficial, conocidos también como interfluvio. Este último genera una línea de convergencia de aguas superficiales y subterráneas definiendo al canal principal o río, siendo este una línea virtual dibujada sobre las cotas más bajas sobre un plano que se inicia sobre las D.A. denominado vertientes. El agua cuando llega hasta esta línea o canal de desagüe está circulando sobre la llanura o valle aluvial, pasando luego por la planicie de inundación hasta llegar al canal propiamente dicho, que forma la vaguada o thalweg. El thalweg se caracteriza por poseer una pendiente casi uniforme que indica la dirección del escurrimiento sobre el canal de drenaje, tendiendo a un perfil aproximadamente parabólico denominado perfil de equilibrio (Figura 1).

Se considera valle fluvial a la zona de influencia del sistema de drenaje propiamente dicho, y valle aluvial se encuentra en las zonas de aluvionamiento (deposición de aluviones o sedimentos), haciendo avanzar el punto de nivel de base sobre una llanura.

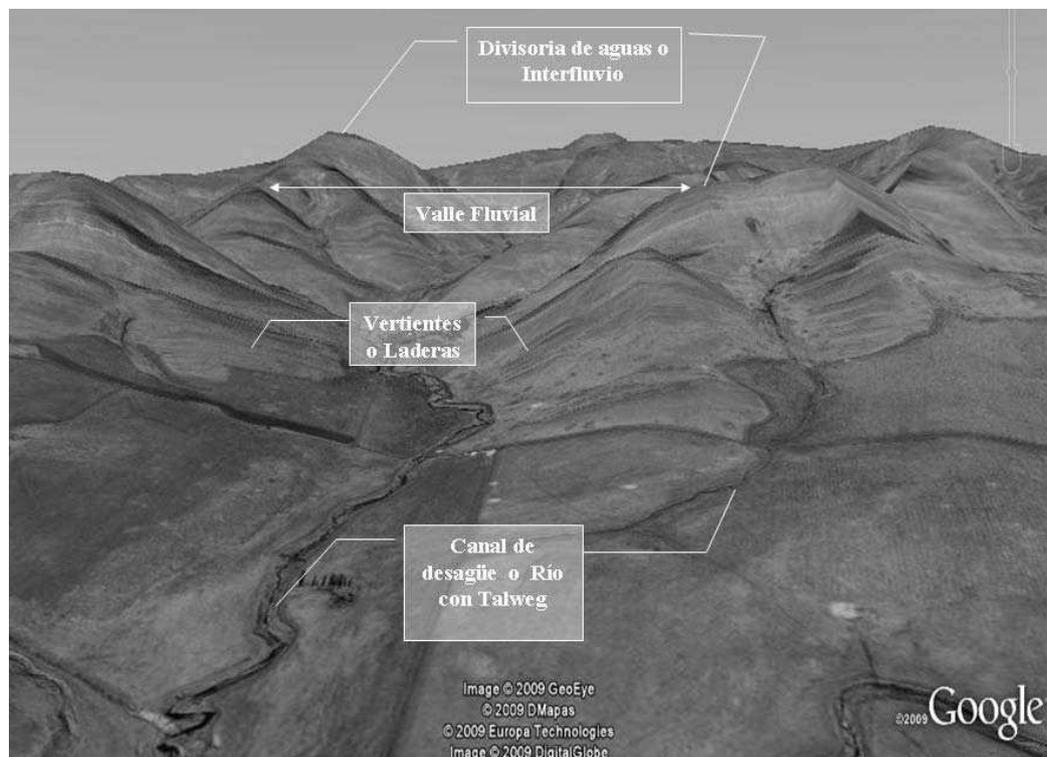


Figura 1. Identificación de los componentes de las cuencas hidrográficas.

En el proceso de análisis y diagnóstico en detalle de una cuenca hidrográfica, se subdivide en unidades hidrológicas de menor tamaño y homogéneas en relación a su respuesta hidrológica, denominadas subcuencas, y si son más pequeñas, microcuencas; las cuales forman parte del este sistema de cuenca de drenaje, y son originadas por D.A. y cursos de agua de menor porte.

COMPORTAMIENTO DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

La hidrología es la ciencia que estudia el recurso agua, en cuanto a existencia, distribución, propiedades físicas y químicas, influencia sobre el medio ambiente y relación con los seres vivos. El entendimiento de la hidrología es importante debido a que se sitúa en cuencas hidrográficas que abastecen agua para diferentes usos del suelo o consumo urbano, y por tanto la calidad y la cantidad del rendimiento hídrico se vuelve crítico.

La cuenca es un "sistema continuo" de clima, suelos, cobertura vegetal, hábitats, red de drenaje, sistemas de producción y presencia humana a lo largo de su pendiente, que interactúa en el espacio y tiempo. La conjunción de estos factores permite identificar al colchón hídrico o sistema hidro-edáfico, que cumple un rol básico para el continuo funcionamiento del sistema. El suelo presenta una capacidad de retención hídrica que depende de los tipos de estructura y textura, de la cobertura vegetal, de la orografía y del clima reinante.

A partir de conocer las características de una cuenca hidrográfica, Bernex (2006) clasifica las diversas funciones:

- Hidrológica: captar agua de las diferentes fuentes de precipitación para formar el escurrimiento de manantiales, ríos y arroyos, almacenamiento del agua en sus diferentes formas y tiempos de duración y al mismo tiempo genera descarga del agua como escurrimiento.
- Ecológica: proveer de hábitat para la flora y fauna constituyendo los elementos biológicos del ecosistema y manteniendo interacciones entre las características físicas y biológicas del agua.
- Ambiental: regular la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos, conservar la biodiversidad, constituir sumideros de CO², albergar bancos de germoplasma, mantener la integridad y la diversidad de los suelos.
- Socioeconómica: suministrar recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población y proveer de un espacio para el desarrollo social y cultural

A partir de la observación de las características particulares y funcionamiento de la cuenca hidrográfica se puede definir que existe una dinámica hidrológica general (Figura 1), cuyos factores de control se diferencian según la distribución geoespacial o posición (Tabla 1).

Posición en la cuenca	Factores de control
CABECERA (Frente montañoso)	CLIMA: precipitación, temperatura, viento SUELOS: textura, profundidad LITOLOGIA: carácter de las rocas subyacentes TOPOGRAFIA: relación ladera pendiente RELIEVE: desnivel, relación divisoria - lechos COBERTURA: fisonomía y densidad vegetal USO DEL SUELO: carácter e intensidad
AREA MEDIA (Garganta)	SUELOS: carácter y constitución RELIEVE: relación divisoria - lechos TOPOGRAFIA: relación ladera pendiente
DESEMBOCADURA (Tierras bajas)	Relación divisorias - valles Relación estacional crecidas – estiaje

Tabla 1. Factores de control según posición en la cuenca hidrográfica.

Continuando con esta observación, se define que la actividad hidrológica también presenta actividad diferencial según la posición en la cuenca. Por ejemplo, en la cabecera predomina la producción de sedimentos, en la garganta el transporte en conjunción con la emisión y deposición (aunque estos dos en menor medida) y en la salida de la cuenca se expresa principalmente la deposición de materiales sólidos. En relación a la estabilidad de la unidad hidrológica es baja en donde se genera el mayor movimiento, principalmente por acción gravitatoria, que es en la cabecera, y aumenta cuando se estabiliza el movimiento hacia la desembocadura.

Este efecto es muy variable en relación al relieve y posición de la cuenca, por ello hay que diferenciar cuencas de llanura y de montaña, según los criterios básicos, como se presentan en la Tabla 2.

	CUENCAS DE	
	LLANURA	MONTAÑA
DELIMITACIÓN	Divisorias de aguas de difícil definición	Divisorias de aguas visibles
PENDIENTES	Muy bajas a bajas	Altas
AREAS DEFINIDAS	Regiones homogéneas	Cuencas hidrográficas
PROCESOS PREDOMINANTES	Movimientos verticales (infiltración – percolación) Almacenamientos	Movimientos horizontales (escurrimiento)
ESTABILIDAD HIDROLÓGICA	Mayor	Menor
PARÁMETROS	Humedad en el suelo Infiltración Variación almacenamientos	Escurrimiento Caudal de avenida
MÉTODOS – PRONÓSTICOS	Sensores remotos, superficies freáticas, curvas altura-caudal-gradiente, aguas superficiales – subterráneas – paleomorfología, modelos	Relación Altura – caudal Modelos hidrológicos
ACTIVIDAD SOCIO ECONÓMICA	Mayor	Menor

Tabla 2: Diferencias básicas entre cuencas de llanura y montaña.

CONCEPCIÓN DE MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

En la literatura clásica, se menciona algo similar al manejo de cuencas cuando el hombre observa la relación que existe entre el área geográfica y la producción de agua. A principios de siglo X, en China surge el proverbio "*quien domina la montaña domina los ríos*". Con el transcurso del tiempo en Europa, específicamente en la región del Mediterráneo, surgen condiciones e ideas sobre el manejo de cuencas hidrográficas. El principal interés se basó en la falta de agua y una alta demanda del recurso para riego, a partir del cual nace la preocupación por aspectos del uso del agua

en lo referente a la legislación y administración. Sin embargo no se tienen en cuenta las cuencas generadoras.

Con el transcurso del tiempo, el concepto de manejo de cuencas se expresa, en la Comisión Forestal Europea de Manejo de Cuencas, con un enfoque hacia la ordenación agrohidrológica, el control de torrentes y desastres naturales. En Estados Unidos se define el manejo de cuencas como "el arte y la ciencia de manejar los recursos naturales de una cuenca con el fin de controlar la descarga de agua en calidad, cantidad y tiempo de ocurrencia", o bien, como "la aplicación de técnicas modernas de conservación al drenaje de la cuenca". Ambos enfoques están referidos a realidades específicas, donde surge la necesidad de tener como objetivos específicos la gestión de los recursos hídricos y el control de la erosión hídrica.

La mayoría de los países en desarrollo y en particular los de América Latina, presentan características muy diferentes y particulares que lo diferencian de los enfoques anteriores. Aún cuando algunas cuencas hidrográficas pueden presentar semejanzas en su función, se diferencian cuando se convierten en unidades sociales donde el hombre habita y lucha por su subsistencia con graves limitaciones socioeconómicas, el comportamiento de la cuenca y su manejo varían totalmente. Por ello, en los países de la región se evolucionó desde una visión centrada en la gestión de los recursos hídricos a considerar a los recursos asociados al agua y pensar finalmente que se debía incorporar a los habitantes de la cuenca (Dourojeanni, 1990).

La preocupación por el Manejo de las Cuencas Hidrográficas en la República Argentina data de la década de 1960. El Dr. Julio Castellanos y su equipo de colaboradores, sensibilizados por las problemáticas de sequías e inundaciones de la Provincia de Buenos Aires, partieron hacia una concepción integral en cuanto al papel del bosque para la regulación de los caudales torrenciales y la protección de los suelos. Este rol también fue enunciado por Florentino Ameghino en su ensayo "*Las Secas y las Inundaciones en la Provincia de Buenos Aires*",....., "*Obras de Retención sí, Obras de Desagüe no*" publicado en 1886 en forma de folletín en el diario La Prensa.

A partir de la década de 1980, se incorporó la visión ecosistémica y de participación social, en un marco conceptual de desarrollo sustentable, donde la cuenca hidrográfica se presenta como un espacio idóneo donde interactúan los sistemas físico-bióticos y socio-económicos. A principios de este milenio, se definieron diferentes enfoques conceptuales en relación a las políticas sobre cuencas hidrográficas, como ser:

- Desde el ámbito de competencia de las políticas hídricas y obras hidráulicas, las cuencas hídricas representan el área de captación y convergencia del agua, donde prevalece un enfoque sustentado en el conocimiento del sistema hidrológico (con sus estructuras superficiales y subterráneas), el uso múltiple y la administración del agua con criterio de sustentabilidad.
- Se visualiza a la cuenca como la unidad de gestión integrada del recurso hídrico, ya sea dentro de una misma jurisdicción, como así también para administrar recursos hídricos compartidos (interjurisdiccionales). La institucionalización de la cuenca a través de organismos de cuencas, efectiviza la coordinación intersectorial e interjurisdiccional por el uso del agua y la organización de sus usuarios, así como la vinculación de éstos con la autoridad hídrica provincial o nacional, según la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación (2002).
- Desde el ámbito de competencia con la conservación y uso sustentable de los recursos naturales, se sostiene la visión del manejo del territorio tomando a la cuenca hidrográfica como unidad natural para la planificación y gestión participativa, construida desde lo micro a lo macro, incorporando las

consideraciones ambientales, económico-productivas, de identidad sociocultural y de protagonismo de los actores involucrados en el desarrollo.

Esta nueva tendencia presenta un perfil con base a disminuir la degradación del medio ambiente en una cuenca hidrográfica, por medio de controlar y/o manejar la alteración al medio físico que incide sobre las actividades antrópicas, y a la sociedad en general, específicamente en su tendencia positiva de desarrollo. Evidentemente la recuperación física del medio ambiente, deberá pasar obligatoriamente por una recuperación social y económica del hombre y de la sociedad, lo que en última instancia, es una decisión de tipo político y de carácter educativo.

Considerando la evolución de los conceptos en relación al manejo de cuencas hidrográficas como consecuencia de la aplicación de políticas integradoras, se genera una planificación y gestión para el desarrollo sostenible, que forma parte de la base indispensable para la comprensión y aplicación del concepto de estabilidad en el buen uso y manejo de los recursos naturales y establecer una metodología para la elaboración de un Plan de Ordenamiento Territorial (Gaspari, 2002).

En síntesis, el concepto global de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas (MICH) se basa en lograr un mejor desarrollo de la sociedad humana inserta en ella y de la calidad de vida de su población considerando el medio ambiente sustentable. Se define como un conjunto de esfuerzos tendientes a identificar y aplicar opciones técnicas, socioeconómicas y legales, que establecen una solución a la problemática causada por el deterioro y mal uso de los recursos naturales renovables, así como en la integridad de las cuencas hidrográficas (Gaspari et al, 2009).

El manejo apropiado de una cuenca hidrográfica brinda beneficios a la sociedad, que se originan en una amplia gama de bienes y servicios, que pueden ser aprovechados por la comunidad regional y/o local. Este manejo se genera a partir de diferentes tipos de funciones de las cuencas hidrográficas, como ser Ecológicas, Sociales y Económicas, las cuales si son perturbadas o alteradas puede presentar problemas asociados al mal funcionamiento. Estas problemáticas tienden a establecer cambios en asociación al uso, manejo y gestión de la misma, provocando riesgos definidos en tres categorías básicas, de las cuales se mencionan algunos de sus riesgos:

1. **Riesgos Naturales:** inundaciones, aluviones, deslizamientos.
2. **Depredación del Potencial Productivo:** desertificación, erosión, incendios forestales, quemas descontroladas, sobrepastoreo, sobreutilización agrícola.
3. **Conflictos en el Uso de los Recursos:** contaminación, eutrofización, aumento de demandas para energía hidroeléctrica, aumento de requerimientos hídricos para riego, sobreexplotación de los recursos naturales como ser suelo, agua y vegetación

PROCEDIMIENTOS DE GESTIÓN PARA EL DESARROLLO SUSTENTABLE

El documento denominado “Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable”, ha sido elaborado por el señor Axel Dourojeanni, Director de la División de Recursos Naturales e Infraestructura, forma parte de la actividad práctica de esta unidad de trabajo. Este manual constituye una versión revisada y actualizada del trabajo publicado bajo el nombre “Guía para orientar procesos de gestión para el desarrollo en cuencas y microrregiones de alta montaña” por el Instituto Latinoamericano y del

Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES) como Documento 89/05/Rev.1, Serie Ensayos, 1993.

El mismo está disponible en el Aula Virtual del Curso de Manejo de Cuencas Hidrográficas de la FCAF y en la web: www.redesma.org/docs_portal/dessost.pdf

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de otros autores.

ORDENAMIENTO TERRITORIAL

El Ordenamiento Territorial (OT) se concibe como un proceso y una estrategia de planificación de carácter técnico-político, a través del cual se pretende configurar, en el corto, mediano y largo plazo, una organización del uso y ocupación del territorio, acorde a las potencialidades y limitaciones del mismo, las expectativas y aspiraciones de la población y los objetivos sectoriales de desarrollo (económicos, sociales, culturales y económicos).

Desde una visión holística y sistemática de la relación sociedad-naturaleza, el territorio se entiende como el espacio de interacción de los subsistemas natural y social, que componen el medio ambiente nacional, regional y local, estableciéndose una relación de complementariedad entre los conceptos de territorio y medio ambiente. De esta manera, el territorio no es solamente el entorno físico donde se enmarca la vida humana, animal y vegetal y donde están contenidos los recursos naturales, sino que comprende también la actividad del hombre, y donde planifica sus actividades socio-económicas y productivas.

Esta planificación se concreta en planes que expresan un modelo territorial, a largo plazo, que la sociedad percibe como deseable y las estrategias mediante las cuales se actuará sobre la realidad para evolucionar hacia dicho modelo (Palacio et al., 2004).

Los objetivos del OT van dirigidos al uso sustentable de los recursos, considerando tanto el carácter natural como social y económico del territorio. La utilización sustentable de los recursos, a través de la OT, tiene como finalidad “el mejoramiento de la calidad de vida” (Comisión de Desarrollo Sustentable y Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, 1991), en equilibrio con la optimización del uso sostenible de los recursos naturales. Para ello se deben tener en cuenta los principios de:

- **Integralidad.** El proceso de Ordenamiento Territorial interrelaciona las dimensiones territorial, cultural, económica, social, ambiental y política.
- **Participación.** El proceso de Ordenamiento Territorial implica un proceso interactivo entre el Estado y la Sociedad, donde los actores son sujetos de su construcción.
- **Subsidiariedad.** El proceso de Ordenamiento Territorial es un proceso descentralizado con responsabilidades definidas en cada uno de los niveles nacional, departamental y municipal.
- **Equidad.** El proceso de Ordenamiento Territorial está orientado a generar condiciones para asegurar mejor correlación de la diversidad territorial en los procesos de toma de decisiones, acceso a recursos productivos, financieros y no financieros, de tal forma que se garanticen las oportunidades, bienes y servicios en todo el país.
- **Precautorio.** Expresa el hecho de que el Ordenamiento Territorial está orientado a adoptar medidas precautorias cuando existan indicios de que una práctica u omisión en el uso u ocupación del territorio pueda generar daños graves o irreversibles.
- **Prevalencia del Interés General sobre el Particular.** Expresa el hecho de que el Ordenamiento Territorial está orientado a optimizar la ocupación y el aprovechamiento del territorio buscando la preponderancia del interés general sobre el particular en caso de coalición e intereses.

La planificación regional y ordenamiento territorial precisan de metodologías para la obtención de sus objetivos. Estas metodologías pueden variar, pero fundamentalmente han de estar basadas en un proceso informativo (levantamiento, sistematización, interpretación y diagnóstico), un proceso evaluativo (zonificación o categorización física y económica) y un proceso de toma de decisiones, concertación y reglamentación (políticas, planificación y ordenamiento territorial).

Con el transcurso del tiempo, se definieron varias posiciones de estudio y planificación del territorio a nivel de cuenca hidrográfica. Inicialmente, se compartía el objeto de estudio (cuenca hidrográfica) entre varias disciplinas planteando un trabajo de características intradisciplinarias.

Posteriormente, los proyectos coincidían en el objeto cuenca y su objetivo de estudio, tendiendo a generar un proyecto de tipo interdisciplinario.

Según experiencias propias y de diversos organismos de investigación y desarrollo, en la actualidad, el OT se realiza por medio de estudios interdisciplinarios y que también integran una metodología de trabajo acorde al objetivo y objeto de estudio, generando un programa de índole transdisciplinario. Un programa transdisciplinario define y sugiere alternativas de compatibilización entre la sustentabilidad ambiental y el crecimiento económico.

Esta compatibilización de alternativas es, según Dourojeanni (1990), cuando la sustentabilidad ambiental dependiente del crecimiento económico, brinda orientaciones sobre utilización de los recursos disponibles y como “manejar” el medio ambiente para evitar su deterioro. Considerando además que el crecimiento económico es dependiente de la sustentabilidad ambiental, ya que establece diversas orientaciones económicas respondiendo a las demandas de los recursos, definiendo condiciones ambientales “adecuadas” y productivas para que no afecte al entorno.

La planificación para el OT necesita de la zonificación del paisaje – territorio como resultado de la aplicación de metodologías para delimitar un espacio de la superficie terrestre con ciertos atributos particulares. Esta zonificación conforma unidades homogéneas con respecto a sus componentes constituyentes, como ser el relieve, las formas del relieve, litología, suelo, vegetación, condiciones hidrológicas y las interrelaciones con las actividades del hombre, es decir el arreglo espacial de dichos componentes.

Estas unidades homogéneas conforman las Unidades Territoriales (UT), que son zonas físicas – ambientales que sirven como marco práctico, metodológico y objetivo para la planificación y gestión del desarrollo sustentable. La UT constituye un sistema ambiental integrado por factores naturales, socioculturales y económicos, dinámicos e interrelacionados entre sí, que operan dentro y fuera de la misma Unidad Territorial. Cuando esta UT está englobada en una cuenca hidrográfica, la planificación territorial se denomina: Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.

MANEJO INTEGRAL DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS (MICH)

Se entiende por MICH como “la gestión que el hombre realiza en un determinado sistema hidrográfico para aprovechar y proteger los recursos naturales que le ofrece con el fin de obtener una producción óptima y sostenida” (Gaspari et al., 2009). Este manejo otorga al desarrollo sustentable un ámbito geográfico de aplicación que incluye un proceso antrópico consistente en planear, organizar, dirigir, evaluar y

controlar la ejecución de sus acciones preservando los recursos con el fin de garantizar el crecimiento económico y el bienestar social de las generaciones presentes y futuras.

El manejo integral de cuencas se puede concebir como la formulación y aplicación en toda la cuenca hidrográfica, tanto aguas abajo como aguas arriba, de un conjunto integrado de acciones en la búsqueda del desarrollo sostenible, minimizando los efectos ambientales negativos sobre el recurso hídrico que la población utiliza aguas abajo.

El desarrollo sostenible en manejo de cuencas puede orientar sus acciones hacia:

- a) Un desarrollo económico, social, cultural que respete las limitaciones del ambiente natural, los valores del hombre y su familia, que sea permanente en el territorio y en el tiempo, en armonía con la naturaleza.
- b) Una actividad económica diversificada, basada en un desarrollo agropecuario y forestal rentable, que sea menos contaminante y más endógeno en el aprovechamiento de los recursos humanos, naturales y paisajísticos.
- c) Una arquitectura autóctona y paisajismo acorde con el bioclima y que aproveche las tecnologías más adecuadas.
- d) Un alto grado de autogestión a través de la participación, organización, capacitación, educación y divulgación de logros, unido al apoyo decisivo de las instituciones públicas en la construcción de infraestructura y prestación de servicios básicos esenciales.

El manejo de cuencas es un método potente de planificación que aplica un enfoque holístico, destacando la interconectividad de los recursos naturales entre los usuarios aguas arriba y aguas abajo, aplicando el concepto de ecosistema, los principios de la ciencia ecológica y los lineamientos del desarrollo sostenible. Además, facilita el monitoreo y evaluación del efecto de las inversiones en conservación de vertientes para protección del agua y privilegia la protección del valor estratégico del recurso.

ORDENACIÓN AGROHIDROLÓGICA

La ordenación agrohidrológica de cuencas aborda la corrección del fenómeno torrencial teniendo como unidad de estudio la cuenca vertiente, que es el gran colector que recoge las precipitaciones en forma de lluvia y las transforma en escurrimientos que originan los ríos. Las soluciones deben ser concebidas como una conjunción de mejora de la cubierta vegetal e hidrotecnias, armónicamente distribuidas entre la cuenca y sus cauces.

Los tres principios esenciales sobre los que se fundamenta la ordenación de los espacios naturales, rurales y forestales de las cuencas hidrográficas son:

- a) El reconocimiento de la multifuncionalidad de dichos espacios, que obliga a conciliar los intereses de los diferentes sectores y actores implicados en el uso del territorio.
- b) La necesidad de preservar la biodiversidad, los valores naturales y las funciones ecológicas de dichos espacios.
- c) La búsqueda de un modelo sostenible de desarrollo que permita la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales preservando el

medio ambiente y no comprometiendo el futuro de las generaciones venideras.

En un proyecto convencional de restauración hidrológico-forestal de una cuenca vertiente, su planificación previa implica la ordenación agro-hidrológica de la cuenca en cuestión y ésta incluye, según Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008), las siguientes fases:

- √ Estudiar su medio físico con criterios racionales y comprobados.
- √ Simular su comportamiento ante los distintos tipos de tormenta seleccionados para tal fin.
- √ Estudiar el mejor uso del suelo en las diferentes áreas de la cuenca y las técnicas más apropiadas para el control del tránsito de las avenidas por su red de drenaje.
- √ Proponer las medidas pertinentes para el mejor funcionamiento del ciclo del agua en la cuenca y para amortiguar los efectos del geo-dinamismo torrencial en la misma.
- √ Justificar las propuestas, delimitando el marco de viabilidad de las actuaciones, sin obviar las restricciones temporales que pueda implicar el proyecto de restauración hidrológico forestal (ejemplo, la primera fase de las repoblaciones).

La ordenación agrohidrológica, al igual que la restauración hidrológico-forestal, son consideradas como actuaciones técnicas, pero profundamente culturales y pensadas para la población; siendo su propósito final compaginar sus necesidades con las capacidades y limitaciones naturales del medio donde se asientan, para asegurar el presente y futuro de los recursos naturales; lo que actualmente se conoce como desarrollo sustentable (Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez, 2008)

El objetivo principal de la ordenación agrohidrológica es la mejora de la calidad de vida de las poblaciones locales mediante la protección de los suelos, la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. A su vez, la mejora de los recursos económicos propios permitirá generar empleo y estabilizar la población evitando las migraciones en origen, potenciando el desarrollo de los sectores económicos basados fundamentalmente en el aprovechamiento ordenado de los recursos naturales propios: sector forestal, turismo rural, caza y pesca, sector agro-ganadero, productos naturales (miel, hongos, semillas) entre otros (Rábade Blanco, 2006).

Los parámetros fundamentales en la ordenación agrohidrológica de una cuenca vertiente son los que, además de contribuir a la descripción de su estado físico, permiten definir en ella el movimiento de los ciclos del agua y de los sedimentos. A continuación se establecen los tipos de parámetros recomendados por Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008):

- La pendiente del terreno, porque de ella depende la velocidad del agua en la ladera y la energía cinética que tiene la lámina de agua en su recorrido.
- La posición geográfica, porque a mayor altitud mayor es el recorrido de la lámina de agua; luego hay más energía potencial para convertirse en cinética. De acuerdo con la misma se establecen las áreas dominantes y dominadas en la cuenca
- El tipo de suelo, porque representa el rozamiento que ofrece la obra a la circulación de la lámina de agua y, por tanto, constituye una pérdida de energía. Si a la lámina le sobra energía, supone el inicio de la erosión superficial.

- La vegetación, porque representa un rozamiento al movimiento de la lámina de agua en la ladera. Además interviene activamente en el ciclo del agua y de los sedimentos.
- Índices de protección del suelo por la vegetación, por ser una resultante de los factores anteriores: suelo, pendiente y vegetación.
- El índice de erosión pluvial del modelo USLE, porque representa la energía con que inciden las gotas de lluvia sobre el suelo.
- El propio modelo USLE, por ser una combinación de los factores anteriores.
- La geología y la edafología, la primera por estar relacionada con la resistencia del suelo a erosionarse y la segunda porque representa al perfil del suelo y la capacidad de éste para sustentar la vegetación.
- Un índice fito-climático, que permita establecer la capacidad de las diferentes áreas de la cuenca para mantener una determinada vegetación climática. Este índice, a diferencia de los anteriores, representa la potencialidad de la cuenca para recuperar su vegetación climática y por tanto sus posibilidades de rehabilitación a través de actuaciones hidrológico-forestales.

La planificación del medio natural es relativamente reciente y la tecnología ha hecho posible que el hombre pudiera incidir en la naturaleza, en forma negativa o positiva. Para poder llevar adelante una correcta planificación agrohidrológica se deben definir correctamente los objetivos. Según Mintegui Aguirre et al (2006) estos objetivos se pueden dividir en dos grandes grupos:

- La resolución de los problemas generados por los eventos torrenciales acaecidos en la cuenca.
- La utilización agrícola y forestal de la cuenca aprovechando racionalmente sus recursos hídricos, potenciando la agricultura en los lugares idóneos y concretando las potencialidades vegetativas en las diferentes zonas de la misma; de modo que la vegetación permanente no se imponga sólo como protección integral de la cuenca, sino que se instale ajustada a la realidad física del territorio y su clima, en función del comportamiento del ciclo del agua en la zona.

IMPORTANCIA DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RECURSOS HÍDRICOS (GIRH)

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es el proceso que tiene como objetivo asegurar el desarrollo y manejo coordinado del agua en interacción con otros sistemas naturales, sociales y culturales, maximizando el bienestar económico sin comprometer a los ecosistemas vitales. Ello implica una mayor coordinación en el desarrollo y gestión de: tierras y agua, aguas superficiales y subterráneas, cuencas fluviales y entornos costeros y marinos adyacentes, e intereses río arriba y río abajo.

El agua es un recurso estratégico para el desarrollo de las economías regionales. La asignación del agua disponible en una región debe atender no sólo los requerimientos ambientales y las necesidades básicas del ser humano, sino también elevar su calidad de vida, poniendo el recurso hídrico al servicio del desarrollo y bienestar de la sociedad. La estrategia global de Global Water Partnership (GWP) para el período 2009-2013 sostiene que el desarrollo sostenible no será alcanzado sin un mundo con seguridad hídrica. Un mundo con seguridad hídrica integra la preocupación por el valor intrínseco del agua con su uso para la supervivencia y bienestar del hombre. Implica erradicar la responsabilidad fragmentada por el agua e integrar la gestión de los recursos hídricos a través de todos los sectores -finanzas, planificación, agricultura, energía, turismo, industria, educación y salud. Un mundo con seguridad hídrica reduce la pobreza, promueve la educación y aumenta los estándares de vida. Es un mundo en donde hay una mejor calidad de vida para todas las personas, especialmente las más vulnerables (generalmente mujeres y niños), quienes se benefician de la buena gobernanza del agua. Por esto, la GIRH no se limita solo a la gestión de recursos físicos, sino que se aplica también en la reforma de los sistemas humanos con el fin de habilitar a la población (hombres y mujeres por igual), para que los beneficios derivados de dichos recursos reviertan en ellos (GWP, 2005).

Un enfoque de GIRH requiere que las políticas y prioridades consideren la repercusión sobre los recursos hídricos, incluyendo la relación mutua existente entre las políticas macroeconómicas y el desarrollo, gestión y empleo del agua; las decisiones relacionadas con el agua, adoptadas a nivel local o en la cuenca hidrográfica estén en la línea o, por lo menos, no choquen con la consecución de objetivos nacionales más amplios y la planificación y estrategias en el ámbito hidrológico se integren en objetivos sociales, económicos y ambientales más amplios (Pochat, 2008)

Teniendo en cuenta la importancia de los recursos hídricos, según GWP (2005) en la práctica, se debe otorgar al agua el lugar que le corresponde en la agenda política nacional, crear una mayor “concienciación sobre el agua” entre los responsables de diseñar las políticas en el ámbito de la economía y en los sectores relacionados con el agua, poner en pie canales de comunicación más eficaces y un proceso de toma de decisiones consensuado entre los organismos gubernamentales, organizaciones, grupos de intereses y colectivos civiles y estimular a la población a superar las definiciones sectoriales tradicionales.

En todas las declaraciones de políticas hídricas se menciona, en un orden indistinto, que las mismas deben satisfacer objetivos sociales, ambientales y económicos; sin explicitar mayormente cómo se pueden alcanzar estos tres objetivos que son usualmente conflictivos entre sí, sobre todo en el corto plazo. La carencia de estrategias para lograr estos objetivos es precisamente una de las mayores razones por las cuales normalmente las declaraciones de política quedan simplemente como un enunciado de buenas intenciones. De hecho hoy en día prima lo económico sobre lo social y ambiental (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

La falta de compromiso de los actores comprometidos para alcanzar simultáneamente las tres metas explica por que hay tantas personas adeptas al concepto de desarrollo sustentable pero muy pocas dispuestas a sacrificar algo de su estilo de vida para alcanzarlo.

El desarrollo sustentable no se refiere a una meta tangible ni cuantificable a ser alcanzada en determinado plazo y momento. Se refiere más bien a la posibilidad de mantener un equilibrio entre factores que implican un cierto nivel de desarrollo del ser humano, nivel que es siempre transitorio, en evolución y, al menos en teoría, debería ser siempre conducente a mejorar la calidad de vida de los seres humanos. El llamado desarrollo sustentable es, en consecuencia, la resultante de un conjunto de decisiones y procesos que deben llevar a cabo generaciones de seres humanos, dentro de condiciones siempre cambiantes, con información usualmente insuficiente, sujetas a incertidumbres y con metas poco compartidas por una sociedad y personas en general no muy solidarias. Sólo si el desarrollo sustentable se mantiene en el tiempo se alcanza la sostenibilidad. Cabe resaltar que la sociedad se ha organizado para conducir procesos de gestión a nivel de territorios delimitados para alcanzar sobre todo metas de crecimiento económico y a veces metas sociales pero muy escasamente para manejar territorios delimitados por razones naturales, como es el caso de la gestión del agua a nivel de cuenca. Esto implica que sólo existen algunas bases de gobernabilidad para alcanzar en forma coordinada metas económicas, sociales y ambientales en los territorios actualmente delimitados por razones político—administrativos (límites distritales, provinciales, estatales, regionales o de países), y no para hacerlo a nivel de cuenca u otros territorios delimitados por razones naturales (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

El concepto de desarrollo sustentable y sostenible está además vinculado a categorías o escalas de calidad de vida y a la interacción entre habitantes de uno o más territorios que intercambian recursos o migran de un lugar a otro. El desarrollo sustentable está estrechamente asociado a las demandas que exige cada cultura o estilo de vida, a la globalización de los procesos económicos, sociales y ambientales y a la capacidad negociadora entre regiones o países. El mismo tipo de consumo que se extiende a nivel global ejerce, cada vez más, influencias en el medio social y ambiental de culturas antes muy diferentes que ahora pugnan por imitar lo que consideran más avanzado. Esto se refleja ampliamente en los incrementos de consumo, en cantidad y variedad, de productos por habitante.

En resumen, el llamado desarrollo sustentable es la resultante de un conjunto de decisiones y procesos que deben llevarse a cabo por generaciones de seres humanos para su propio bienestar, dentro de condiciones de vida siempre cambiantes y vinculados a intercambios entre territorios. Estas condiciones están dadas por el sistema holístico que conforma el universo dentro del cual el ser humano es una pequeña parte. Por razones de sectorialización, especialización y políticas, las decisiones sobre este sistema complejo se reducen usualmente a tratar separadamente los aspectos económicos, ambientales y sociales y a referirlo a territorios políticos administrativos con el fin de tener un área “gobernable”. Esta forma fragmentada en que se toman las decisiones atenta contra la adecuada gestión de los ecosistemas y recursos naturales como el agua (Dourojeanni y Jouravlev, 1999).

Las actividades productivas pueden tener un impacto importante en el medio ambiente y en la salud de la población. Una gestión inadecuada de los recursos naturales, principalmente de la tierra y del agua, puede generar un agotamiento de los recursos hídricos, contaminar las aguas superficiales y subterráneas, provocar la erosión de los suelos y favorecer procesos de desertificación destruyendo los ecosistemas naturales. Por ejemplo, cuando los sistemas de riego no son eficientes, parte del agua extraída se pierde y aunque parte de esta agua llega de nuevo a los ríos o a los acuíferos

subterráneos, las pérdidas excesivas contribuyen a intensificar las repercusiones ambientales negativas que tiene el regadío.

LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA ARGENTINA

A nivel nacional la República Argentina tiene un sistema de gobierno federal compuesto por 23 provincias y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Según la Constitución Nacional, a las provincias les corresponde el dominio originario de los recursos naturales existentes en su territorio. Existen también poderes concurrentes, cuyo ejercicio corresponde indistinta y simultáneamente al gobierno nacional y provincial.

Argentina dispone de una oferta hídrica media anual por habitante sumamente importante. La misma es superior a los 22.500 m³ por habitante, muy por encima del umbral de stress hídrico adoptado por el PNUD equivalente a una disponibilidad de 1000 m³ por habitante. No obstante la distribución de la oferta es muy irregular, por lo que en varias provincias de la región árida la disponibilidad de agua se ubica bien por debajo de ese valor. Así, dos tercios de la superficie del País se encuentran bajo condiciones climáticas áridas o semiáridas

La Tabla 3 presenta un resumen de los aportes por vertiente hídrica en la República Argentina, teniendo en cuenta que el caudal medio incluye el 100% del caudal del río Uruguay y la superficie consignada es el total de la cuenca de aporte, siendo en territorio nacional esta última es 918.00 km² y que no incluye arroyos de la Puna.
Fuente: Balance Hídrico de la República Argentina. INCYTH-CONAPHI, 1994.

Sistema	Caudal medio (m ³ .seg ⁻¹)	(%)	Derrame (hm ³)	Área aporte (km ²)	Caudal específico (l.seg ⁻¹ .km ⁻²)
Vertiente Atlántica					
Del Plata	22.031	85,27	694.770	3.092.000	7,1
Pcia. Buenos Aires	147	0,57	4.639	181.203	0,8
Del Colorado	319	1,24	10.060	92.840	3,4
Patagónicos	1.941	7,52	61.211	356.033	5,5
Subtotal	24.438	94,60	770.677	3.722.076	
Promedio					6,5
Vertiente Pacífica					
Varios	1.212	4,69	38.222	33.455	36,2
Endorreicas					
Independientes	42	0,16	1.325	248.871	0,2
Mar Chiquita	114	0,44	3.595	22.030	5,2
Serrano	24	0,09	757	26.555	0,9
Pampeano	6	0,02	189	600	10,0
Subtotal	186	0,71	5.866	298.056	
Total	25.836	100	814.764	4.053.587	6,4

Tabla 3. Resumen de aportes por vertiente y sistema de Argentina.

La ubicación de estos sistemas hídricos se representa en la Figura 2.

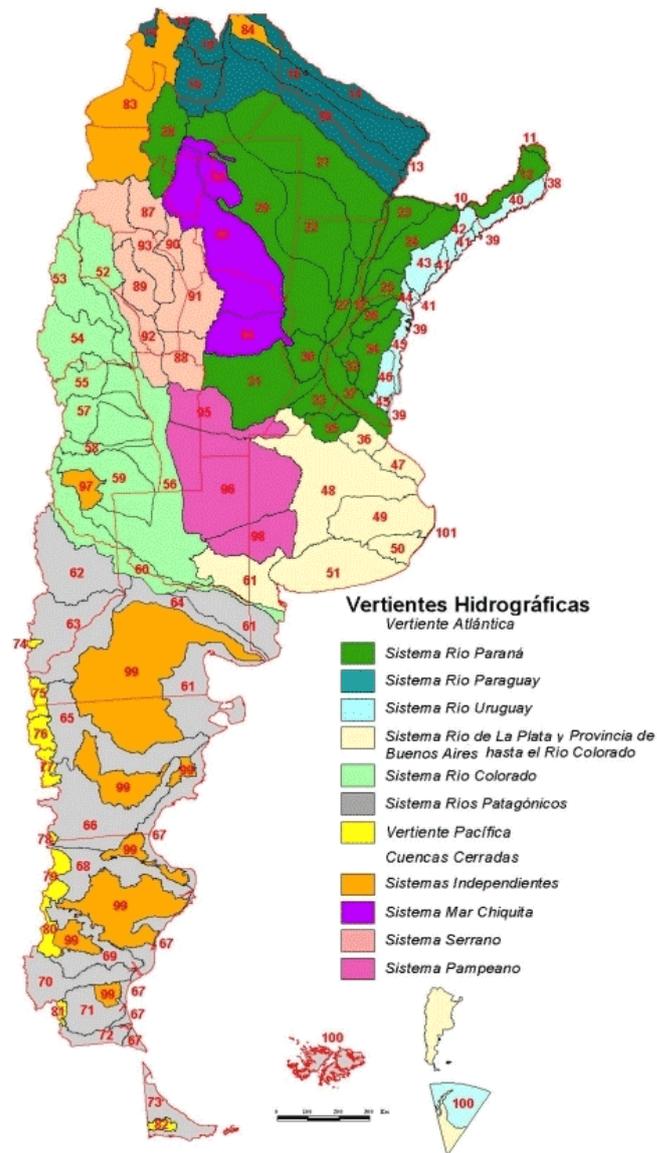


Figura 2. Distribución de las vertientes en Argentina.
 Fuente: Atlas Digital de Recursos Hídricos Superficiales de la República Argentina.
 2002.

El Congreso Nacional debe “reglamentar la libre navegación de los ríos interiores” y “proveer lo conducente a la prosperidad del país y al bienestar de todas las provincias”, promoviendo, entre otras actividades, la construcción de canales navegables y la exploración de los ríos interiores. Estas atribuciones son deben realizar en forma conjunta con las de los estados provinciales. En relación a los ríos interprovinciales se deben reglamentar los asuntos conjuntos mediante tratados. En temas relacionados directa o indirectamente con los recursos hídricos, según la Constitución, la Nación ejerce jurisdicción sobre la navegación, el comercio interprovincial e internacional, la celebración de tratados internacionales y el dictado de los Códigos Civil, Penal, de Minería, de Comercio, y de Trabajo y Seguridad Social.

La legislación nacional actual está constituida por las normas contenidas fundamentalmente en el Código Civil, el Código de Comercio, el Código de Minería, el Código Penal y leyes federales como las de energía, navegación, transporte, puertos, protección del ambiente y de los recursos naturales, entre otros, las que contienen disposiciones directa o indirectamente relacionadas con el agua. A su vez la Nación ha ratificado tratados internacionales sobre aguas compartidas, ingreso de buques nucleares en aguas argentinas, préstamos para obras de abastecimiento de agua potable y saneamiento urbano y rural, construcción de obras de uso múltiple y otros cuya normativa involucra directa o indirectamente al agua (Pochat, 2005).

A pesar de la legislación existente, durante años la GIRH en Argentina se caracterizó por una gran fragmentación sectorial e institucional que no hizo más que agudizar desequilibrios sociales y territoriales. La comunidad hídrica argentina comenzó a tomar conciencia del deterioro en la gestión de los recursos hídricos y se vio motivada para corregir el rumbo actual del manejo de las aguas. Se sostuvo, desde un principio, en que el primer paso debería ser la creación de bases jurídicas sólidas que permitieran una gestión eficiente y sustentable de los recursos hídricos. Desde agosto de 2000 hasta diciembre de 2002, la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SsRH) impulsó la realización de talleres provinciales y talleres nacionales en los que las autoridades hídricas convocaron a los sectores vinculados con el uso, gestión y protección de sus recursos hídricos, con el objetivo de plasmar la visión del significado del agua para los argentinos, como motor del desarrollo sustentable.

La visión compartida por la comunidad hídrica argentina fue que el aprovechamiento de los recursos hídricos debe realizarse armonizando los valores "social", "económico" y "ambiental" que la sociedad le adjudica al agua. También reconoce que la consideración aislada de estos tres valores puede provocar acciones antagónicas o excluyentes entre sí. Por lo tanto, concluye que la única forma de utilizar el agua en beneficio de toda la sociedad provendrá de encontrar el balance justo en la aplicación de estos tres valores que guían la política hídrica; que sólo será posible alcanzar a través de la participación ciudadana en los procesos de toma de decisiones. El 27 de marzo de 2003 los representantes de las jurisdicciones provinciales, suscribieron el Acta Constitutiva del Consejo Hídrico Federal (COHIFE), como ámbito de discusión, concertación y coordinación de la política hídrica en el que participan las provincias, la ciudad autónoma de Buenos Aires y la SsRH. Desde su creación, este organismo ha desarrollado una labor permanente de consolidación del espacio institucional y un esfuerzo de funcionamiento y desarrollo con activa participación de sus miembros. El 17 de septiembre de ese mismo año el COHIFE suscribió el Acuerdo Federal del Agua y los Principios Rectores de Política Hídrica, y se acordó elevarlos al Congreso Nacional para materializar una normativa a través de una ley Marco Nacional de Política Hídrica. En esa oportunidad, cada integrante del organismo se comprometió a compatibilizar e instrumentar dichos principios en las políticas, legislaciones y la gestión de las aguas de sus respectivas jurisdicciones (Fuente: <http://www.hidricosargentina.gov.ar/cohife.html>).

El enunciado de estos lineamientos de política (Principios Rectores) servirá para guiar a los legisladores responsables de traducir la visión del recurso hídrico en una legislación marco coherente y efectivo, que sustente las raíces históricas y los valores de cada provincia. También, para guiar a los administradores a crear organizaciones y programas de acción adecuados. La adopción de estos Principios Rectores por parte de todas las Provincias y la Nación, a la luz de un federalismo concertado, permitirá avanzar hacia un desarrollo armónico del recurso hídrico, disminuyendo los posibles conflictos derivados de su uso. La materialización de estos principios en acciones sustentables y eficientes requiere del apoyo participativo de la comunidad hídrica en su totalidad y de un férreo compromiso del sector político, en el entendimiento que del manejo inteligente de las aguas depende la vida y la prosperidad de nuestro país.

Este Acuerdo logrará amalgamar principios de política que integran los aspectos sociales y ambientales relacionados con el agua como parte de las actividades productivas de la sociedad; incorporando principios básicos de organización, gestión y economía de los recursos hídricos en concordancia con principios de protección del recurso.

PRINCIPIOS RECTORES DE LA POLÍTICA HÍDRICA DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

Los Principios Rectores de la Política Hídrica de la República Argentina se redactaron a partir de un documento aprobado en el "Encuentro Nacional de Principios Rectores de Política Hídrica de la República Argentina", Ciudad de Buenos Aires, 17 al 19 de Diciembre de 2002, en el cual consideraron los aspectos del agua en relación a su ciclo en la naturaleza, la sociedad, la gestión, las instituciones y la ley.

El texto completo de los Principios Rectores se encuentra en la página web: http://www.hidraulica.gov.ar/legales/principios_rectores_de_politica_hidrica.pdf.

Estos principios están redactados teniendo en cuenta los siguientes lineamientos:

EL AGUA Y SU CICLO

El agua es un recurso renovable escaso y vulnerable.

El agua tiene un único origen.

EL AGUA Y EL AMBIENTE

Articulación de la gestión hídrica con la gestión ambiental.

Articulación de la gestión hídrica con la gestión territorial.

Calidad de las aguas.

EL AGUA Y LA SOCIEDAD

Responsabilidades indelegables del Estado.

Uso equitativo del agua.

El agua como factor de riesgo.

EL AGUA Y LA GESTIÓN

Gestión descentralizada y participativa.

Gestión integrada del recurso hídrico.

Usos múltiples del agua y sus prioridades.

Unidad de planificación.

Aguas interjurisdiccionales.

Externalidades por el uso o manejo del agua.

Medidas no-estructurales

EL AGUA Y LAS INSTITUCIONES

Autoridad única del agua.

Organizaciones de cuenca.

Organizaciones de usuarios.
Roles del Estado Nacional.
Gestión hídrica con países vecinos.
Continuidad de la política y gestión hídrica.
Consejo Hídrico Federal.

EL AGUA Y LA LEY

El agua como bien de dominio público.
Asignación de derechos de uso del agua.

ORGANIZACIONES DE CUENCAS HÍDRICAS

La Subsecretaría de Recursos Hídricos (SsRH) ha promovido la institucionalización y el fortalecimiento de organizaciones de cuencas interjurisdiccionales, las que tienen por objetivo facilitar la coordinación de la gestión hídrica en las diferentes jurisdicciones.

Se puede definir a los Comités de Cuencas como organismos interestatales, conformados por representantes de las provincias y del estado Nacional, quienes articulan y ejecutan las acciones esenciales para lograr un uso eficiente, racional y responsable del recurso hídrico.

La SsRH promueve la creación de estas organizaciones para facilitar la gestión integrada de los recursos hídricos compartidos. Promueve la cooperación entre instituciones a partir de emprendimientos conjuntos que beneficien a todas las partes. Su finalidad es evitar conflictos mediante la generación de propuestas superadoras para impedir que decisiones no acordadas conduzcan a situaciones de conflicto.

Actualmente existen catorce Comités de Cuencas Interjurisdiccionales en la República Argentina (Fuente: <http://www.hidraulica.gov.ar/>) como se describen a continuación y se representan en la Figura 3.

1. Comité Regional del Río Bermejo.
2. Comité de la Cuenca del Río Juramento.
3. Comité de Cuenca del Río Salí Dulce.
4. Comité de Cuenca de la laguna La Picasa.
5. Comité Interjurisdiccional del Río Colorado.
6. Autoridad Interjurisdiccional de la Cuenca de los ríos Neuquén, Limay y Río Negro.
7. Comité de la Región Hídrica Bajos Submeridionales.
8. Comité Interjurisdiccional de la Región Hídrica del Noroeste de la Llanura Pampeana.
9. Grupo técnico del Río Desaguadero.
10. Comité de Cuenca del río Sengerr.
11. Autoridad de Cuenca del río Azul.

- 12. Comité Interjurisdiccional de la Cuenca del río Chubut.
- 13. Comité Interjurisdiccional del río Pilcomayo.
- 14. Autoridad de Cuenca del río Matanza Riachuelo.

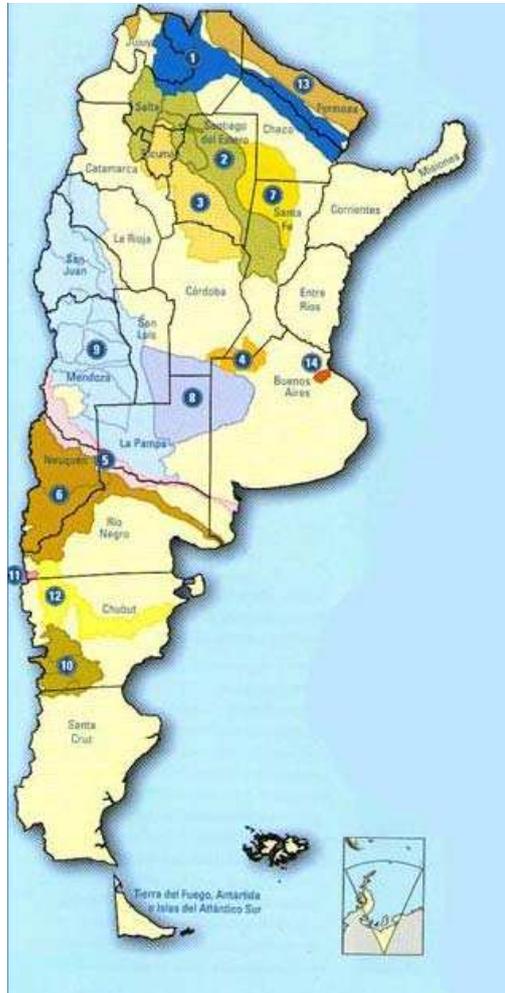


Figura 3. Organizaciones de Cuencas Interprovinciales. Argentina.

Fuente: <http://www.hidraulica.gov.ar/>

LEGISLACIÓN PROVINCIAL

A nivel provincial en la Argentina coexisten tantos regímenes legales como provincias, a lo que debe sumarse la legislación de carácter nacional, la cual resulta aplicable en determinadas jurisdicciones o en actividades específicas como se mencionó anteriormente. No todas las constituciones provinciales contienen conceptos afines con el agua y su relación con el medioambiente. En las constituciones de las provincias de Buenos Aires, Formosa, Jujuy, San Luis, Santiago del Estero, Tierra del Fuego y Ciudad Autónoma de Buenos Aires se hace referencia al derecho de las personas de gozar de ambientes sanos y al deber de conservarlos y protegerlos para su provecho y de las generaciones futuras. Las constituciones de las

provincias de Buenos Aires, Río Negro y Santiago del Estero, así como la de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, mencionan, en distintas formas, la participación pública, ya sea bajo la forma de garantizar el derecho a solicitar y recibir la adecuada información y a participar en la defensa del ambiente (provincia de Buenos Aires), o en la elaboración del Plan Urbano y Ambiental de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, a través de entidades académicas, profesionales y comunitarias, o en su aprovechamiento general, como lo explicitan las provincias de Santiago del Estero y Río Negro (Magnani, 2001).

En cuanto a las leyes dictadas por las provincias, la primera de las leyes de aguas provinciales fue la de Mendoza, sancionada en 1884, creando el Departamento General de Aguas para regular el uso del agua para riego. Las leyes que se dictaron a partir de 1940 trataban sobre los aspectos relacionados a aguas públicas y privadas, superficiales y subterráneas, calidad del agua, poder de policía, concesiones de uso, canon, prioridades, servidumbres, entre otros, y usos prioritarios del agua y su administración. En la década de 1970, se sancionaron leyes de aguas en las provincias de Córdoba y Santiago del Estero, iniciándose así una etapa de leyes modernas sancionadas como códigos. Las provincias de La Pampa, La Rioja, San Juan y San Luis fueron las primeras en promulgar estos códigos. En estas leyes se incluyeron principios de política hídrica y las instituciones adoptadas obedecieron a criterios jurídicos de vanguardia, con enfoque interdisciplinario. La ley de agua argentina más reciente es el Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires, redactado en el año 1999. Estos Códigos recogen conceptos tales como la política y planificación hídrica, emergencias hídricas, áreas de riesgo hídrico, impacto ambiental, concesiones empresarias de obras y servicios relacionados con el agua, registro y catastro de aguas, prioridades de uso más flexibles, comités de cuencas, aguas interprovinciales, protección de fuentes de agua superficial y acuíferos, cuencas hidrográficas como unidades de planificación y administración, entre otros (Magnani, 2001)

Se puede decir que en materia de leyes provinciales, hay provincias que tienen bien desarrollada su normativa y otras que ni siquiera tienen leyes específicas sobre temas que les afectan, tales como promoción de sistemas de riego, organización de usuarios, derechos de agua, tarifas que incluyan un pago adecuado del agua, gestión de acuíferos, etc. En cuanto a la gestión del agua en cuencas, pocas leyes de agua de las provincias se refieren explícitamente al tema. Sin embargo, el Código de Aguas de la Provincia de Buenos Aires (Ley N° 12.257), dedica completamente su Título VIII a los Comités de Cuencas Hídricas y los Consorcios, siendo muy detallado. Por otra parte, algunas provincias han dictado leyes específicas relacionadas con la gestión del agua en cuencas. Es el caso, por ejemplo, de la Provincia de Santa Fe, cuya Ley N° 9830 de 1986 y su Decreto Reglamentario N° 4960 facultan a su Poder Ejecutivo a “disponer la constitución de Comités de Cuenca que actuarán como personas jurídicas de derecho público y a los cuales se les fijará competencia territorial”. También la provincia de Córdoba creó comités en las cuencas de distintos ríos, diques o lagos, mediante una legislación específica. Sin embargo, estos comités no están operativos y su funcionamiento dependerá de un nuevo enfoque de la gestión hídrica en la provincia. En mayo de 2004, la legislatura de la provincia del Chubut sancionó la Ley N° 5178, estableciendo que “el Poder Ejecutivo implementará la creación y funcionamiento de Unidades de Gestión en las cuencas hidrográficas de su jurisdicción, como así también su participación en la de aquéllas que comparte con otras provincias u otro país”, denominando Comité de Cuenca a las respectivas unidades de gestión (Pochat, 2005)

CÓDIGO DE AGUAS DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

El Senado y la Cámara de Diputados de la Provincia de Buenos Aires, sancionaron en el año 1998, con fuerza de Ley, el Código de agua que estableció el régimen de protección, conservación y manejo del recurso hídrico de la Provincia de Buenos Aires. La Autoridad del Agua (ADA) se constituyó a partir de lo establecido en la Ley N° 12.257 o Código de Agua, como entidad de aplicación de las funciones encomendadas al Poder Ejecutivo Bonaerense. El Código de Agua es un instrumento legal que tiene como objeto reglamentar, supervisar y vigilar todas las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación del agua. Para cumplir esa función establecerá las especificaciones técnicas que deberán satisfacer las observaciones y mediciones, la recopilación y publicación de información hídrica, las labores, las obras y la prestación de servicios a terceros. Podrá someter esas actividades a su autorización previa y ordenar la remoción de las obras o cosas ejecutadas en su contravención. Asimismo podrá removerlas cuando la demora en hacerlo pusiese en peligro la vida o la salud de las personas o perjudicase a terceros. (Fuente: <http://www.ada.gba.gov.ar/>)

La Autoridad del Agua (ADA) es un ente autárquico de derecho público y naturaleza transdisciplinaria y cuya organización y funcionamiento se dispone sobre la base de la descentralización operativa y financiera. Para cumplir sus funciones, el ADA y sus agentes autorizados tendrán acceso a la propiedad privada, previo cumplimiento de los recaudos legales pertinentes. En tales supuestos podrá requerir el auxilio de la fuerza pública.

La estructura del mismo se representa (según www.ada.gba.gov.ar) en la Figura 4:



Figura 4. Estructura administrativa de la Autoridad del Agua.

Las atribuciones y funciones de la Autoridad del Agua son las de asistir al Poder Ejecutivo en las siguientes funciones:

1. Formular la política del agua.
2. Decretar reservas que prohíban o limiten usos y la constitución de derechos individuales sobre agua de dominio público.
3. Establecer preferencias y prerrogativas para el uso del agua, privilegiando el abastecimiento de agua potable; alentando criterios de reutilización de agua.
4. Fijar periódicamente por regiones y por categorías de uso, el canon y las contribuciones.
5. Determinar la dotación de agua a acordar a cada categoría o tipo de uso y a cada región.
6. Suspender el suministro de agua para uno o más usos en casos que lo ameriten.
7. Imponer restricciones y limitaciones al dominio privado.
8. Otorgar los derechos y cumplir todas las funciones que el Código le encomienda.
9. Supervisar y vigilar las actividades y obras relativas al estudio, captación, uso, conservación y evacuación del agua.
10. Promover programas de educación formal e informal sobre el uso racional del agua.
11. Coordinar un espacio interinstitucional con los órganos de la Administración Provincial competentes en materia de agua.
12. Dar cumplimiento a la Planificación Hidrológica para satisfacer las demandas de agua.
13. Equilibrar y compatibilizar el desarrollo regional y sectorial.
14. Incrementar la disponibilidad del recurso y proteger su calidad
15. Establecer zonas de reserva.
16. Aplicar defensa contra las inundaciones y sequías.
17. Deberá confeccionar cartas de riesgo hídrico de las zonas que pueden ser afectadas por inundaciones.
18. Deberá prohibir el uso recreativo y el abastecimiento doméstico o el urbano de determinadas aguas en salvaguarda de la salud pública.

El marco jurídico de la Autoridad del Agua está dado por la normativa nacional a través de la Constitución Nacional (Art. 41), el Código Civil (Art. 2.340 inc.3; Art. 2.641), la Ley de Bosques Protectores (Ley 13.273) y el Tratado del Río de La Plata y su frente marítimo (Ley 20.645). La Normativa Provincial está dada por el artículo 28 de la Constitución Provincial y diferentes leyes provinciales.

PLAN DE ORDENACIÓN O MANEJO DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Un enfoque sistémico del concepto de cuenca hidrográfica supera la idea de reducirla a una superficie de convergencia del escurrimiento hídrico superficial ya que considera a todo el complejo biogeomórfico y humano. Bajo esta concepción la cuenca hidrográfica representa un espacio físico tangible que permite la concurrencia integral y multisectorial (actividades económicas y productivas). La misma constituye un instrumento valioso del Estado y la sociedad para administrar su actividad, conciliar intereses económicos y sociales, conservar la biodiversidad y permitir un uso sostenido de los recursos naturales representando a una unidad de planificación y gestión para el Manejo de los Recursos Naturales (Gaspari et al., 2006).

En el estudio y planificación de una cuenca hidrográfica es indispensable la comprensión y aplicación del concepto de estabilidad para el buen uso y manejo de los recursos naturales. En la actualidad la presión del hombre sobre éstos es tan fuerte que su efecto sobre las características del medio pueden, y de hecho hacen, que un ecosistema cambie por completo y su respuesta varíe en perjuicio del hombre. Como ejemplo, se puede citar la zona de Secano Costero árido y semiárido en Chile donde existe una clara tendencia a la disminución de la producción; así, en una primera etapa dominaban grandes bosques que se cosecharon para hacer posible el cultivo de cereales; luego se continuó con ganadería bovina, después ovina y en la actualidad sólo es posible criar caprinos, lo que indica una baja consistente de la producción. El sistema cada vez cambia de una órbita superior a una inferior hasta que, al final, puede llegar a un punto de equilibrio donde la producción es igual a cero pues se ha convertido en una zona desertificada o erosionada a grado máximo. Desde el punto de vista antrópico, antes que el sistema llegue a su última órbita, se clasifica como inestable (Gaspari et al, 2006).

La planificación hidrológica en una cuenca hidrográfica es fundamental conocer el momento y el lugar donde se desarrollará, por ello se debe caracterizar el suelo, la geomorfología, la topografía, el clima, como así también las especies vegetales presentes. El estado de desarrollo de la cobertura vegetal y su manejo, ejercen una influencia fuerte sobre las características hidrológicas.

El desarrollo de un Plan de Manejo de una Cuenca Hidrográfica (MCH) es definido también como Plan de ordenamiento de la cuenca, cuyos objetivos pueden ser: la regulación del régimen hidrológico, el control de la erosión, el control de las inundaciones y la conservación de los recursos naturales, entre otros.

Una de las funciones de un plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas es promover el desarrollo de programas de investigación aplicada y difusión en el ámbito de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas. Además evaluar y monitorear los procesos que inciden en la degradación y funcionamiento de cuencas hidrográficas.

Los objetivos para el MCH son establecidos a partir de los propósitos particulares de manejo de cada cuenca hidrográfica. En la Tabla 4 se expresa una serie de propósitos posibles y los tipos de medidas de ordenación agrohidrológica que recomienda para su atenuación.

PROPÓSITO	DESCRIPCIÓN	TIPOS DE TRABAJO Y MEDIDAS
Manejo de cuencas	Conservación y mejoramiento del suelo, control de erosión, regulación de la escorrentía, control de sedimentos y protección de embalses, mejoramiento de bosques y pastizales. Protección de la calidad del agua.	Corrección de torrentes y regulación de ríos torrenciales. Práctica de conservación de suelos. Pequeños embalses para conservación del agua. Manejo silvo-pastoril.
Uso recreativo del agua	Ofrecer oportunidad de recreación basado en el recurso agua. Prevención o reducción de daños por inundaciones, a obras y actividades. Regulación de ríos, etc.	Embalses, facilidades como parques, muelles, etc.
Control de inundaciones		Diques, presas, muros, mejoramiento hidráulico del cauce, zonificación, medidas de pronóstico.
Irrigación	Producción agrícola.	Diques, presas, embalses, pozos, canales, bombas, obras de drenaje, etc.
Acueductos	Suministro de agua para uso doméstico, industrial, comercial y otros.	Diques, presas, embalses, pozos, red de distribución, bombas, planta de tratamiento, etc.
Drenaje	Producción agrícola. Desarrollo urbano. Protección de la salud pública.	Zanjas, drenajes, muros, estaciones de bombeo, etc.
Piscicultura y vida silvestre	Mejoramiento del hábitat para peces y vida silvestre con propósito de recreación y otros, fomento de la piscicultura como actividad deportiva y comercial. Protección o mejora de la calidad del agua de acuerdo al uso doméstico, industrial, comercial, agrícola, pecuario y hábitat acuático, etc.	Refugios, viveros, escaleras de peces, regulación del régimen, embalses, control de la contaminación, regulación en el uso de la tierra.
Reducción de la contaminación		Planta de tratamiento. Embalse de regulación. Sistema de alcantarillas. Regulación de medidas legales.

Tabla 4. *Objetivos para el Manejo Integral de Cuencas hidrográficas.*

La resolución de problemáticas socio-ambientales, como las mencionadas en la Tabla 1, en cuencas hidrográficas se establece a partir del diseño y diagramación de un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, donde se considera a la cuenca como unidad de planificación y gestión.

A partir del análisis de toda esta temática expuesta, se concluye que MICH debe ser integral desde el ambiente hacia un foco en particular, como se expresa en la Figura 5.

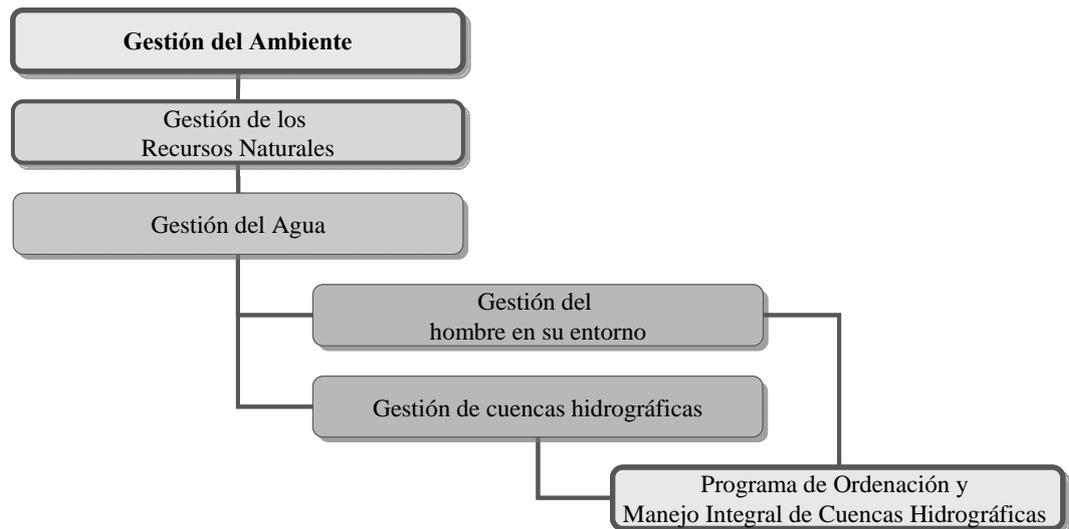


Figura 5. *Secuencia metodológica para el desarrollo de un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas.*

De esta manera se impulsan estudios, planes y proyectos de manejo integral de cuencas hidrográficas y se gestiona y/o ejecutan proyectos de restauración hidrológica en cuencas críticas y prioritarias con fines de uso múltiple.

Un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas gestiona y/o implementa planes, programas y proyectos rurales de conservación de suelos y aguas a nivel de subcuencas y/o microcuencas con el objeto de evitar su degradación y fomentar su recuperación, protección, rehabilitación y uso sustentable. La función de este programa debe ser básicamente:

- ✓ Desarrollar programas de investigación aplicada y difusión en el ámbito de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas.
- ✓ Evaluar y monitorear los procesos que inciden en la degradación y funcionamiento de cuencas hidrográficas.
- ✓ Promover la participación de la población y comunidad local a todo nivel mediante campañas de difusión y sensibilización.
- ✓ Fortalecer una cultura del agua y del suelo en el ámbito del manejo integral de recursos naturales asociados a cuencas.

Dentro del programa se establecen diversas líneas programáticas del manejo integral de cuencas hidrográficas, que pueden expresar: Ordenación territorial, Restauración hidrológica forestal / agropecuaria / otras, Recuperación y conservación de suelos y aguas, Monitoreo de recursos asociados a cuencas hidrográficas, Tratamientos de regulación de flujos hídricos en cauces, entre otros.

Para ello es necesario generar un monitoreo de los factores ambientales y sociales que inciden sobre las cuencas hidrográficas a través de la recolección de datos, en forma continua, en sitios representativos. La información ambiental producida permitirá simular, calibrar y validar diferentes situaciones según las características topográficas, climáticas, edáficas, de cobertura vegetal y de uso del suelo, por ejemplo. Particularmente estas variables se observan con instrumental en estaciones básicas de medición, como ser la Meteorológica y la Limnimétrica. El monitoreo social se puede realizar por medio de encuestas y/o talleres o reuniones con la comunidad participante.

En base a la generación de un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas (MICH), se debe establecer una línea que oriente la temática de

ejecución del mismo. Esta línea temática está establecida a partir de un objetivo y de una metodología.

Los objetivos generales de los proyectos de MICH se generan a partir de una amplia gama de problemáticas particulares, como ser la retención del suelo productivo, el control de la erosión y aprovechamiento de los suelos con usos alternativos, la regulación de las avenidas y su incidencia en la provisión hídrica, la planificación distribución del agua en forma sustentable. Según Mintegui Aguirre y López Unzú (1990), estos objetivos se cumplen mediante diversas actividades técnicas, que se pueden agrupar genéricamente por:

- ordenación de cultivos y el papel de las cubiertas permanentes,
- control del agua vertiente y su incidencia en la atenuación de los procesos erosivos,
- desarrollo de hidrotecnias para la corrección de cauces torrenciales.

En síntesis un Programa de Ordenación y Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas se comprometerá a:

- √ Considerar la cuenca hidrográfica como unidad de planificación y gestión, impulsando estudios, planes y proyectos de manejo integral de cuencas hidrográficas.
- √ Proporcionar y/o implementar planes, programas y proyectos rurales de conservación de suelos y aguas, a nivel de microcuencas, con el objeto de evitar su degradación y fomentar su recuperación.
- √ Desarrollar programas de investigación aplicada y difusión en el ámbito de cuencas hidrográficas y de conservación de suelos y aguas.
- √ Gestionar y/o ejecutar proyectos de restauración hidrológica forestal en cuencas de montaña y/o llanura críticas y prioritarias con fines de uso múltiple.
- √ Evaluar y monitorear los procesos que inciden en la degradación y funcionamiento de cuencas hidrográficas.
- √ Promover la participación de la población y comunidad local a todo nivel mediante campañas de difusión y sensibilización.
- √ Propender a fortalecer una cultura del agua y del suelo en el ámbito del manejo integral de recursos naturales asociados a cuencas hidrográficas de zonas de montaña.

A partir de la aplicación de este tipo de programas se promueve la participación de la población y comunidad local a todo nivel mediante campañas de difusión y sensibilización, fundamentalmente para fortalecer una cultura del agua y del suelo en el ámbito del manejo integral de recursos naturales asociados a cuencas.

El MICH está integrado por: Programas, Subprogramas y Proyectos Específicos. El esquema metodológico se basa en la descripción de los siguientes ítems:

1. RESUMEN. Debe ser breve y explicativo de todo el plan. Está integrado por parte de cada uno de los capítulos. Se elabora al final.

2. INTRODUCCION

- 2.1. Importancia del plan. (económica; social; política; ambiental; recurso suelo; recursos hidráulicos; recurso vegetación; recurso fauna, y recursos turísticos como utilización de embalses y áreas silvestres)
- 2.2. Sectorización de la unidad de planificación
 - 2.2.1. Unidad de planificación. Criterios, cada país debe fijar y definir sus unidades de planificación: político territorial (provincias, departamentos, municipios); político administrativo (región, subregión, áreas demostrativas); geopolíticos (ejes territoriales; ejes de desarrollo), e hidrológicos (cuencas hidrográficas, subcuencas, microcuencas)
 - 2.2.2. Definición de la unidad de planificación: político territorial, político administrativo; geopolítico, e hidrológico (superficie de cuenca-subcuenca-microcuenca; criterios de altitud: cuenca alta o de recepción, cuenca media o garganta y/o cuenca baja o cono de deyección)
 - 2.2.3. Ubicación (Político territorial; Político administrativo; Político hidrológico)
- 2.3. Características del plan de manejo (temporal; espacial; sectorial; escala del plan)
- 2.4. Metodología
- 2.5. Equipo humano e institucional

3. MARCO DE REFERENCIA

- 3.1. Planificación (Relaciones del plan con planes nacionales y regionales; relaciones del plan con las políticas de desarrollo nacional y regional)
- 3.2. Institucional
- 3.3. Jurídico. Relaciones del plan de manejo con leyes, reglamentos y decretos. Enmarcar el plan de manejo en planes regionales y nacionales

4. INVENTARIO

- 4.1. Inventario del recurso suelo y físico conservacionista
- 4.2. Inventario hidrológico: catastro de los recursos hídricos (Disponibilidad); uso actual de los recursos hídricos, y demanda de los recursos hídricos para distintos usos
- 4.3. Inventario socioeconómico: nivel de las comunidades y población total; encuestas
- 4.4. Inventario de infraestructura: productiva; social; conservacionista; industrial; minera; otros
- 4.5. Inventario de fauna: especies; importancia
- 4.6. Inventario de vegetación. No es detallado en cuanto a especies sino a especies dominantes y generadoras de riqueza. Es importante considerar la protección vegetal que brindan: bosque natural ó praderas y cultivos; plantaciones forestales; áreas bajo régimen especial

5. **DIAGNÓSTICO.** El inventario y el diagnóstico siempre van juntos.
 - 5.1. Diagnóstico físico conservacionista y diagnóstico de los conflictos de uso (Comparación entre el mapa de uso actual y potencial).
 - 5.2. Diagnóstico socio-económico. Identificación de factores sociales, económicos y tecnológicos basados en el grado de uso, conservación y deterioro de los recursos naturales renovables y el ambiente. El objetivo del diagnóstico socio económico es establecer las relaciones entre factores sociales, económicos, productivos y ambientales de la cuenca para el uso, conservación y/o recuperación del recurso.
 - 5.3. Diagnóstico de infraestructura. Se establece por medio de determinar el grado de mantenimiento de infraestructura, el uso, conservación y deterioro de los recursos naturales y la definición de los conflictos de uso de los recursos naturales.
 - 5.4. Diagnóstico de fauna, por medio del estado actual de la fauna, uso, conservación y deterioro de especies y conflictos de uso de los recursos naturales
 - 5.5. Diagnóstico de vegetación, establecido por el estado actual, el uso, conservación y deterioro y conflictos de uso. El conflicto de uso establece si el pastizal ó el bosque es utilizado de acuerdo a su capacidad y potencial.
6. **PRIORIDADES.** En base a los inventarios y diagnósticos de toda la cuenca se establecen las subcuencas y microcuencas prioritarias.
7. **OBJETIVOS.** Están relacionados con los objetivos de los programas y subprogramas del plan de manejo. El Objetivo general es ordenar los recursos naturales renovables y administrar bien esos recursos
8. **PROGRAMAS Y SUBPROGRAMAS:** programa de infraestructura; programa de administración del ambiente; programa de ordenamiento; programa de investigación y capacitación. Por ejemplo, programa de infraestructura cuyo subprogramas pueden ser conservación de suelos y aguas, reforestación, control de torrentes, infraestructura social conservacionista. Este está integrado a un programa administración del ambiente cuyo subprograma se basa en mapa síntesis, administración recurso suelo, administración recursos hídricos, Administración del recurso fauna, Administración del recurso vegetal.
9. **MARCO FINANCIERO.** Se establecen metas físicas y financieras de cada programa y subprograma. Cuanto existe de cada recurso y que meta se llegará. Quién financia y cuando cuesta cada programa y subprograma.
10. **FACTIBILIDAD.** Se establece la factibilidad física y financiera de cada programa y subprograma. Pueden no existir suficientes fondos ó recursos humanos en algún programa.
11. **JUSTIFICACIÓN.** Se establece la justificación de cada programa y subprograma desde el punto de vista económico, social, político, cultural y ambiental.

12. **ESTRATEGIA.** Se establece la forma y los mecanismos para hacer las cosas. Quién las hará (Instituciones). Cada programa tiene su propia estrategia.
13. **EVALUACIÓN.** Esta etapa puede ser de índole física, económica: relaciones costos/beneficios, social (beneficios sociales, algunos intangibles), impacto ambiental: impacto de obras de ingeniería (presas, carreteras) sobre el ambiente.
14. **CONTROL.** Se establecen mecanismos de control sobre cada programa para verificar se implementación y el cumplimiento de las etapas.
15. **BIBLIOGRAFÍA**
16. **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.** Están referidas al plan de manejo en sí y son de tipo institucional. Por ejemplo se recomienda que la secretaría de agricultura ó la universidad organicen seminarios ó cursos de capacitación.

Las principales líneas programáticas desarrolladas mundialmente en la actualidad son: la ordenación territorial, la restauración hidrológica forestal, la recuperación y conservación de suelos y aguas y el monitoreo de recursos asociados a cuencas hidrográficas, entre otras.

Ejemplo de aplicación.

Las actividades a desarrollar se basan en generar un conjunto de pautas generales para la elaboración de proyectos de manejo integral de cuencas hidrográficas (MICH) que se desarrollarán durante todo el curso.

El marco conceptual e integrador de los conocimientos universitarios adquiridos de un profesional, permite desarrollar una capacidad cognitiva para elaborar, promover, implementar y controlar la producción de planes originales de MICH adecuados a las condiciones reales (características ambientales, culturales, sociales y económicas) y a las necesidades de las instituciones públicas y privadas.

Por medio del presente ejercicio de aplicación, se plantea lograr la integración y aplicación de todos los conocimientos básicos y prácticos, proporcionando un entrenamiento en la temática de manejo y gestión de cuencas hidrográficas. De esta manera, se pretende desarrollar su capacidad crítica y mentalidad interdisciplinaria, avanzando a nivel conceptual, metodológico e instrumental en la comprensión del sistema de la cuenca y sus interrelaciones, con el fin de poder abordar problemáticas diversas, con determinados grados de complejidad, y dar respuestas creativas.

A nivel metodológico, se persigue lograr un entrenamiento por medio de un proceso ordenado y racional que le permita: a) analizar e identificar las diferentes problemáticas; b) definir posibles alternativas en función de los requisitos propios de cada caso; c) seleccionar las alternativas que mejor respondan a la solución de la situación particular, las secuencias de aplicación y los cambios esperados.

Para ello se presenta a continuación la secuencia metodológica para lograr elaborar un proyecto de MICH, a partir de un diagnóstico que se desarrollará durante la cursada de Manejo de Cuencas Hidrográficas.

1. Diagnóstico actual en base a antecedentes bibliográficos, cartográficos y estadísticos, con material disponible (bibliografía censos, cartografía, fotografías aéreas, imagen satelital), donde se identificará y caracterizará la cuenca hidrográfica, según los siguientes criterios: Marco socio-económico, Clima, Red hidrográfica, Geomorfología y litología, Topografía, Suelo, Vegetación – Fauna - Uso de la tierra, Paisajes erosivos.
2. Realización de un análisis morfométrico de la cuenca seleccionada.
3. Análisis hidrológico de la relación de la precipitación – escorrentía - caudal en función de las diferentes condiciones ambientales.
4. Aplicación de un Modelo Hidrológico para la determinación de caudales Líquidos (de escorrentía y avenida).
5. Creación del modelo cartográfico digital para el MICH y delimitación de subcuencas como U.M.G..
6. Procesamiento geoespacial para la zonificación del escurrimiento.
7. Cuantificación de los caudales sólidos emitidos en una cuenca a nivel anual y para una tormenta crítica.
8. Zonificación de áreas críticas según erosión hídrica superficial.
9. Generación de una Matriz FODA para la definición de propuesta de MICH.
10. Definición de medidas de restauración hidrológica para el manejo de una subcuenca hidrográfica a nivel de detalle.
11. Simulación espacio – temporal (a 10 años) de la respuesta de la cuenca a la aplicación de las medidas agrohidrológicas propuestas.
12. Comparar los resultados alcanzados en el punto 11, con la situación de la evolución a 10 años de la cuenca seleccionada sin la aplicación de dichas medidas.
13. Discusión de los resultados comparativos alcanzados.
14. Justificación del MICH.

ELEMENTOS DE HIDROLOGÍA

CICLO HIDROLÓGICO

El funcionamiento de una cuenca se basa en los principios del ciclo del agua y sus relaciones con el suelo, la cobertura y uso de la vegetación, la topografía y el agua, en tiempo y espacio. Debido a ello, al estudiar una cuenca hidrográfica se analiza y trata de describir el comportamiento del agua superficial.

El conocimiento particular del movimiento del agua en una cuenca permite organizar, ordenar y planificar la misma. Por ello la caracterización del ciclo hidrológico generará un diagnóstico básico para todo estudio en esta unidad hidrológica. La Figura 6 representa un esquema general del ciclo hidrológico, indicando la proporción media global entre los diferentes procesos, tomando como referencia la precipitación de la tierra igual a 100, según Chow et al.,(1994).

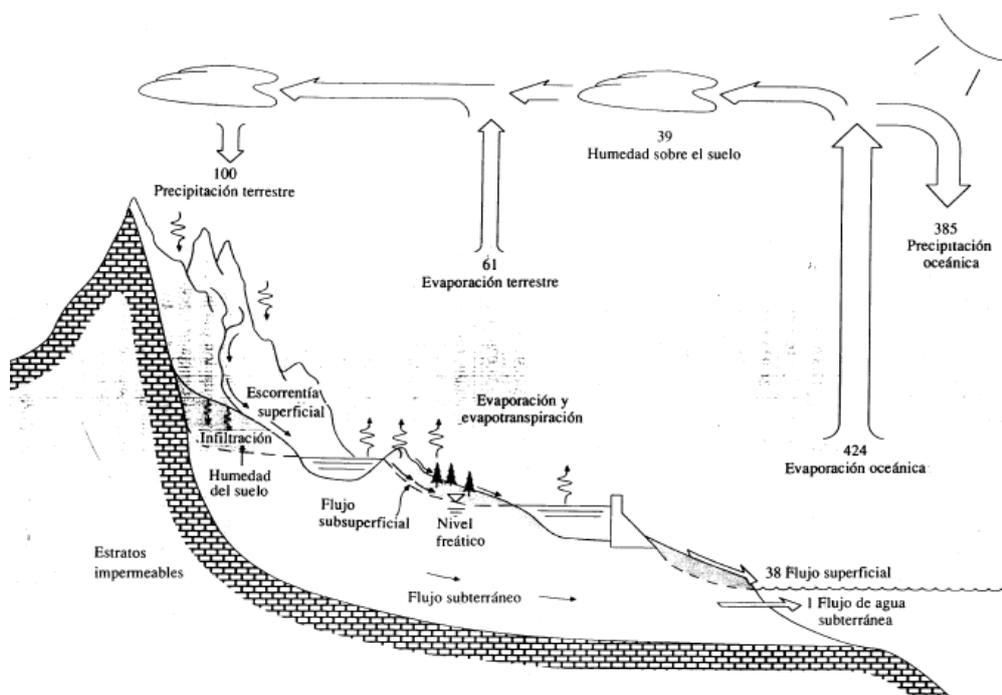


Figura 6. Esquema general del ciclo hidrológico según Chow et al (1994)

El ciclo hidrológico no es homogéneo en todas las partes de la cuenca hidrográfica. Hay áreas que al inicio de la precipitación no aportan flujo de agua y viceversa. Además el agua puede cambiar el modo de circulación de horizontal a vertical, recíprocamente, antes de alcanzar el cauce ó la salida de la cuenca.

El ciclo se basa en una entrada principal, la precipitación (P), y salidas de agua como ser la evaporación del suelo y de cuerpos de aguas (si estos existieran), la evaporación - transpiración de las plantas o evapotranspiración (Ev) como agua que regresa a la atmósfera, la que ingresa al suelo (Infiltración y Percolación) y el escurrimiento (E), que se encuentran en movimiento casi continuo en las capas horizontales del suelo.

Los componentes principales del ciclo en una cuenca hidrológica son ilustrados por la ecuación del balance hídrico (Ward y Robinson, 1990) (Ecuación 1).

$$P = ET + Q + \Delta S + \Delta G$$

Ecuación 1

Donde:

P: Precipitación

ET: Evapotranspiración

Q: Caudal de escorrentía

ΔS: Cambio en el almacenamiento de agua en el suelo

ΔG: Cambio en almacenamiento de aguas subterránea (freática)

Con todos los valores expresados en mm de agua por unidad de tiempo (día, semana, mes o año).

Un simple balance de agua, como lo expresa la ecuación 1, permite la estimación de las necesidades de agua de la vegetación, logrado a partir del monitoreo de las variables relevantes del sistema o ciclo. En la actualidad se dispone de gran número de métodos de balance hidrológico, pero hay que recordar que la técnica es útil a nivel local.

En la Figura 7 se presenta un diagrama de las variables que integran el ciclo hidrológico donde se visualizan la dirección y sentido de la dinámica mencionada para una tormenta (P).

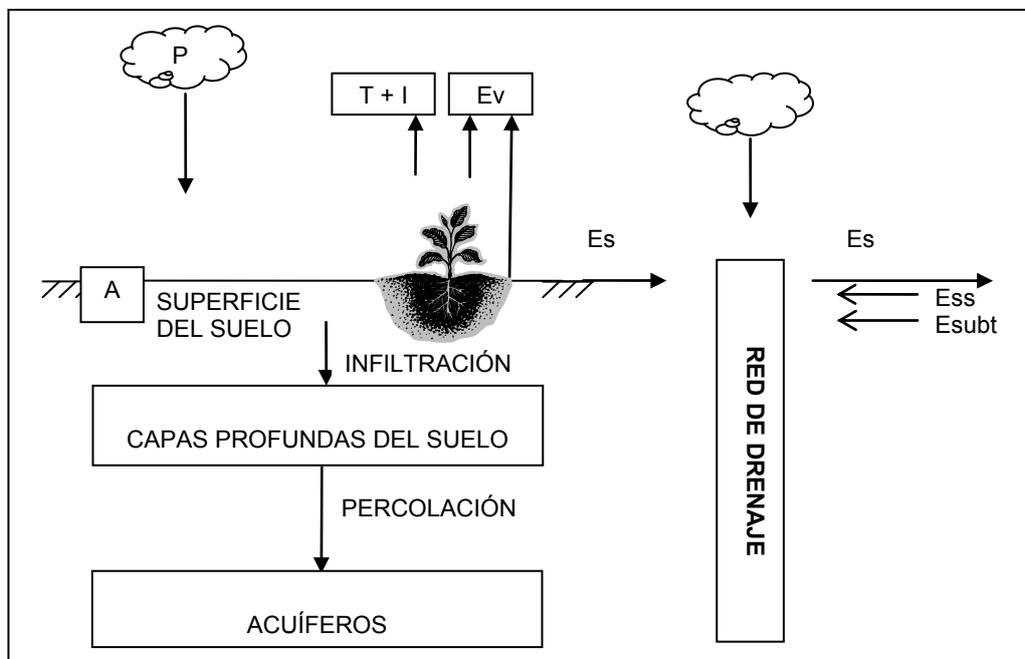


Figura 7. Diagrama del ciclo hidrológico.

Siendo:

P: Precipitación

Ev: Evaporación - Evapotranspiración

<i>T:</i>	<i>Transpiración</i>	<i>Es:</i>	<i>Escurrimiento superficial</i>
<i>I:</i>	<i>Intercepción</i>	<i>Ess:</i>	<i>Escurrimiento sub-superficial</i>
<i>A:</i>	<i>Almacenamiento</i>	<i>Esubt:</i>	<i>Escurrimiento subterráneo</i>

La red de drenaje, permanente o temporal, está generada por el escurrimiento que fluye por las laderas hasta el canal (cauce) en forma conjunta con el agua de la capa freática que sale a superficie, hacia la desembocadura de la cuenca hidrográfica.

COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO

A continuación se presenta una breve descripción de cada elemento constitutivo del ciclo hidrológico.

• Precipitación sobre el cauce.

La Precipitación que cae directamente sobre el curso de agua es la primera en formar el escurrimiento de la cuenca y en llegar a la salida. La cantidad de agua de aporte es pequeña al inicio y va aumentando a través del tiempo y durante la tormenta, debido a que aumenta la superficie de captación del cauce.

• Intercepción por la vegetación.

Una pequeña parte de la lluvia llega hasta el suelo como precipitación interna entre las plantas y escurrimiento por los tallos. Una porción sustancial es interceptada por el dosel de la vegetación, la cual se puede evaporar hacia la atmósfera durante e inmediatamente después de la precipitación; el resto alcanza la superficie del suelo como goteo de la copa.

La intercepción por la vegetación es alta al inicio de la lluvia (vegetación seca) y va disminuyendo con el tiempo hasta un valor constante mínimo, equivalente a la pérdida de agua por evaporación desde el follaje. La influencia de la vegetación y uso del suelo es un factor importante a considerar debido a que la misma actúa como “filtro” en el ciclo hidrológico. Debido a que la precipitación interna y el goteo de la copa no se pueden determinar directamente en el campo, las dos se toman usualmente como una sola variable y se denominan precipitación interna.

• Infiltración - Percolación.

El agua que alcanza al suelo a partir de una precipitación, puede ser infiltrada y/o puede ser almacenada en el suelo para posteriormente percolar como agua gravitacional a capas edáficas más profundas. Es decir, si totalidad de la precipitación interna y el traslado por los tallos y hojas llegan al piso del bosque y exceden la capacidad de infiltración edáfica, el exceso de agua que no es absorbida por el suelo, genera el escurrimiento directo. El agua almacenada en las capas superficiales del suelo es máxima al inicio de la lluvia (suelo seco) y disminuye con el tiempo.

- **Almacenamiento en depresiones.**

Es máxima al inicio de la lluvia (depresiones del terreno vacías) y disminuye con el tiempo hasta un valor mínimo y constante (infiltración y evaporación).

- **Evapotranspiración (ET)**

El agua infiltrada puede ser absorbida por la vegetación y retorna a la atmósfera por procesos de transpiración (T). El término evapotranspiración (ET) se aplica para denominar la suma de la transpiración de la vegetación y pérdida por evaporación de la superficie expuesta de un dosel húmedo. La evaporación de la hojarasca y la superficie del suelo en bosques húmedos tropicales son usualmente despreciables.

La ET se puede cuantificar por medio de las Ecuaciones 2 y 3.

$$ET = Et + Ei + Esu$$

Ecuación 2

Donde:

Et: Transpiración

Ei: Evaporación del agua interceptada por el dosel de la vegetación (Ecuación 111)

Esu: Evaporación del suelo

$$Ei = P - (Tf + Sf)$$

Ecuación 3

Donde:

Tf: Precipitación interna

Sf: Esguerrimiento por el tallo

- **Esguerrimiento.**

El flujo de agua de lluvia que cae sobre un suelo ya saturado y circula en forma laminar y descendente por las laderas de una cuenca hidrográfica se denomina esguerrimiento.

El esguerrimiento total es el definido por la Ecuación 4.

$$E_{total} = PD + Es + Ess + Esubt$$

Ecuación 4

Donde PD es el agua interceptada en el curso, es decir la precipitación directa.

Teniendo en cuenta que E total se forma a partir de la sumatoria de diferentes movimientos cuasi horizontales del agua, se detallan a continuación cada uno de ellos.

Escorrimento superficial (Es)

El flujo superficial de saturación (Es) o escurrimiento superficial es causado por una lluvia que cae sobre un suelo ya saturado. Esto ocurre típicamente sobre las pendientes de colinas o cerca a una banca de la corriente, en las cuales el suelo se satura desde abajo por el flujo subsuperficial y así mantiene condiciones cercanas a la saturación. Adicionalmente, el flujo superficial, puede ser observado durante y después de un aguacero intenso hasta encontrarse una capa impermeable cercana a la superficie (Bonell y Gilmour, 1978).

Cuando se inicia una tormenta, primero se satura la vegetación y el escurrimiento es nulo. Este va en aumento hasta alcanzar un porcentaje en relación a la intensidad de la lluvia que es constante. Tanto el porcentaje como la intensidad del escurrimiento derivan de la intensidad de la lluvia. El escurrimiento se inicia cuando el suelo y la vegetación están saturados o cuando la intensidad de la lluvia es muy superior a la intensidad o capacidad de la infiltración y además la generación de escurrimiento depende de que antes se complete el agua de almacenamiento superficial.

En la Figura 8 se presenta la dirección del escurrimiento superficial sobre las laderas en una cuenca de montaña, determinada por la dirección de pendiente del terreno, sin considerar la influencia directa que puede tener la cobertura vegetal.

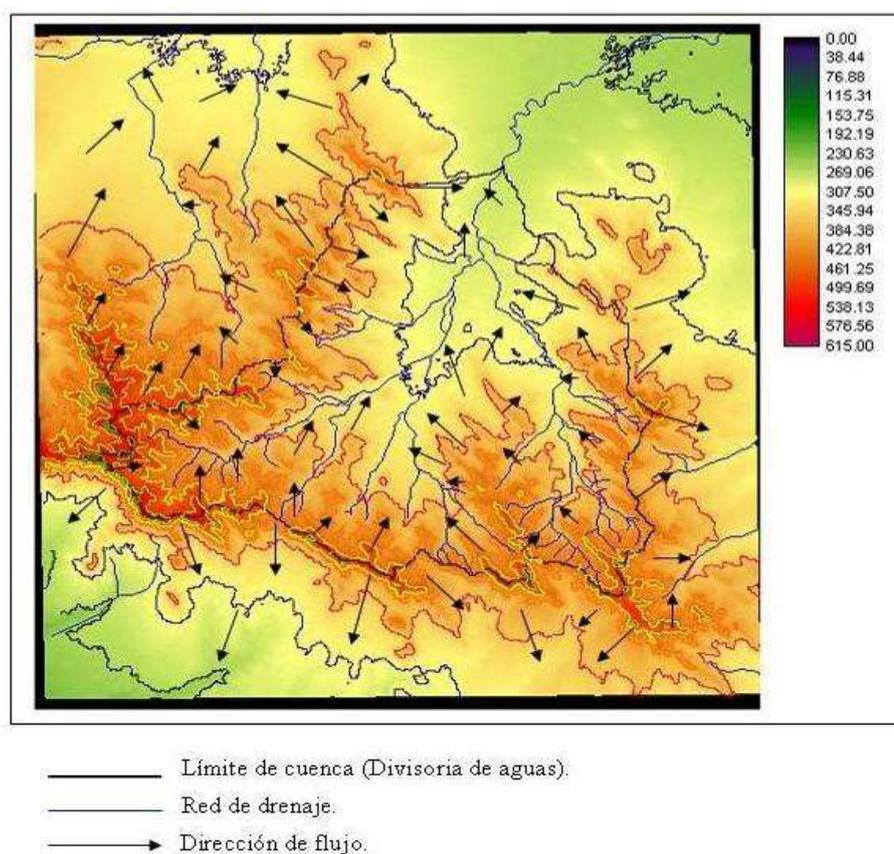


Figura 8. Dirección del flujo escurrimiento superficial.

Escorrimento subsuperficial (Ess)

Sampurno Bruijnzeel (1997) expresa que durante un aguacero el agua que se infiltra puede tomar diferentes rutas hacia el canal de drenaje, dependiendo de la

conductividad hidráulica del suelo, de la pendiente y de la distribución espacial de la humedad del mismo (Dunne, 1978).

El flujo subsuperficial de saturación (Ess) frecuentemente representa una mezcla de aguas antiguas (el agua que existe antes de empezar la lluvia) y el agua nueva que viaja rápidamente a través de “macroporos y conductos de flujos preferenciales” (Bonell y Balek, 1993).

Escorrimento subterráneo (Esubt)

La humedad que permanece en el suelo drena hacia la red hídrica por flujo subsuperficial. De la misma manera lo realiza el agua que percola dentro del suelo hasta una capa impermeable del material parental drenando como flujo lateral. Tal cantidad de agua drena lenta y continuamente, siendo contabilizada para el flujo base de las corrientes (Ward y Robinson 1990).

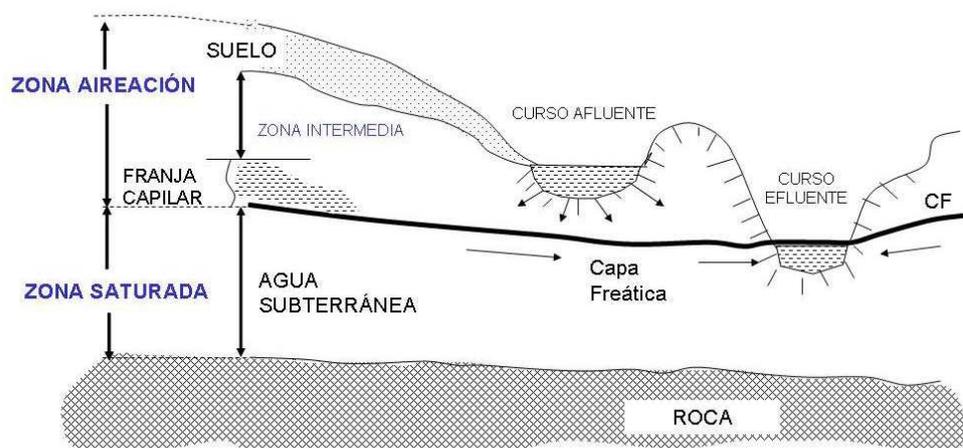
Este tipo de escurrimiento que es nulo al inicio del ciclo y llega mucho más tarde al curso de agua, depende de que el acuífero corte al curso en algún punto de su recorrido, se denomina escurrimiento subterráneo (Esubt).

MOVIMIENTO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En la Figura 9 se ilustra una sección esquemática de un perfil de un curso de agua, donde se indica el movimiento del agua subterránea de la capa freática, no necesariamente de escurrimiento.

En la misma se visualiza el contacto y aporte hídrico de un acuífero o capa freática con la superficie del suelo, generando una corriente de agua permanente la cual denomina al curso efluente. Esta cantidad de agua conforma el flujo base.

En el caso de que el nivel hidrostático o capa freática no alcance el nivel del suelo se trata de una corriente o curso afluente, es decir un curso de aguas transitorio, siendo su carga principal el agua de escurrimiento superficial, subsuperficial o una lluvia.



Zona aireación: sobre NF. Poros con aire o agua

Zona saturada: debajo NF. Poros están saturados por agua

Figura 9. Movimiento del agua en profundidad.

CÁLCULO DE LA DESCARGA INSTANTÁNEA.

Como un resultado de contribuciones de los diferentes tipos de escurrimientos, la cantidad de agua que lleva la corriente o que fluye de un manantial o fuente se denomina caudal. El mismo se incrementa rápidamente durante un aguacero. Este incremento hídrico se denomina frecuentemente flujo de avenidas, y es el generado por una lluvia en el caso por encima de los niveles de flujo base.

La descarga máxima se denomina comúnmente “flujo o caudal al pico” y se puede alcanzar durante el mismo aguacero o pocos días después dependiendo de las características de la cuenca y de la humedad, como también de la duración, intensidad y cantidad de la lluvia (Dunne, 1978).

La forma más sencilla para su cálculo es el Método Racional, por medio de la Ecuación 5 (www.met.ed.ucar.edu) que expresa el caudal pico instantáneo que se determina en un instante determinado.

$$Q_p = C \times I \times A$$

Ecuación 5

Donde:

Q_p: Caudal Pico Instantáneo (m³/s)

C: Coeficiente de escorrentía adimensional por uso del suelo (Tabla 5);

I: Intensidad media de la lluvia (mm/hora);

A: Área (hectáreas).

Uso del suelo	Coeficiente C (Adimensional)
Comercial - Urbana	0,70 a 0,95
Residencial	0,60 a 0,80
Residencial y comercial	0,50 a 0,70
Industrial	0,55 a 0,85
Urbanización rural	0,25 a 0,40
Plazas	0,20 a 0,35
Parques hasta cementerios	0,10 a 0,25
Bosques en buenas condiciones	0,10 a 0,15
Cultivos en buenas condiciones	0,40 a 0,45

Tabla 5. Coeficientes de escorrentía adimensional por uso del suelo (C).

El volumen total de agua producida como caudal o gasto de la cuenca, en un período de tiempo dado (usualmente una tormenta, un mes, estación o año) se denomina “rendimiento hídrico” y se puede expresar en diferentes unidades de medida, como ser (m³.seg⁻¹.km⁻²) – (litro.(seg.ha)⁻¹) – (mm.hora⁻¹).

El movimiento del agua para originar el caudal queda expresado por el flujo superficial (**escurrimiento directo**) generado por el afloramiento de agua desde el flujo subsuperficial y la acción del nivel freático (**caudal de avenida**). La integración del agua de escurrimiento más la del flujo por nivel freático, a la salida de la cuenca, determina el caudal (q).

El caudal específico ó rendimiento (Q_e), expresa la relación de caudal por unidad de área de la cuenca (Ecuación 6).

$$Q_e = q \cdot A^{-1}$$

Ecuación 6.

Siendo:

Q_e : Caudal específico ó rendimiento hídrico ($m^3 \cdot (s)^{-1} \cdot (km)^{-2}$)

q : Caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

A : Superficie de la cuenca (km^2)

La determinación de caudales líquidos permite cuantificar el volumen de agua que aporta una cuenca hidrográfica y la cantidad de agua disponible para diversos usos ambientales, por ejemplo aprovechable para riego, agua potable, agua industrial, turismo y actividades recreativas.

En síntesis, el rendimiento hídrico de una cuenca frente a una lluvia, está dado por el caudal de escurrimiento (cantidad y régimen) y su variación a través del tiempo, que se expresa en un gráfico de doble eje, denominado hidrograma.

SIMULACIÓN DE LA RESPUESTA DE UNA CUENCA ANTE UNA LLUVIA

Hewlet (1982) ha generado un diagrama de la respuesta hidrológica de una cuenca para la precipitación media anual de un sitio ideal (Gaspari et al, 2009). La Figura 10 presenta dicho diagrama del ciclo hidrológico, expresando la distribución en porcentaje e indicando la asignación de la precipitación media anual según tiempo y permanencia del agua en la cuenca hidrográfica.

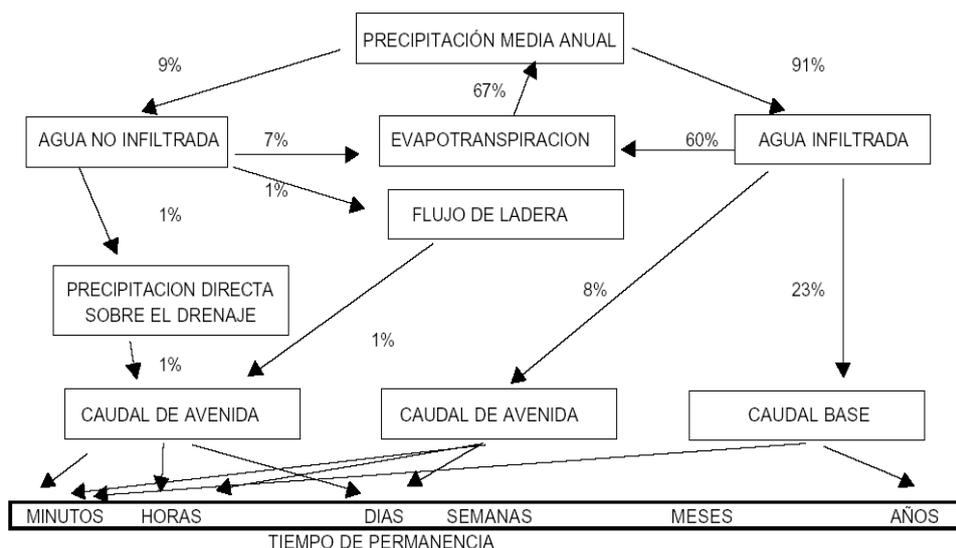


Figura 10. Diagrama de Hewlet para un sitio ideal (1982).

Según Gaspari et al (2009), a partir del diagrama de Hewlet, se puede observar el recorrido y dinámica del agua de lluvia al caer una tormenta en una cuenca, donde se identifica que los caminos son muy variados y que la distribución, velocidad y tiempo de llegada del agua a la salida de la cuenca son muy diversos. Debido a ello, se afirma que el movimiento del agua es tan complejo (suelo – vegetación – pendiente) que la respuesta hidrológica de la cuenca frente a una tormenta, también lo será. Según Linsley et al.,(1993) si cambian estos supuestos cambia la respuesta.

En bosques naturales y plantaciones maduras, Sampurno Bruijnzeel (1997) argumenta que los grandes cambios de la hidrología asociados con la conversión de una a otra se pueden esperar durante los primeros 1 a 3 años después de aclarar el bosque y replantar, esto es en la fase de establecimiento. Los primeros 6 a 12 meses de esta fase son particularmente críticos, pues la mayor parte de la superficie del suelo va a estar expuesta. Otros autores mencionan que la influencia de la superficie boscosa en una cuenca se relaciona directamente con el coeficiente de escurrimiento superficial.

En la Figura 11 se presenta un diagrama de flujo hídrico generalizado en un bosque.

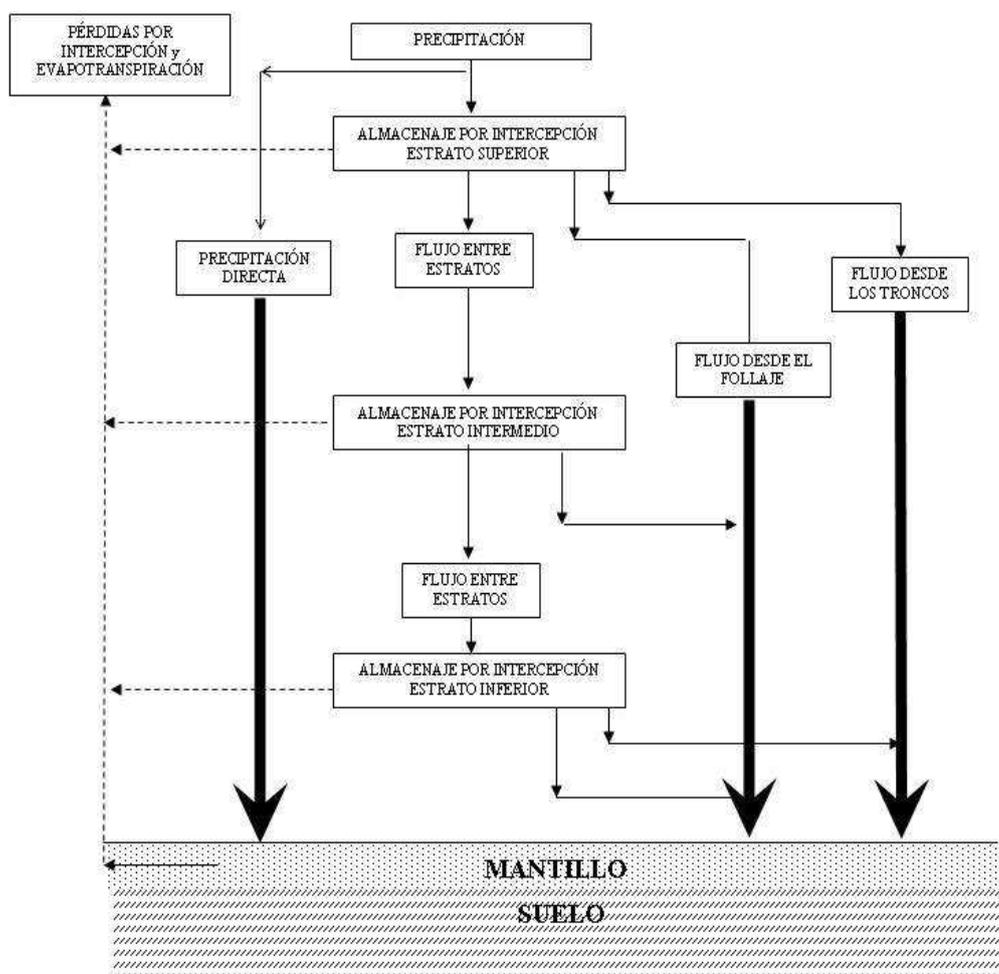


Figura 11. Diagrama de flujo del proceso de intercepción forestal.

En la Figura 12 se presenta las diferencias porcentuales de la intercepción en relación a la lluvia caída para diferentes especies forestales.

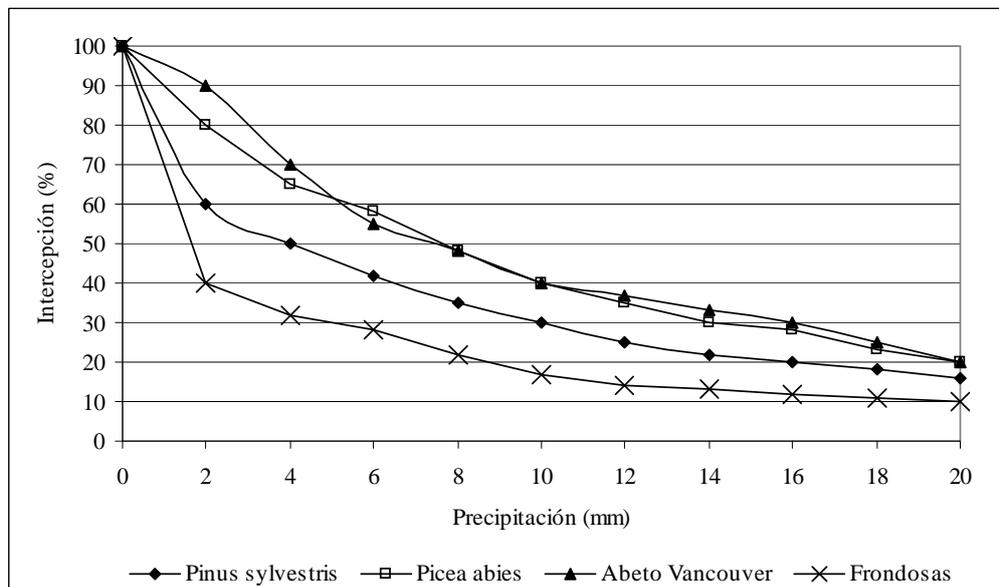


Figura 12. Relación porcentual entre precipitación – intercepción en especies forestales.

El incremento en el rendimiento hídrico de la cuenca tiende a ser más alto, usualmente hasta que el dosel de copas de la plantación se cierre, pero la información en este aspecto es escasa. Además no existen evidencias para afirmar que el consumo de agua de las plantaciones excede al de los bosques naturales.

Por otra parte, existen testimonios de que la plantación de especies de rápido crecimiento en áreas de potreros llevará a disminuir fuertemente el flujo superficial después de que las copas se cierren, particularmente en la época de la estación seca. Los incrementos en el consumo del agua anual que exceden 500 mm han sido reportados después de la forestación de sabanas subtropicales.

Está demostrado que la remoción de la cobertura vegetal para establecer una nueva plantación reduce temporalmente la evapotranspiración y por tanto se incrementa el rendimiento hídrico de la cuenca.

La dinámica del agua en cualquier tipo de ambiente presenta diversos caminos de circulación, siendo alguno de rápido efecto y otros cuya respuesta es muy lenta.

El Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) a través del programa Agua y Educación para las Américas, y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (U.S. Geological Survey) generó una ilustración integradora de la dinámica espacio temporal del agua que ingresa al subsuelo, la cual puede tardar en trasladarse miles de años, como se presenta en la Figura 13, la cual fue extraída de la USGS, en la siguiente web: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.



Figura 13. *Dinámica hidrológica subterránea temporal.*

Una porción de la precipitación que cae sobre la tierra, se infiltra en el suelo y pasa a formar parte del agua subterránea. Una vez en el suelo, parte de esta agua se mueve cerca de la superficie de la tierra y emerge rápidamente siendo descargada en los lechos de las corrientes de agua, pero debido a la gravedad, una gran parte de ésta continúa moviéndose hacia zonas más profundas.

Como muestra este diagrama, la dirección y velocidad del movimiento del agua subterránea están determinadas por varias características del acuífero y de las capas confinadas del suelo (donde el agua tiene dificultad en penetrar). El movimiento del agua por debajo de la superficie depende de la permeabilidad (que tan fácil o difícil es el movimiento del agua) y de la porosidad (la cantidad de espacio abierto en el material) de la roca subsuperficial. Si la roca permite que el agua se mueva de una forma relativamente libre dentro de ella, el agua puede moverse distancias significativas en un corto período de tiempo. Pero el agua también puede moverse hacia acuíferos más profundos, desde donde demorará años en volver a ser parte del ambiente.

MORFOMETRÍA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS.

El funcionamiento de una cuenca se asemeja al de un colector que recibe la precipitación y la convierte en escurrimiento, dependiendo de las condiciones climáticas y las características físicas de la cuenca. Desde este punto de vista, una cuenca hidrográfica se puede caracterizar por su morfología, por la naturaleza del suelo y por la cobertura vegetal y uso del suelo (Henaó, 1988; Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990; Gaspari, 2002; Gaspari et al, 2009). La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escurrimiento es fácilmente intuible cualitativamente mediante parámetros sencillos, susceptibles de servir de referencia, en la clasificación de cuencas y de facilitar los estudios de semejanza (López Cadenas de Llano, 1998).

Las propiedades morfométricas de una cuenca hidrográfica proporcionan una descripción física - espacial que permite realizar comparaciones entre distintas cuencas hidrográficas. Al mismo tiempo, ofrecen conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio a partir de la descripción precisa de la geometría de las formas superficiales.

La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional con la posibilidad de cosecha hídrica, ante eventos climáticos, y con la generación de una respuesta a los mismos, como ser la escorrentía superficial, expresada en términos de caudales, la incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes, a lo largo de los ecosistemas que la integran.

En la actualidad, herramientas metodológicas tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de las redes de drenaje.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

El análisis de las características morfométricas y funcionales de una cuenca hidrográfica a través de parámetros de forma, relieve y red de drenaje, es básico en la modelación hidrológica para determinar el movimiento y captación del agua de lluvia (Gaspari et al, 2009).

Considerando que, desde el punto de vista hidrológico se define cuenca hidrográfica como el territorio que ocupa el río principal y sus afluentes, cuyos límites (LC) son definidos por la topografía del terreno a partir de la divisoria de aguas topográfica. Esta divisoria de agua engloba en un mismo territorio a las vertientes o laderas (desde las cabeceras de cuenca y subcuencas hasta las cercanías del curso de aguas), a la llanura aluvial (rodeando al río y su cauce en todo su recorrido) y al río propiamente dicho (Figura 14).

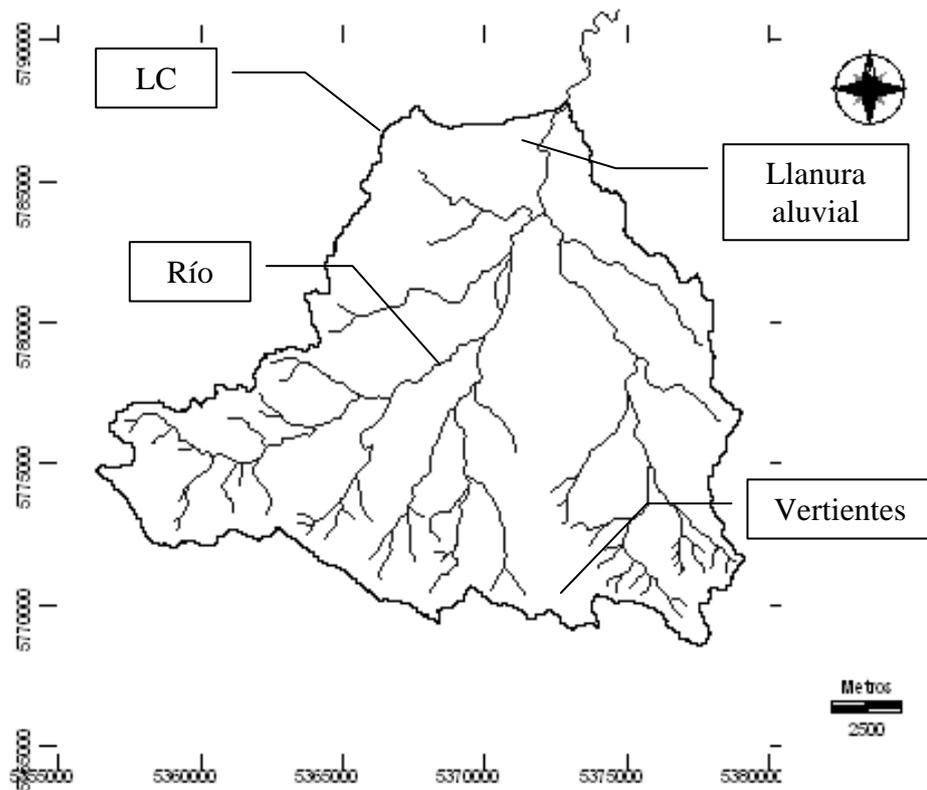


Figura 14 Delimitación de una cuenca hidrográfica (LC) con su red de drenaje y partes principales.

El cauce o lecho de un río es el canal natural por el que circulan las aguas generadas dentro de la cuenca hidrográfica.

El perfil longitudinal del cauce describe la forma en el que éste varía su cota a lo largo de su longitud y recorrido; de tal modo que refleja la pendiente, determinando su inicio desde las condiciones impuestas por el tramo superior aguas arriba hasta su desembocadura, en el punto de contacto con otro cauce, lago o laguna. La representación gráfica de este tipo de perfil expresa la capacidad erosiva del río por medio de la relación entre la distancia recorrida desde su nacimiento y la altura relativa de cada punto de dicho perfil. Cabe mencionar que el perfil longitudinal y el mapa topográficos son descripciones continuas de la superficie.

El perfil transversal se define como un corte tangencial del cauce del río indicando como límites – extremos el inicio de la planicie de inundación de cada lado del cauce.

En la Figura 15 se presenta un esquema de los perfiles longitudinal y transversales en una cuenca hidrográfica, indicando la posición de cada uno de ellos y la gráfica que genera la representación de las cotas a través de los perfiles. Además se marca la ubicación de los cauces (principal y temporarios) que corta cada transecta, sobre el relieve expresado por cada perfil.

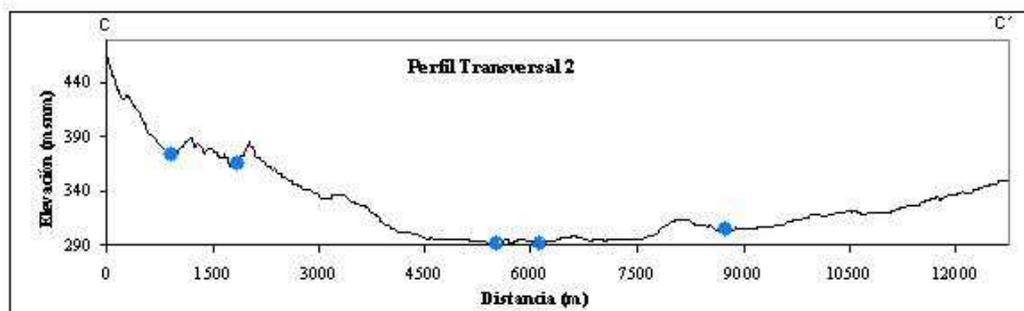
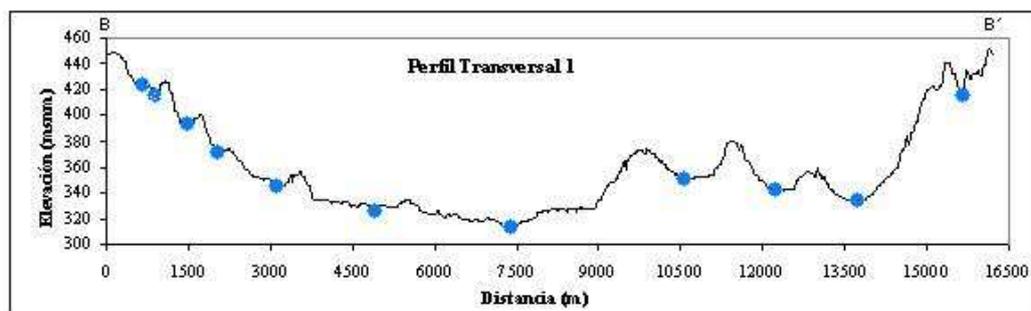
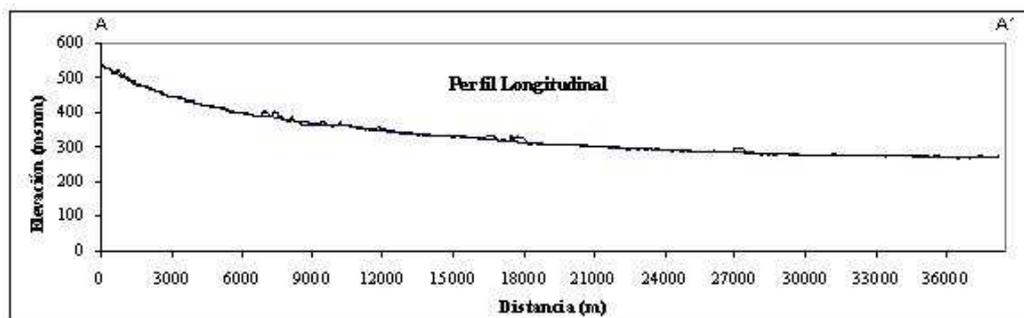
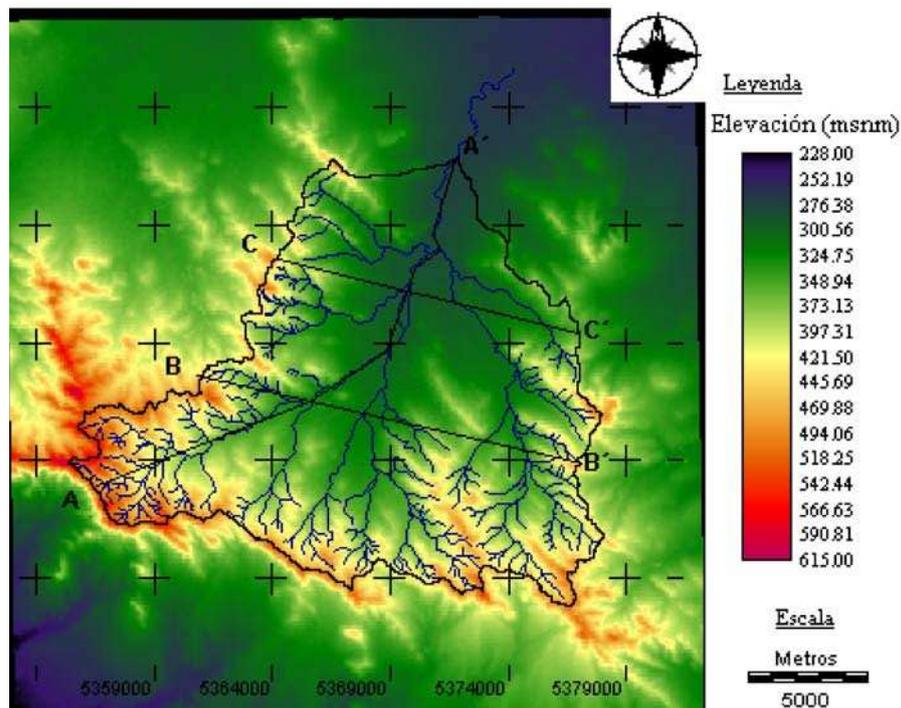


Figura 15. Perfiles longitudinal y transversales. Ubicación y gráfico de relieve, con la ubicación de los cauces.

Otros indicadores morfométricos destinados a determinar la influencia de los límites de la cuenca en relación al movimiento y captación del agua de lluvia, se engloban en los parámetros de forma, relieve y de la red de drenaje (López Cadenas del Llano, 1998).

Parámetros de forma.

Perímetro (P) (km). Es la medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas.

Longitud Axial (La) (km). Es la distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el mismo eje de la cuenca.

Área (A) (km²). Es la superficie encerrada por la divisoria de aguas. Su unidad de medida es kilómetro cuadrado.

Ancho promedio (Ap) (km). Es la relación entre la superficie de la cuenca con La.

Factor de forma (IF). Este factor adimensional que indica como se regula la concentración del escurrimiento superficial. Se expresa como el cociente entre el ancho promedio de la cuenca (Ap) y la longitud axial (La) o longitud del río desde su punto más alto (López Cadenas de Llano, 1998).

Manifiesta la tendencia de la cuenca hacia las crecidas. Cuando IF es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada. La cuenca con IF bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada, que con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, estará sujeta a crecientes de menor magnitud. Una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas.

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc). El límite define la forma y la superficie que abarca la cuenca vertiente, teniendo influencia sobre los escurrimientos y sobre la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987). El Kc es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari, 2002).

Para explicar el Kc de una cuenca, se ha propuesto su comparación con una cuenca ideal de forma circular, con sus tributarios dispuestos radialmente y que desembocan en el punto central (López Cadenas de Llano, 1998). Se expresa como una relación entre P (perímetro (km)) y A (superficie (km²)), por medio de la Ecuación 7.

$$Kc = P / (2 \sqrt{\pi g A})$$

Ecuación 7.

El Kc está relacionado estrechamente con el tiempo de concentración, que es el tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la

salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando las gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma: $K_c = 1,00$ representa una cuenca redonda; 1,25, oval redonda; 1,50 oblonga; e igual o mayor a 1,75 cuenca rectangular-oblonga. Su valor será mayor que la unidad y crecerá con la irregularidad de la forma de la cuenca. A medida que su K_c tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas.

Parámetros de relieve.

Curva hipsométrica (CH). La generación de la curva hipsométrica en un área fue sugerida por Langbein et al.,(1947), para proporcionar información sintetizada sobre la altitud de la cuenca, que representa gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. CH representa la distribución del área de acuerdo a su elevación (Gaspari et al, 2009).

La CH se puede determinar con apoyo de un modelo digital de elevación con Sistema de Información Geográfica (Gráfico 1).

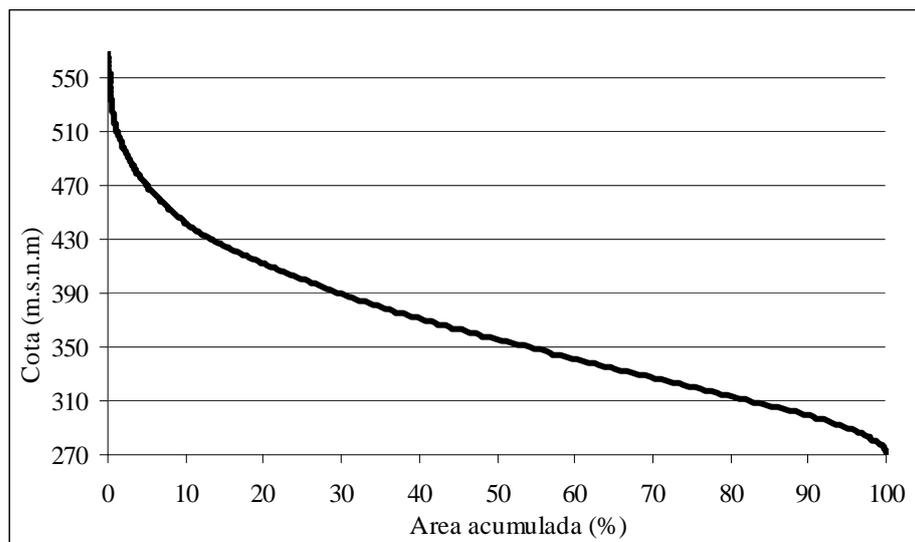


Gráfico 1. Curva hipsométrica.

La lectura de la curva hipsométrica de una cuenca permite establecer las áreas comprendidas entre diferentes cotas, por ejemplo la Gráfico 1 indica la relación de superficie de ocupación según su cota, por ejemplo:

- 100% cuenca está por encima de los 270 msnm
- 50 % cuenca está por encima de los 350 msnm
- 30 % cuenca está por encima de los 390 msnm
- 10 % cuenca está por encima de los 440 msnm

La importancia de CH reside en que es un indicador del estado de equilibrio dinámico de la cuenca. El Gráfico 2 muestra tres curvas hipsométricas, confeccionadas por Strahler correspondientes a otras tantas cuencas que tienen potenciales evolutivos distintos (Llamas, 1993). La curva superior (curva A) refleja una cuenca con un gran potencial erosivo; la curva intermedia (curva B) es característica de una cuenca en equilibrio; y la curva inferior (curva C) es típica de una cuenca sedimentaria. Las fases de la vida de los ríos quedarían representadas por: curva A que representa la fase de juventud, la curva B que indica la fase de madurez y la curva C que expresa la fase de vejez.

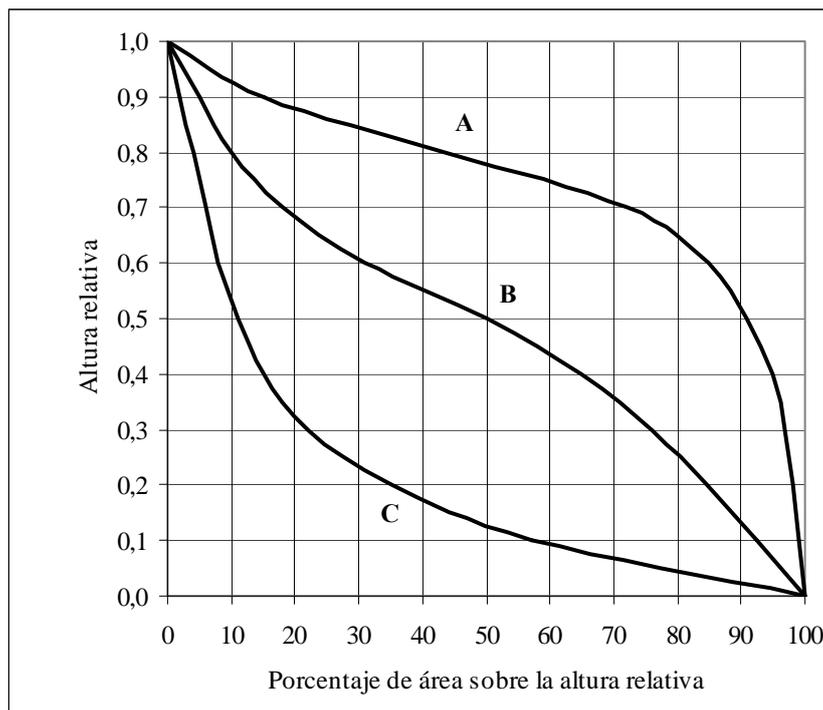


Gráfico 2. Curvas hipsométricas adimensional características del ciclo de erosión (según Strahler)

Cuando las curvas hipsométricas presentan variaciones, ya sea por apartarse de las teóricas o por presentar más de un punto de inflexión, puede relacionarse con controles tectónicos o litológicos particulares (Racca, 2007).

Curva hipsométrica adimensional (CHA). Expresa el potencial evolutivo de la cuenca hidrográfica, por medio de un gráfico de dos ejes donde la ordenada es la Altura relativa (h/H) y la abscisa es Área relativa (a/A), donde h : Intervalo entre curvas de nivel (m), H : Desnivel total de la cuenca (m) establecido como diferencia entre la cota máxima y la mínima del área analizada, A : Superficie total de la cuenca (ha) y a : Área entre curvas de nivel (ha). Su forma es sigmoideal, cóncava hacia arriba en la parte superior y convexa en la parte baja, como se expresa en el Gráfico 3.

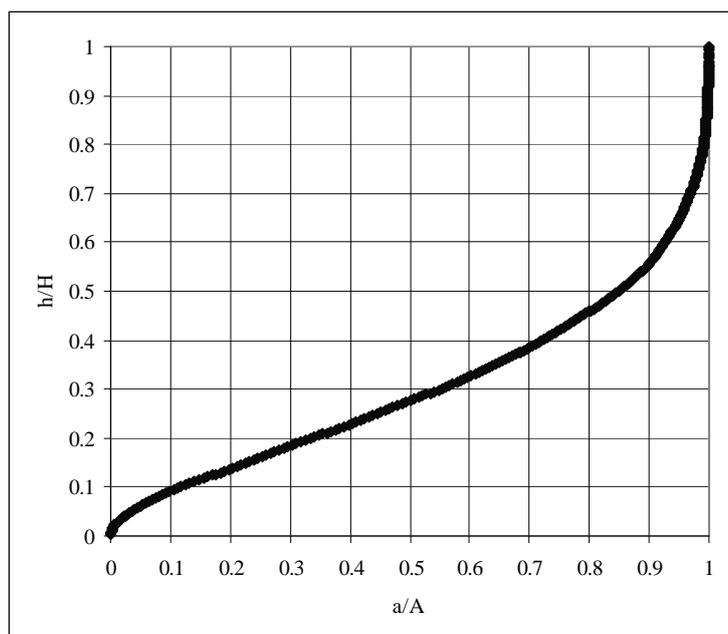


Gráfico 3. Curva Hipsométrica adimensional.

Pendiente media de la cuenca (PM). El proceso de degradación a que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, están muy influenciados por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente (López Cadenas de Llano, 1998). Para determinar la pendiente media de una cuenca se utiliza el mapa topográfico y el modelo digital de elevación, cuyo procedimiento se expresa en la Ecuación 8.

$$PM = 100 \left[\frac{H \cdot L}{A} \right]$$

Ecuación 8.

Siendo PM: Pendiente media (%); H: Equidistancia entre curvas medidas (km); L: Longitud de las curvas de nivel (km); A: Superficie (km²).

Según la clasificación de López Cadenas de Llano (1998), la pendiente refleja los diferentes tipos de relieve, considerándose muy plano a un relieve menor del 0.5 %; plano a 0.5 a 1 %, de 1 a 3 % suave; de 3 a 12 % presenta lomadas; 12 a 20 % relieve accidentado; 20 a 50% muy fuerte; escarpado cuando se distribuye entre 50 y 75 %, y mayor al 75 % se corresponde a un relieve muy escarpado.

Coefficiente de rugosidad (Ra). Es la relación existente entre el desnivel de la cuenca (H) y su densidad de drenaje (Dd). Es adimensional (López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari et al., 2009).

Parámetros de drenaje.

Densidad de drenaje (Dd). Está definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca

con respecto al área de la misma (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998). Dd caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, por medio del grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante (Henao, 1988; López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2002). Cabe mencionar que se denomina red hidrográfica a la totalidad del drenaje natural, permanente o temporal, por el que fluye el escurrimiento superficial.

La densidad de drenaje (Dd) fue establecida por Horton según el cociente entre la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca (Ln) y el área total de la cuenca (A) (López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari et al., 2009).

En un principio, y sin tener en cuenta otros factores del medio físico de la cuenca, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo. En efecto, al ser la densidad de drenaje alta, una gota deberá recorrer una menor longitud de ladera, con una mayor velocidad de escurrimiento.

Longitud del cauce principal (Ln)(km). Es la longitud definida con la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que conforman el cauce principal y que drenan por la cuenca.

Pendiente media del cauce (J). Se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y la longitud del mismo (L) (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987; López Cadenas de Llano, 1998; Gaspari, 2002). Se expresa en porcentaje.

Tiempo de concentración (Tc). El tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto mas alejado hasta la desembocadura de la cuenca (Chow et al., 1994; Gaspari et al., 2009). El tiempo de concentración también depende de la forma de la cuenca (López Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, 1987).

El Tc (horas) se calcula particularmente con la relación entre la longitud del cauce principal, expresada en kilómetro (L), y la pendiente media de la cuenca, expresada en metro/metro (J).

Kirpich (1940) desarrolló una ecuación empírica, a partir de información antecedente de siete cuencas rurales estadounidenses, con canales bien definidos y pendiente pronunciadas (3 a 10%) (Chow et al., 1994). La Ecuación 9 muestra su expresión de cálculo.

$$Tc = 0,06628 \cdot (L^{0,77} / J^{0,385}) \quad \text{Ecuación 9.}$$

La Dirección General de Carreteras (España) generó otra Ecuación para establecer el Tc, que se expresa según la Ecuación 10.

$$Tc = 0,3 \cdot [(L / J^{0,25})^{0,76}] \quad \text{Ecuación 10.}$$

Número de Orden de los cursos de agua. Es un número que tiene relación estrecha con la cantidad de ramificaciones de la red de drenaje.

El criterio de Schumm, se presenta en la Figura 16, y asigna el primer orden 1 a todos los cauces que no tienen tributarios y, en general la unión de dos cauces de igual orden determinan o dan origen a otro de orden inmediatamente superior y dos de diferente orden dan origen a otro de igual orden que el de orden mayor y así sucesivamente hasta llegar al orden de la cuenca. El cauce principal tiene el orden más elevado, que es el orden de la cuenca.

Se ordenan y numeran los afluentes desde las nacientes de una cuenca hacia su cierre ó desembocadura.

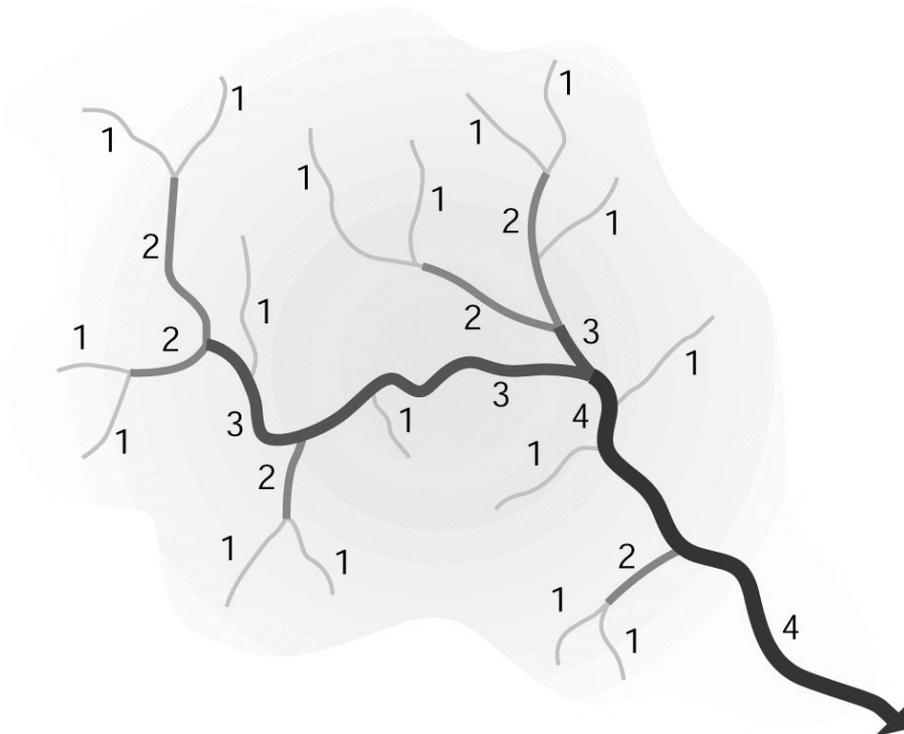


Figura 16. Orden de los cursos de agua, según USDA (2007).

Fuente: http://www.nrcs.usda.gov/technical/stream_restoration/chap2.html

A mayor número de orden, es mayor el potencial erosivo, mayor el transporte de sedimentos y por tanto mayor también la componente de escurrimiento directo que en otra cuenca de similar área.

Ejemplo de aplicación.

Realizar el análisis morfométrico de la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande por medio de la aplicación de la metodología descripta.

Estos parámetros se determinan a partir de datos de base que se pueden obtener por cartografía en papel y/o por análisis con sistemas de información geográfica y/o por relevamiento a campo.

A continuación se presentan los resultados alcanzados para la cuenca en estudio (Tablas 6 a, b y c) (Gráficos 4 a y b).

Área (A)	Perímetro (P)	L axial (La)	Ancho promedio (Ap)	Factor de Forma (IF)	Kc
(km ²)	(km)	(km)	(km/km ²)		
342,6	122,98	28,36	12,1	0,43	1,87

Tabla 6 a. Resultados de los parámetros de forma.

Curva hipsométrica	Pendiente media	Coefficiente de Rugosidad (Ra)	H max	H min
Graficos 4 a y b	(m/m)		(m)	(m)
	0,0324	21,5	391,0	140,0

Tabla 6 b. Resultados de los parámetros de relieve.

Longitud cauce principal (Ln)	Densidad de drenaje (Dd)	Tiempo de Concentración (Tc)	Pendiente media (J)
(m)	(km/km ²)	(minutos)	(m/m)
29301	0,09	656,4	0,004

Tabla 6 c. Resultados de los parámetros de drenaje.

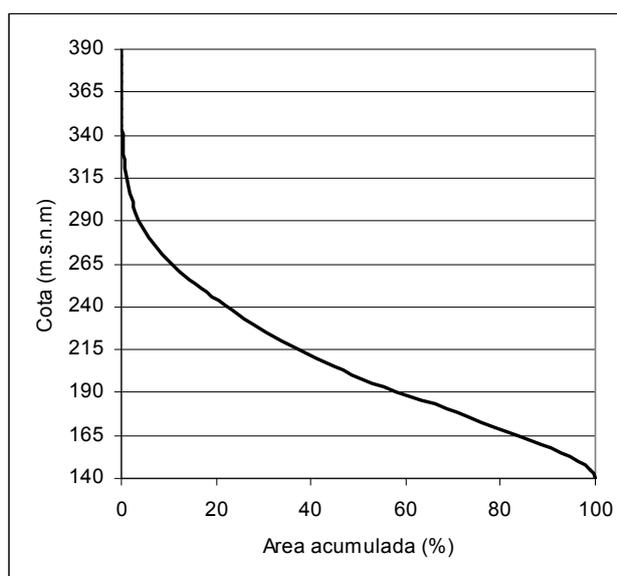


Gráfico 4a. Curva hipsométrica de la cuenca.

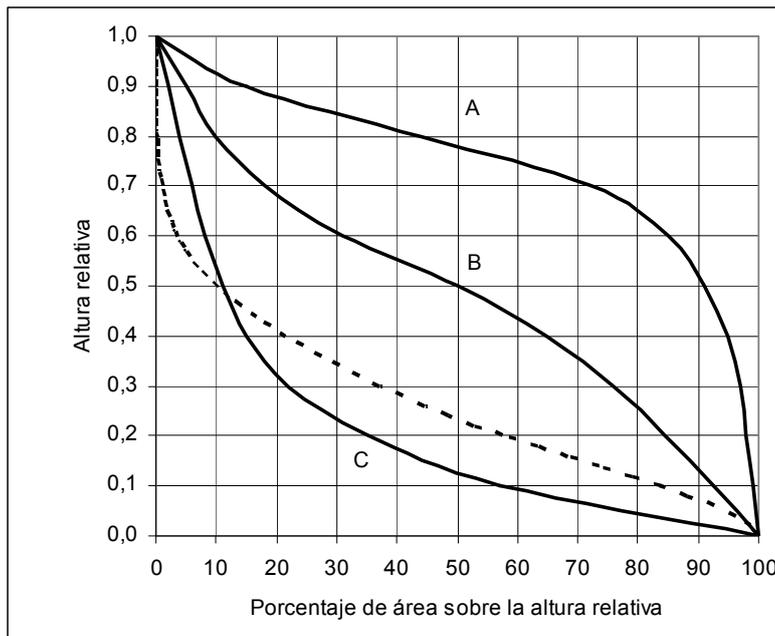


Gráfico 4b. Curva hipsométrica adimensional de la cuenca (línea cortada) y valores de referencia.

Se observa en la Tabla 6 a, b y c, que la superficie y su relación con la simetría de la cuenca, queda definida por su longitud axial y perímetro, debido a su forma. Esta se visualiza en el Factor IF. Según su K_c la cuenca presenta una forma Oblonga a rectangular – oblonga.

Los Gráficos 4 a y b indican que la cuenca en estudio presenta una curva hipsométrica que presenta una distribución altitudinal en la cuenca vertiente por tramos de altura. Esta caracterización del relieve indica áreas con pendientes fuertes hacia la cabecera de la cuenca y hacia las cotas inferiores indica llanuras o perillanuras. El 10 % de la cuenca presenta cotas superiores a 140 msnm, mientras que el 50 % alcanza cotas superiores de 200 msnm. Se observa además, que más del 20 % de la superficie de la cuenca presenta valores de altitud mayores a los 200 m de elevación, mientras que sólo un 3 % de la cuenca presenta valores de altitud mayores a los 300 msnm. En relación a la curva hipsométrica adimensional se expresa que la cuenca presenta un estado de madurez avanzado y es del tipo sedimentaria, predominantemente.

Presenta una pendiente media representada por lomadas a relieve accidentado, con una rugosidad marcada. La densidad de drenaje indica la forma de desagote de la cuenca, que en este caso es baja / lenta. Por eso una gota de lluvia deberá recorrer largas distancias con baja energía cinética gravitatoria, definiendo además un largo tiempo de concentración.

CONCEPTOS DE HIDROLOGÍA DE SUPERFICIE.

El agua que escurre en un curso de agua, proviene de una o varias de las siguientes fuentes: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial o hipodérmico, escurrimiento subterráneo, precipitación directa en el curso de agua y sus tributarios. (Bustamante, 1984). Todas estas fuentes conforman las descargas o caudal líquido cuantificado en un área de aforo.

Un hidrograma es la representación gráfica de las descargas instantáneas (Q) de un curso de agua en función del tiempo (t), cuya función matemática responde a $Q = f(t)$. Chow et al, indican que el hidrograma es una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y el escurrimiento de una cuenca de drenaje particular (Chow et al., 1994).

Puede representarse a escalas muy diversas pudiendo ser simples o compuestos, según representen a una sola tormenta o a una sucesión de las mismas (Mármol, 2006). En la Figura 17 se presenta un hidrograma con los elementos que la componen, expresando la relación entre la precipitación caída en un sitio y la generación del escurrimiento (Gaspari et al, 2009).

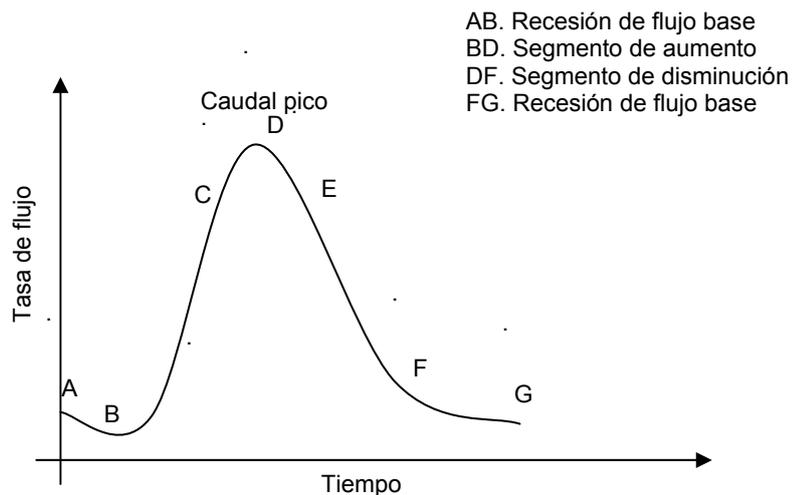


Figura 17. Elementos de un hidrograma según Chow et al. (1994).

El hidrograma de la Figura 17 está fragmentado por puntos de inflexión en tramos, representado en la curva del hidrograma lo siguiente:

- Tramo AB es la curva de agotamiento antecedente;
- B, es el comienzo de la creciente; se verifica con un aumento de agua en la sección de aforos;
- C, es el punto de inflexión donde pasa la curva de cóncava a convexa;
- D, es la punta o pico del hidrograma, correspondiente al máximo caudal que ha generado el aguacero;
- Tramo BD, es la curva de concentración; siendo el tramo comprendido desde que se inicia el aumento de caudal en el río como consecuencia de la lluvia hasta llegar al máximo;

- Tramo DF, es la curva de descenso, en que disminuye el escurrimiento superficial hasta anularse en F;
- E, es el punto de inflexión;
- Tramo CE, es la cresta del hidrograma.
- Tramo FG, es la curva de agotamiento del hidrograma.

En el punto F comienza la curva de agotamiento y los aportes del caudal Q proceden únicamente del escurrimiento subterráneo. Este escurrimiento es el que mantiene el caudal en los períodos que no llueve en la cuenca y puede ser acompañado por agua de manantiales o vertientes. Cuando no se extingue la corriente durante el estiaje, la curva de agotamiento se hace asintótica para un valor mínimo que se denomina caudal de base (Mármol, 2006). Es decir la curva de agotamiento se enlaza con la curva de concentración de la lluvia siguiente.

Observando el hidrograma de la Figura 18, se pueden identificar los diferentes momentos que se representan como:

- Tiempo al pico (T_p) es el momento en que se produce el máximo caudal (caudal pico) durante de la tormenta.
- Tiempo de respuesta (T_{lag}) es aquel que se expresa desde el centro del hietograma (centroide) hasta la punta del hidrograma. Equivale al retardo entre la máxima intensidad de la lluvia y el máximo caudal.
- Tiempo de crecida (T_{trec}) es el transcurrido entre el inicio de la crecida y la punta del hidrograma.
- Tiempo de concentración (T_c) es el transcurrido desde el final de la lluvia neta hasta el final del escurrimiento superficial.
- Tiempo base (T_b), equivale a la duración del escurrimiento superficial. Es el tiempo transcurrido entre el inicio de la crecida y el final del escurrimiento superficial.

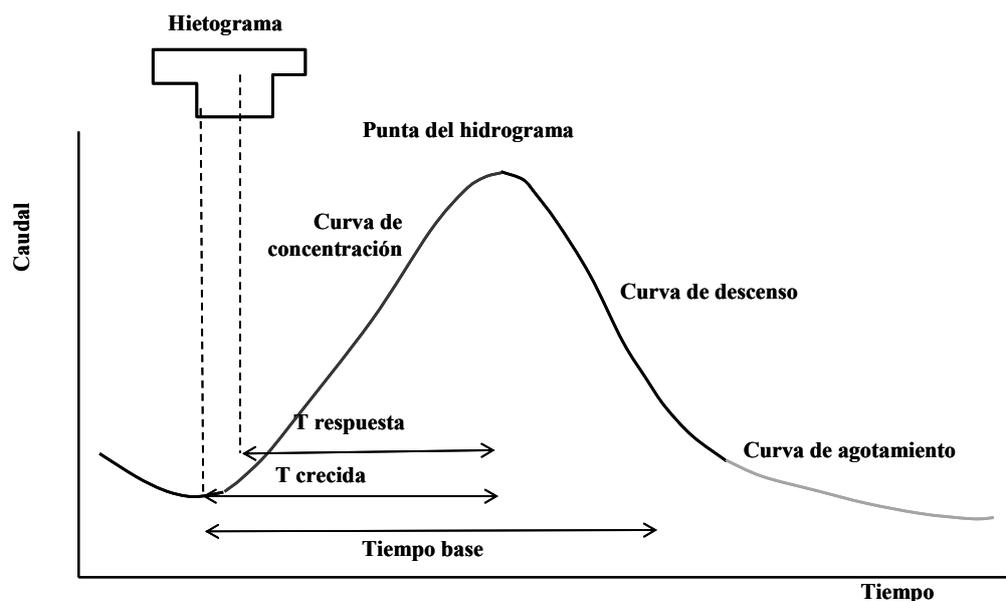


Figura 18. *Tiempos transcurridos en un hidrograma.*

RESOLUCIÓN DE HIDROGRAMAS A TRAVÉS DEL MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO

El hidrograma unitario (HU) de una cuenca, es definido como el hidrograma resultante de una precipitación efectiva de 1 mm de altura, distribuida uniformemente en la cuenca, de intensidad constante y de duración unitaria. Esta definición permite aplicar el método del hidrograma unitario para obtener hidrogramas individuales parciales desplazados en el tiempo, por el método denominado deconvolución, a partir del hidrograma total de escurrimiento directo de la cuenca para una precipitación dada de duración conocida.

La ecuación de convolución, según Chow et al (1988) es la función respuesta de una lluvia, que permite el cálculo de la escorrentía directa (Q_n) dado un exceso de lluvia (P_m) y el hidrograma unitario (H_{Un-m+1}) (Ecuación 11).

$$Q_n = \sum (P_m) \times (H_{Un-m+1}) \quad \text{Ecuación 11}$$

En la Tabla 7 y Gráfico 5 se expone a modo de ejemplo la generación de un hidrograma aplicando esta metodología para una precipitación efectiva de 3 mm, donde se indica un hidrograma unitario con tiempo unitario de 2 horas.

Tiempo (hs)	H.U (m ³ /s)
0	0
2	1
4	3
6	6
8	4,9
10	3,1
12	1,9
14	1,2
16	0,7
18	0,3
20	0

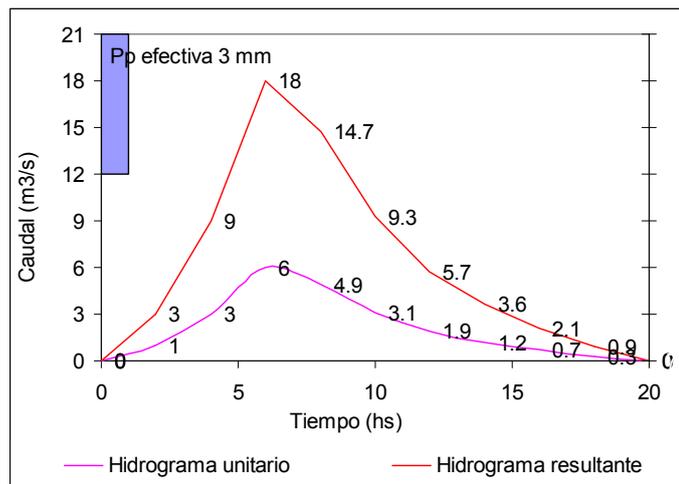


Tabla 7: Hidrograma unitario (HU)

Gráfico 5: Hidrograma unitario

En el caso de precipitaciones efectivas, cuya lámina sea mayor a un milímetro, debe utilizarse el principio de **proporcionalidad**, esto significa que el hidrograma resultante será el hidrograma unitario aumentado tantas veces como lámina de precipitación efectiva haya ocurrido, es decir aplicación de la convolución a partir del HU.

En la Tabla 8 y Gráfico 6 se expone un hidrograma resultante para una lámina de precipitación efectiva de 2 mm en cuatro horas y el hidrograma unitario expuesto anteriormente.

Tiempo (hs)	H.U (m ³ /s)	Hidrograma resultante (m ³ /s)
0	0	0
2	1	3
4	3	9
6	6	18
8	4,9	14,7
10	3,1	9,3
12	1,9	5,7
14	1,2	3,6
16	0,7	2,1
18	0,3	0,9
20	0	0

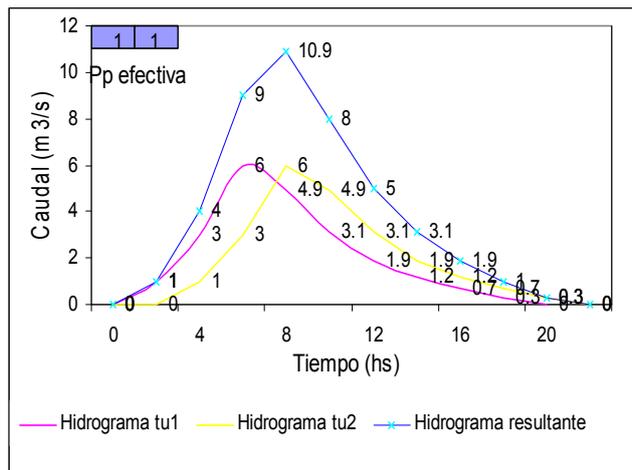


Tabla 8: HU – H resultante.

Gráfico 6: HU - HR

En el caso de precipitaciones efectivas, cuya duración sea mayor a la unitaria, debe utilizarse el principio de **superposición**, esto significa que el hidrograma resultante será la suma del hidrograma unitario (hidrogramas parciales) tantas veces como períodos unitarios tenga la precipitación efectiva que haya ocurrido, y desplazados en el tiempo uno o mas períodos unitarios, ya que el segundo período de precipitación ocurre una vez terminado el primero y así sucesivamente. Nótese entonces que existirán tantos hidrograma parciales como períodos de duración unitaria posea la precipitación.

En la Tabla 9 y Gráfico 7 se expone un hidrograma resultante o total para una lámina de precipitación efectiva de dos períodos unitarios (tu) con una lámina de un milímetro cada uno, utilizando el hidrograma unitario expuesto anteriormente. Cada hidrograma generado por tu(n) se denomina hidrograma parcial.

Tiempo (hs)	H.U (m ³ /s)	Lluvia efectiva (mm)	Hidrograma tu1 (m ³ /s)	Hidrograma tu2 (m ³ /s)	Hidrograma resultante (m ³ /s)
0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	0	1
4	3	1	3	1	4
6	6		6	3	9
8	4,9		4,9	6	10,9
10	3,1		3,1	4,9	8
12	1,9		1,9	3,1	5
14	1,2		1,2	1,9	3,1
16	0,7		0,7	1,2	1,9
18	0,3		0,3	0,7	1
20	0		0	0,3	0,3
22			0	0	0
24			0	0	0
26			0	0	0
28			0	0	0
30			0	0	0

Tabla 9: Hidrograma generados por una precipitación con duración de dos tiempos unitarios (tu)

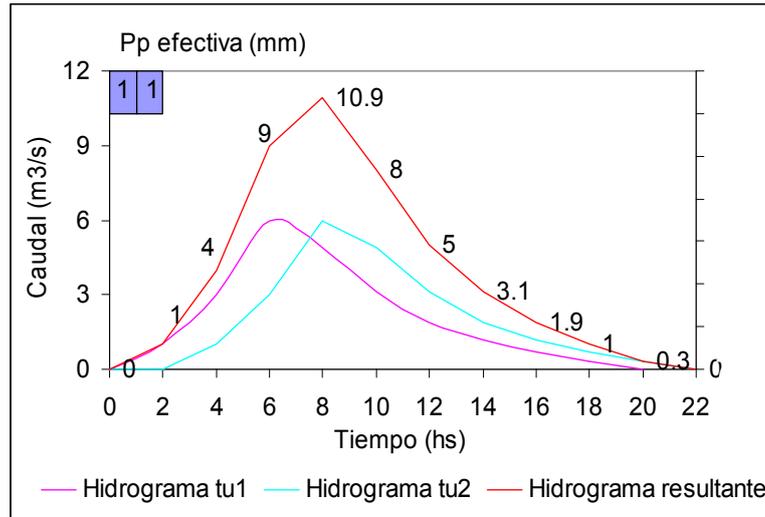


Gráfico 7: Hidrograma resultante y parciales generados por una precipitación con duración de 2 tiempos unitarios (T_u)

Por último y como sucede mayormente en la naturaleza, la precipitación efectiva suele ser mayor a un milímetro y con duración mayor que un tiempo unitario. En este caso el procedimiento consiste en aplicar simultáneamente los principios de **proporcionalidad y superposición**.

Ejemplo de aplicación

El objetivo es la determinación de los caudales totales que escurren por una sección en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande, aplicando el método de convolución.

Los datos para el procesamiento son:

- Flujo Base Constante: $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Tiempo total a considerar: 58 horas.
- Tiempo unitario a considerar: 2 horas.
- Lluvia efectiva (mm) a considerar: 4,7 - 2,3 - 5,1 - 3,2.
- Hidrograma unitario (m^3/s): 0 - 0,3 - 1 - 2 - 3,2 - 4,1 - 4,3 - 4,1 - 3,6 - 3 - 2 - 2 - 1,7 - 1,3 - 1 - 0,8 - 0,6 - 0,4 - 0,3 - 0,3 - 0,2 - 0,2 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0.

Los resultados se establecerán por medio de la elaboración de una planilla de cálculo e integrar la metodología, como se expone en la Tabla 10.

Tiempo (hs)	HU (m ³ /s)	Pp efectiva (mm)	Hp ₁	Hp ₂	Hp ₃	Hp ₄	Flujo Base	Hidrograma Total
0	0,0	0	0	0	0	0	1,2	1,20
2	0,3	4,7	1,51	0	0	0	1,2	2,71
4	1,0	2,3	4,53	0,74	0	0	1,2	6,47
6	2,0	5,1	9,27	2,22	1,64	0	1,2	14,33
8	3,2	3,2	15,1	4,53	4,92	1,03	1,2	26,88
10	4,1		19,05	7,43	10,06	3,08	1,2	40,83
12	4,3		20,17	9,32	16,48	6,31	1,2	53,48
14	4,1		19,38	9,86	20,67	10,3	1,2	61,46
16	3,6		17,13	9,48	21,88	12,97	1,2	62,66
18	3,0		14,15	8,38	21,03	13,73	1,2	58,49
20	2,2		10,42	6,92	18,58	13,20	1,2	50,33
22	1,7		7,77	5,10	15,36	11,66	1,2	41,09
24	1,3		5,93	3,80	11,31	9,63	1,2	31,88
26	1,0		4,64	2,90	8,44	7,09	1,2	24,28
28	0,8		3,56	2,27	6,43	5,29	1,2	18,77
30	0,6		2,70	1,74	5,03	4,03	1,2	14,72
32	0,4		2,06	1,32	3,87	3,16	1,2	11,62
34	0,3		1,57	1,01	2,93	2,42	1,2	9,14
36	0,3		1,20	0,76	2,24	1,84	1,2	7,25
38	0,2		0,92	0,58	1,70	1,40	1,2	5,82
40	0,2		0,71	0,45	1,30	1,06	1,2	4,73
42	0,1		0,54	0,34	1,00	0,81	1,2	3,91
44	0,1		0,41	0,26	0,77	0,63	1,2	3,28
46	0,1		0,31	0,20	0,59	0,48	1,2	2,79
48	0,1		0,24	0,15	0,44	0,37	1,2	2,41
50	0,0		0,19	0,12	0,34	0,28	1,2	2,14
52			0	0,09	0,26	0,21	1,2	1,77
54			0	0	0,21	0,16	1,2	1,58
56			0	0	0	0,13	1,2	1,33
58			0	0	0	0	1,2	1,2

Tabla 10. Aplicación práctica de la convolución para la generación de hidrogramas parciales (Hp_n (m³/s)) y el hidrograma total resultante (m³/s).

La aplicación de esta metodología permitió generar el hidrograma total de una tormenta. Su representación gráfica se presenta en el Gráfico 8.

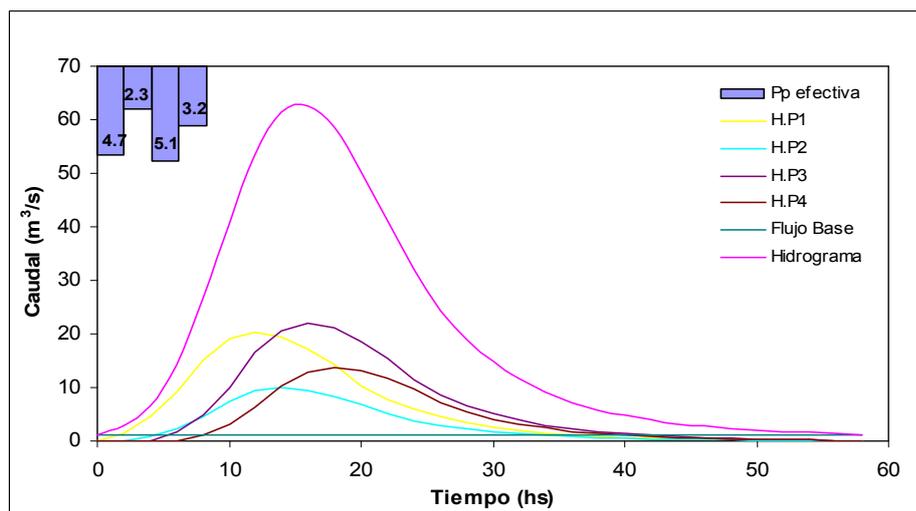


Gráfico 8: Representación gráfica de hidrogramas parciales y total según Tabla 10.

Creación de un hietograma e hidrogramas en un mismo gráfico.

En el caso de conocer la precipitación efectiva en una cuenca hidrográfica, se pueden deducir las pérdidas de precipitación generadas por retención de agua por el suelo y las plantas. Esta temática se desarrollará en el próximo capítulo. La creación de un gráfico donde se represente la integración de los datos de la lluvia y de la escorrentía generada, se explica con la tabla 11 y la descripción del procedimiento gráfico.

Tiempo (h)	H,U (m³/s)	PP efectiva (mm)	Pérdidas	Hp1	Hp2	Hp3	H Total
0	0	5	10	0			0
1	2	10	10	10	0		10
2	7	7	10	35	20	0	55
3	15	0	0	75	70	14	159
4	20	0	0	100	150	49	299
5	22	0	0	110	200	105	415
6	25	0	0	125	220	140	485
7	28	0	0	140	250	154	544
8	30	0	0	150	280	175	605
9	32	0	0	160	300	196	656
10	35	0	0	175	320	210	705
11	32	0	0	160	350	224	734
12	30	0	0	150	320	245	715
13	28	0	0	140	300	224	664
14	25	0	0	125	280	210	615
15	22	0	0	110	250	196	556
16	20	0	0	100	220	175	495
17	15	0	0	75	200	154	429
18	7	0	0	35	150	140	325
19	2	0	0	10	70	105	185
20	0	0	0	0	20	49	69
21		0	0		0	14	14
22		0	0			0	0

Tabla 11. Aplicación práctica de la convolución para la generación de hidrogramas parciales (H_p_n (m³/s)) y un hidrograma total (m³/s).

Los pasos a seguir para lograr el gráfico utilizando una planilla de cálculo con el programa Microsoft ® Office Excel 2003, son los siguientes:

- Paso 1: Cree un gráfico en programa, tipo personalizado; líneas y columnas 2.
 Agregue la primera serie, esta será el hidrograma total, y su eje X, el tiempo.
 Agregue otra serie, la cual será la precipitación efectiva (PP efect.), representando el hietograma.
 Finalice el gráfico, obteniendo el Gráfico 9.

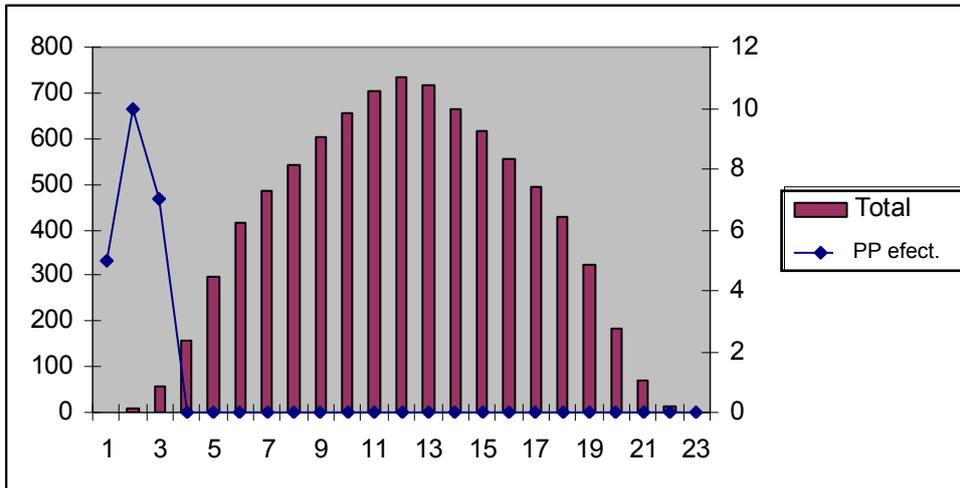


Gráfico 9: Representación gráfica de hidrograma total y precipitación efectiva según Tabla 11.

- Paso 2: Seleccione la serie del hidrograma y con el botón derecho del mouse elija tipo de gráfico, luego elija dispersión y subtipo líneas suavizadas sin marcadores de datos.
 Luego proceda igual con la serie de pérdidas pero elija columnas subtipo columna apilada, para completar el hietograma.
 El gráfico 10 expresa el paso 2.

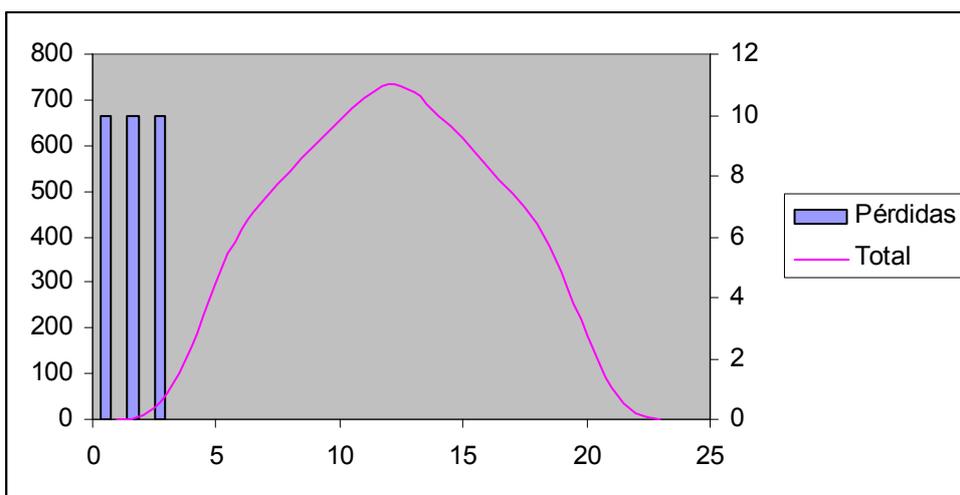


Gráfico 10: Representación gráfica de hidrograma total y precipitación (Paso 2).

Paso3: Seleccione la serie pérdidas y con el botón derecho del mouse, elija Datos de origen, agregue una serie y suministre los valores de precipitación efectiva en el hietograma. El resultado se muestra en el Gráfico 11.

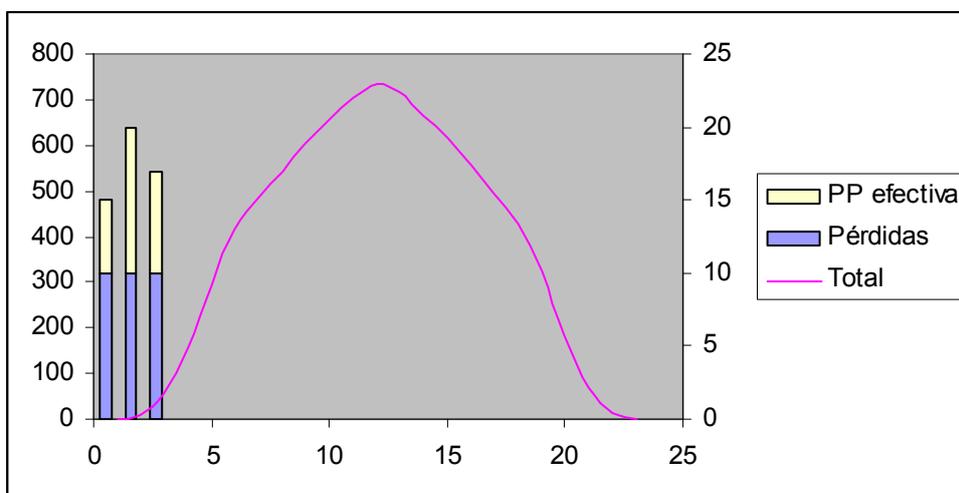


Gráfico 11: Representación gráfica de hidrograma total y precipitación (Paso 3).

Paso 4. En esta sección se cambiara la escala del eje secundario Y del hietograma; y se procederá a ocultar visualmente sus valores. Para ello seleccione el eje secundario Y; y con el botón derecho del mouse, elija formato de ejes, en escala máximo 200, valores en orden inverso y en fuente color blanco fondo transparente. La visualización se presenta en el Gráfico 12:

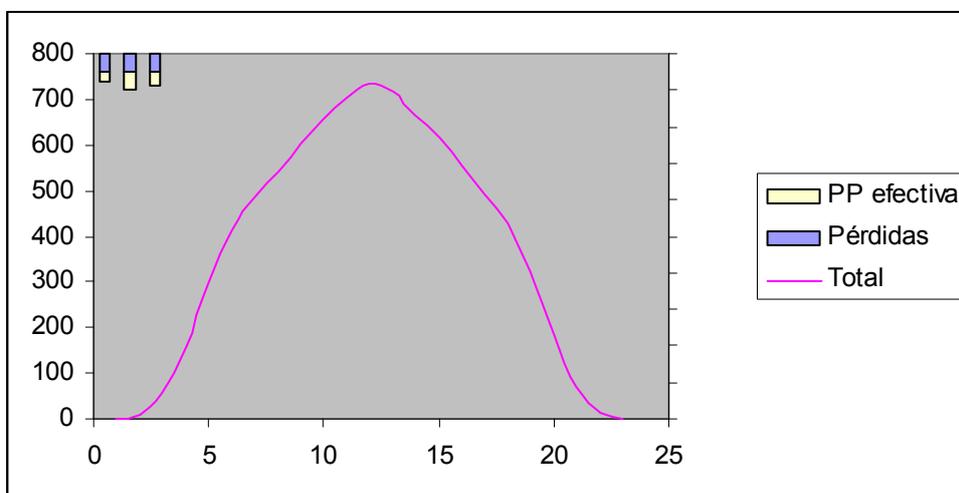


Gráfico 12: Representación gráfica de hidrograma total y precipitación (Paso 4).

Paso 5. Seleccione la serie de datos precipitación efectiva y con el botón derecho del mouse elija formato de la serie de datos, opciones, ancho del rango y dé valor 0.

Luego seleccione cada una de las columnas y con el botón derecho del mouse elija formato de punto de datos, en rótulo de datos marque valor, esta última acción realícela en la serie Pérdidas.

Se visualizará el hietograma final en el Gráfico 13:

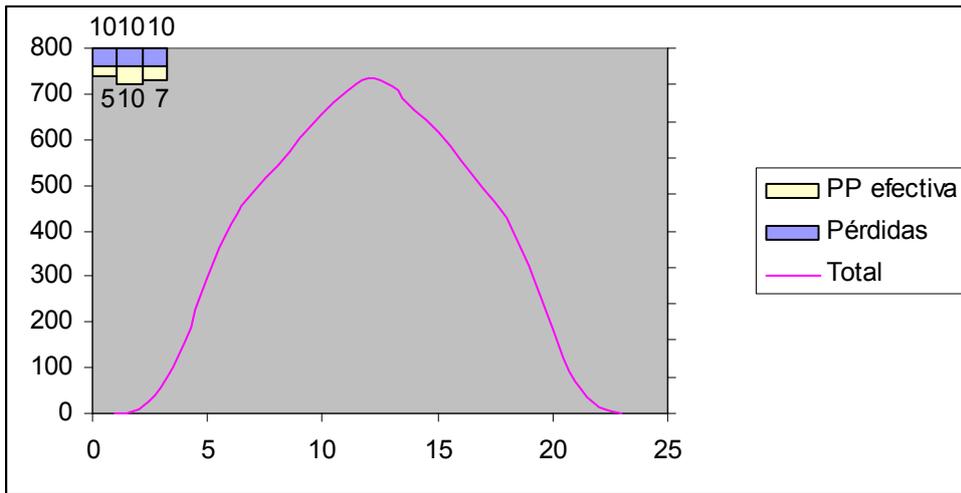


Gráfico 13: Representación gráfica del hietograma y el hidrograma total (Paso 5).

Paso 6. Seleccione los rótulos de la serie de datos precipitación efectiva y con el botón derecho del mouse elija formato de rótulos de rotulo de datos, fuente, color rojo, fondo transparente. Aceptar, esta última acción realícela en la serie Pérdidas pero modifique para que sea azul.

Se visualizará como el Gráfico 14:

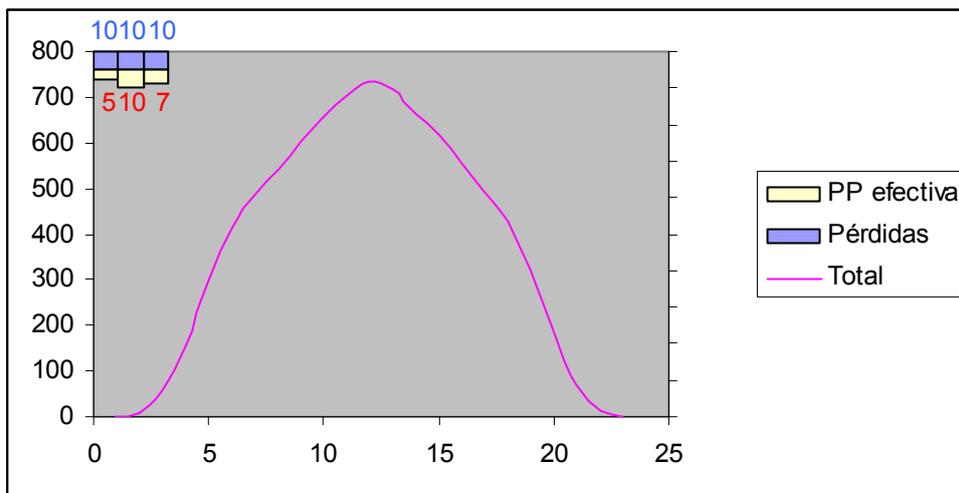


Gráfico 14: Representación gráfica del hietograma y el hidrograma total (Paso 6).

Paso 7. El próximo paso será agregar las series de hidrogramas parciales, seleccionando los valores y arrastrándolos hasta el gráfico.

El grafico quedará como el Gráfico 15.

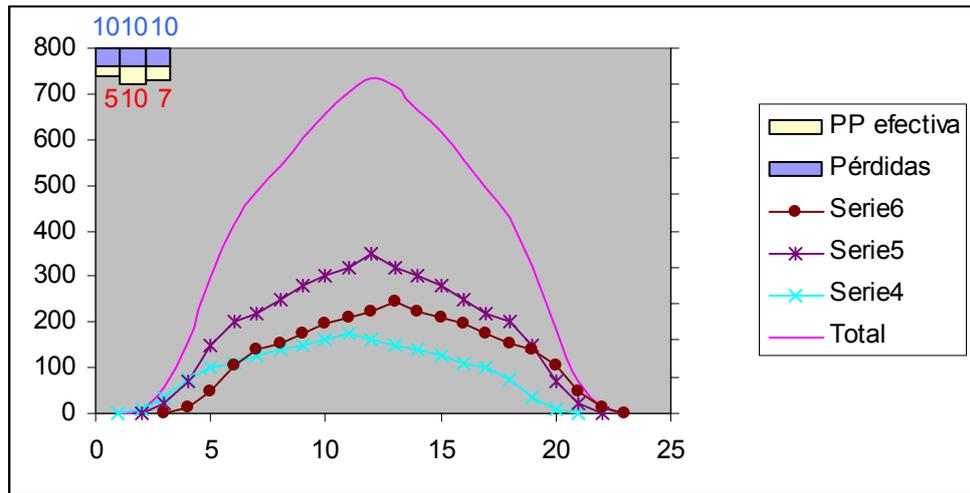


Gráfico 15: Representación gráfica del hietograma, los hidrogramas parciales y el hidrograma total (Paso 7).

Paso 8. El último paso será realizar la modificaciones en el área del gráfico, en los marcadores de las series H.P, asignarle nombre a las series, modificaciones el área de las series precipitación efectiva y Pérdidas, asignarle leyenda a los ejes, mover los rótulos de las series precipitación efectiva y Pérdidas, asignar los valores del eje X y modificar su escala.

El gráfico terminado se muestra en el Gráfico 16.

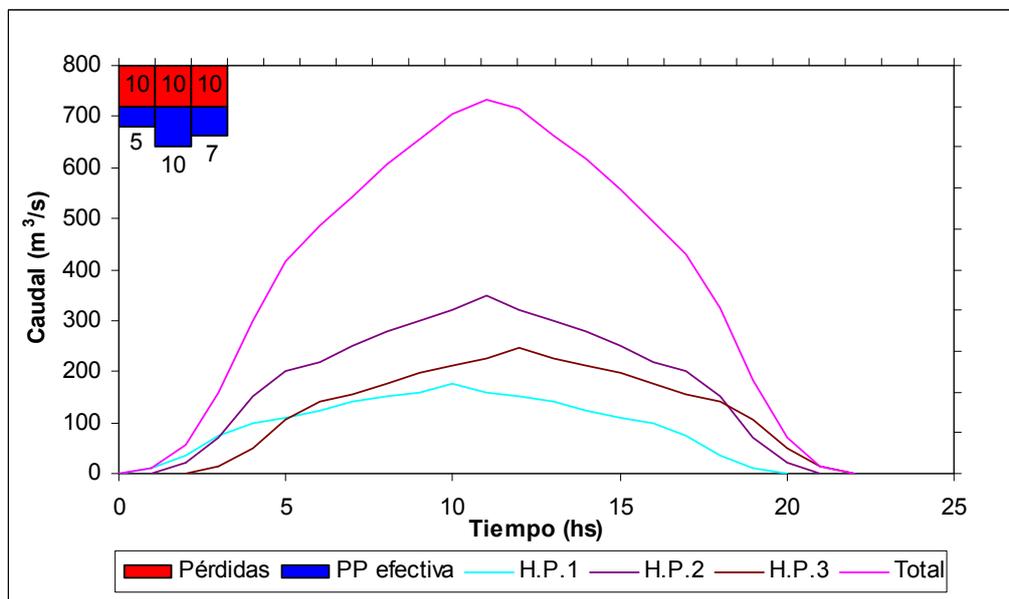


Gráfico 16: Representación gráfica del hietograma (mm) e hidrogramas parciales y total (m³/seg) (Paso 8).

DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL POR EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA DE CURVA

El caudal líquido de una cuenca hidrográfica, está fundamentalmente constituido por el escurrimiento. Se denomina escurrimiento superficial al agua procedente de la lluvia que circula por la superficie y se concentra en los cauces. El escurrimiento superficial es función de las características topográficas, geológicas, climáticas y de vegetación de la cuenca y está íntimamente ligada a la relación entre aguas superficiales y subterráneas de la cuenca (Gaspari et al, 2009).

El escurrimiento es nulo al inicio de la lluvia, que va en aumento hasta alcanzar un porcentaje en relación a la intensidad de la lluvia que es constante. Tanto el porcentaje como la intensidad del escurrimiento derivan de la intensidad de la lluvia. El escurrimiento se inicia cuando el suelo está saturado o cuando la intensidad de la lluvia es muy superior a la intensidad o capacidad de la infiltración o cuando la cobertura vegetal deja de interceptar el agua de lluvia por haber colmado su capacidad de retención. Esta última se denomina abstracciones (Gráfico 17).

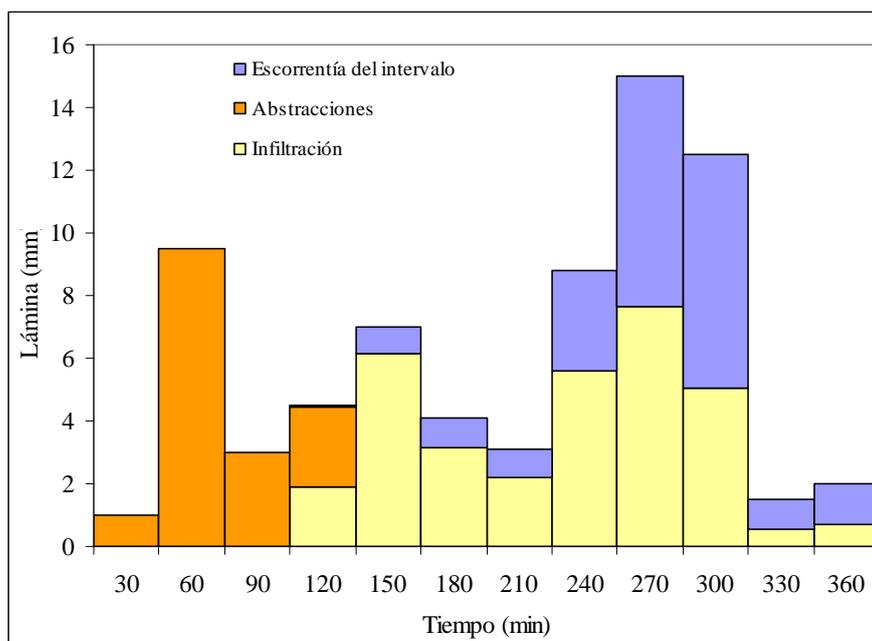


Gráfico 17. Componentes de un hietograma.

El volumen total del escurrimiento y sus valores máximos están influenciados directa o indirectamente por características climatológicas y biofísicas. Se puede considerar los más importantes aquellos que están relacionados con las características de la cuenca y con las precipitaciones:

- Factores agroclimáticos: Distribución en el tiempo, volumen e intensidad de las precipitaciones. La intensidad y la duración de las precipitaciones determinan el volumen total de agua escurrida en la cuenca. Las lluvias de baja intensidad y larga duración saturan la capacidad de retención del suelo. Las lluvias de gran intensidad provocan desagregado de las partículas del suelo sellando la superficie, disminuyendo la tasa de

infiltración y aumentando el escurrimiento superficial.

- b) Factores fisiográficos: entre ellos se pueden destacar la extensión, la forma y la pendiente media de la cuenca; las condiciones de la superficie del terreno como son la geología, tipo de suelo, permeabilidad, labores de cultivos, densidad de drenaje y capacidad de evacuación de la misma, entre otros.

La cuantificación del escurrimiento superficial es importante en los procesos de erosión hídrica superficial de los suelos, la cual genera fragilidad en los sistemas ambientales. Es por ello que se han desarrollado diferentes métodos paramétricos que utilizan fórmulas empíricas basadas en datos experimentales que permiten determinar el escurrimiento en las cuencas de recepción. La simplicidad con que se trata el fenómeno en estos casos, hace que los resultados tengan un valor orientativo para períodos de tiempo suficientemente amplios, siendo desaconsejable su uso con series meteorológicas cortas o incompletas. Cuanto menos factores o parámetros intervienen, más sencilla resulta la ecuación de aplicar, pero ofrece menores garantías (López Cadenas del Llano, 1998).

Como es conocido, cuando comienza a llover, una parte del agua precipitada queda retenida en la vegetación, otra inicia el proceso de infiltración y el resto genera escurrimiento. A medida que transcurre la precipitación el proceso de infiltración tiende a saturar el suelo y el escurrimiento tiende a aumentar. De ello se deduce que la precipitación se distribuye contemplando las características particulares de la misma, del tipo de suelo y cobertura vegetal y/o uso del suelo.

En aquellos casos en los que no se cuenta con datos de aforos para calcular el escurrimiento, el mismo se debe estimar. En el año 1972, el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (Soil Conservation Service - S.C.S.) desarrolló el método de las abstracciones, un método sencillo para calcular la lluvia efectiva como una función de la lluvia acumulada, la cobertura del suelo, el uso del suelo y las condiciones de humedad según el suelo, denominado Número de Curva (NC) (Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005). Se supone que cada uno de los complejos suelo-vegetación se comporta de una misma forma frente a la infiltración. En cada uno de estos complejos, la precipitación generará diferentes caudales de escurrimiento en función del grado de permeabilidad del suelo. Este método permite calcular las abstracciones de la precipitación de una tormenta, que por diferencia establece el escurrimiento. El NC se establece para cada complejo suelo-vegetación a partir de sus características particulares de vegetación y textura edáfica (Chow, 1994; López Cadenas del Llano, 1998; Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005; Gaspari et al 2009).

El método contempla la clasificación hídrica de los suelos reconociendo cuatro grupos hidrológicos (GH), según su clase textural, como se presenta en la Tabla 12.

GH	Textura
A	Arenoso; Arenoso-franco; Franco-arenoso
B	Franco-limoso; Franco; Limoso
C	Franco-arcillo-arenoso; Franco-arcillo-limoso; Franco-arcilloso
D	Arcillo-arenoso; Arcillo-limoso; Arcilloso

Tabla 12. Clasificación de los Grupos Hidrológicos.

La cobertura vegetal y/o uso del suelo es otro elemento que tiene influencia en el escurrimiento. La utilización de los terrenos ya sea como pastizales, bosques o áreas de cultivo con o sin aplicación de sistemas de siembra en hilera, surcos o en contornos determinan diferentes caudales de escurrimiento, por ende en el NC.

Conocido el GH y de la cobertura vegetal que le corresponde al terreno en estudio, se debe tener en cuenta la condición de humedad antecedente en el suelo, es decir el estado de humedad del suelo previo a la precipitación. La misma se define por tres condiciones básicas, considerando el contenido de humedad del suelo, determinadas en base a una lluvia dentro de los 5 a 10 días previos, denominada seca (I) si es menor a 12,5 mm, media (II) si la precipitación fue entre 12,7 – 38,1mm y húmeda (III), con valores mayores a 38,1 mm. Una vez definida la condición de humedad en la que se encuentra el suelo se puede utilizar la Tabla 13, en la cual se expresa el NC correspondiente para la condición I y III respectivamente.

Número de curva en la condición	Número de curva correspondientes a las condiciones	
	I	III
100	100	100
95	87	99
90	78	98
85	70	97
80	63	94
75	57	91
70	51	87
65	45	83
60	40	79
55	35	75
50	31	70
45	27	65
40	23	60
35	19	55
30	15	50
25	12	45
20	9	39
15	7	33
10	4	26
5	2	17
0	0	0

Tabla 13. Conversión del número de curva de la condición II a las condiciones I y III.

Teniendo en cuenta la definición del Grupo Hidrológico, la cobertura vegetal y/o el uso del suelo y que la condición de humedad antecedente considerada como media (II), varios autores elaboraron tablas para la determinación del NC (Tabla 14).

Cobertura vegetal y/ó uso del suelo	Grupo hidrológico			
	A	B	C	D
Barbecho	77	86	91	94
Cultivos alineados R P	72	81	88	91
Cultivos alineados R B	67	78	85	89
Cultivos alineados C P	70	79	84	88
Cultivos alineados C B	65	75	82	86
Cultivos alineados C-T P	66	74	80	82
Cultivos alineados C-T B	62	71	78	81
Cultivos no alineados o surcos pequeños R P	65	76	84	88
Cultivos no alineados o surcos pequeños R B	63	75	83	87
Cultivos no alineados o surcos pequeños C P	63	74	82	85
Cultivos no alineados o surcos pequeños C B	61	73	81	84
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T P	61	72	79	82
Cultivos no alineados o surcos pequeños C-T B	59	70	78	81
Cultivos densos leguminosas R P	66	77	84	88
Cultivos densos leguminosas R B	58	72	81	85
Cultivos densos leguminosas C P	64	75	83	85
Cultivos densos leguminosas C B	55	69	78	83
Cultivos densos leguminosas C-T P	63	73	80	83
Cultivos densos leguminosas C-T B	51	67	76	80
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50%	48	67	77	83
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta 50-75%	35	56	70	77
Matorral, mezcla matorral y maleza Cubierta >75%	30	48	65	73
Montes con pastos P	45	66	77	83
Montes con pastos R	36	60	73	79
Montes con pastos B	25	55	70	77
Bosques MP	56	75	86	91
Bosques P	46	68	78	84
Bosques R	36	60	70	76
Bosques B	26	52	63	69
Bosques MB	15	44	54	61
Prados permanentes	30	58	71	78
Pastizal P	68	79	86	89
Pastizal R	49	69	79	84
Pastizal B	39	61	74	80
Pastizal C P	47	67	81	88
Pastizal C R	25	59	75	83
Pastizal C B	6	35	70	79
Residencial baja densidad	54	70	80	85
Residencial alta densidad	77	85	90	92
Superficies impermeables	98	98	98	98
Espejos de agua	0	0	0	0

R: Laboreo sin prácticas de conservación

C: Curvas de nivel

C-T: Curvas de nivel y Terrazas abiertas

MP: Condición de infiltración muy pobre

P: Condición de infiltración pobre

M: Condición de infiltración regular

B: Condición de infiltración buena

MB: Condición de infiltración muy buena

Tabla 14. Número de curva según Grupo hidrológico y cobertura vegetal y/o uso del suelo.

Las cuencas hidrográficas presentan suelos y coberturas vegetales que no son uniformes en todo su territorio. Es por ello que para asignar un solo NC para toda la cuenca se debe obtener un valor de NC medio ponderado mediante la aplicación de la Ecuación 12 (Muñoz Cárpena y Ritter Rodríguez, 2005).

$$NC_p = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n A_i NC_i \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- A*: Área total de la cuenca.
A_i: Área del polígono correspondiente al *NC_i*.
NC_i: Número de curva del polígono
n: Número de polígonos de diferente NC.

Una vez obtenido el *NC_p* para la cuenca, el escurrimiento se determina con la aplicación de una ecuación empírica. El procedimiento se inicia con la cuantificación de las Pérdidas iniciales (*I_o*) según la Ecuación 13, a partir de la retención potencial máxima (*S*). Para la obtención del valor de *S* se utiliza el NC, obtenido según Tabla 14, y la expresión de la Ecuación 14.

$$I_o = 0,2 \cdot S \quad \text{Ecuación 13}$$

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{NC} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 14}$$

Para establecer el escurrimiento directo (*Q*), se aplica la Ecuación 15, que depende de la Precipitación total (*P*) y Pérdidas iniciales (*I_o*).

$$Q = \frac{(P - I_o)^2}{P + 4 \cdot I_o} = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S} \quad \text{Ecuación 15}$$

Una vez aplicado el método del NC para determinar el escurrimiento directo, se puede graficar el hietograma para una lámina de precipitación, dibujando por medio de columnas apiladas la fracción que escurre (*Q = Pe*), y aquella que no lo hace, denominada pérdidas, representando a la abstracción e infiltración (Gráfico 17).

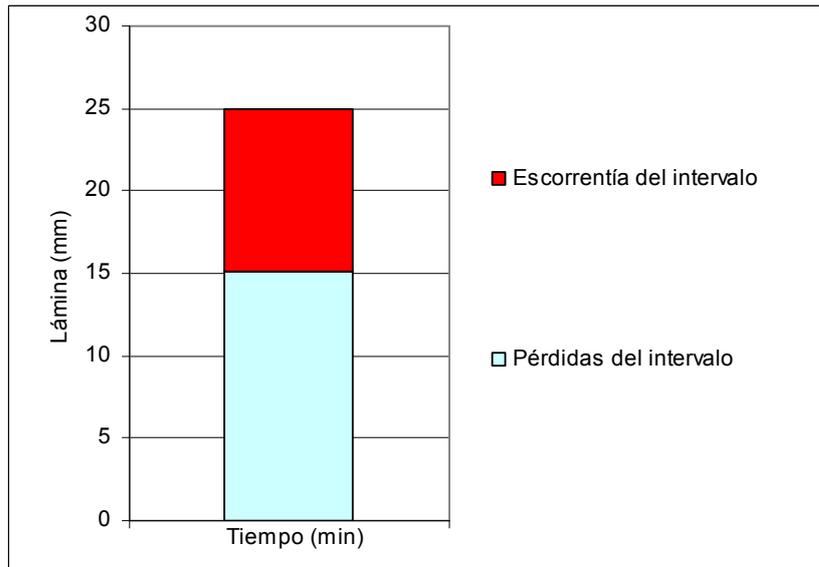


Gráfico 17. Hietograma que expresa las pérdidas y el escurrimiento en un intervalo de tiempo.

Si además del valor total de la precipitación, se dispone de su distribución temporal de la lluvia, se puede repartir la escurrimiento a lo largo del tiempo que dura la precipitación, aplicando para cada intervalo la Ecuación 15.

Para ello se debe tener en cuenta que el escurrimiento comienza una vez superado el umbral de escurrimiento (I_0), es decir que los cálculos se realizan a partir del período donde la precipitación acumulada es mayor que I_0 . Si $I_0 < P_1 \Rightarrow Q_1 = 0$.

Por otro lado, el modelo calcula el escurrimiento para láminas de precipitación total, por lo que los valores de P serán los acumulados hasta el período considerado.

Por último, la lámina de escurrimiento en cada uno de los períodos, será la diferencia entre el escurrimiento total ocurrido hasta dicho período y el ocurrido en el intervalo precedente.

$$\text{Si } I_0 > P_1 \Rightarrow Q_1 = \frac{(P_1 - I_0)^2}{P_1 + 4 \cdot I_0}$$

$$Q_2 = \left[\frac{(P_2 - I_0)^2}{P_2 + 4 \cdot I_0} \right] - \left[\frac{(P_1 - I_0)^2}{P_1 + 4 \cdot I_0} \right]$$

$$Q_n = \left[\frac{(P_n - I_0)^2}{P_n + 4 \cdot I_0} \right] - \left[\frac{(P_{(n-1)} - I_0)^2}{P_{(n-1)} + 4 \cdot I_0} \right]$$

Donde P_n es la precipitación acumulada hasta el intervalo n .

Del total de agua de lluvia que cae sobre la superficie de un terreno, una parte se evapora, otra discurre por la superficie (escurrimiento) y otra penetra en el terreno (infiltración). Conociendo estos conceptos, se define que el coeficiente de

escurrimiento (CE) de una superficie, es el cociente del caudal que discurre por dicha superficie (Q), en relación con el caudal total precipitado (P) (Ecuación 16).

$$CE = Q \cdot P^{-1}$$

Ecuación 16

Chow et al., (1993) establecieron los tipos de usos de la tierra reconocidos y los coeficientes de escurrimiento asociados, según la referencia de la Tabla 15:

TIPOS DE USO DE LA TIERRA	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO:
<i>Sectores urbanos consolidados.</i> Corresponden a la zona urbana consolidada y al área de expansión producida en las últimas décadas, con mayores compacidades de urbanización.	0,70 - 0,95 (sector céntrico) 0,30 – 0,50 (predominio de casas aisladas)
<i>Sectores urbano-industriales e industriales.</i> Corresponde principalmente a los sectores de transición entre la ciudad compacta y áreas rurales, con un diseño de construcción que incorpora la mantención de áreas verdes o al menos de áreas sin edificar en cada sitio, lo que regula los coeficientes de escurrimiento.	0,60 – 0,90
<i>Praderas.</i> Resulta en un comportamiento de los suelos con una alta tasa de infiltración y menores montos de escurrimiento, cuando se localizan en área de suelos de buena calidad.	0,25 – 0,40
<i>Estepa.</i> Permiten inferir buenas condiciones para el drenaje interno de los suelos y la regulación del flujo en estas áreas.	0,10 – 0,22
<i>Cultivos.</i> Representan sitios con una buena infiltración y drenaje en los suelos.	0,30 – 0,40
<i>Casas Quintas.</i> Los suelos en esta categoría, se debe destacar su importancia en la regulación del flujo hídrico al interior de la zona urbana.	0,30 – 0,50

Tabla 15: Coeficientes de escurrimiento según diferentes usos de la tierra.

Ejemplo de aplicación.

Con este ejercicio práctico se pretende afianzar el procedimiento de cálculo para la determinación del escurrimiento superficial en una cuenca real, la Cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande, determinado para una precipitación modal en la región es estudio, para la condición de humedad antecedente media (II).

Para ello se recomienda:

- √ Definir el grupo hidrológico de suelo
- √ Establecer el Número de curva para cada complejo y ponderarlo en la cuenca.
- √ Cuantificar las abstracciones y la escorrentía generada para esa tormenta.
- √ Definir el Coeficiente de escorrentía.

√ Graficar el hietograma expresando los componentes del mismo.

Los datos base se presentan a continuación:

- Precipitación

Duración: 360 minutos.

Intervalo de cálculo: 30 minutos.

Precipitación acumulada: 1,0 – 10,5 – 13,5 – 18,0 – 25,0 – 29,1 – 32,2 – 41,0 – 56,0 – 68,5 – 70,0 – 72,0.

- Cobertura vegetal y/o uso del suelo

La cobertura vegetal y/o uso del suelo en la cuenca se distribuye según las siguientes clases: Bosques, Cultivos alineados (CB), Cultivos alineados (RB), Matorral, mezcla de matorral y maleza (Cubierta mayor del 75%) y Prados permanentes.

- Suelos

El perfil analítico de los suelos se muestra en la Tabla 16, donde se caracteriza cada complejo, que permitirá definir los grupos hidrológicos (GH) de la cuenca.

Complejo de suelos	Nombre de la Serie	Porcentaje de composición	Textura	Permeabilidad
AoPoG	Arroyo Pillahuinco Grande	100	Franco	Moderada
EG2	Semillero Buck	50	Franco a franco arcillosa	Moderada
	Claudio Molina	30	Franco arcillosa	Moderadamente lenta
	El Gavilán	20	Franco arcillo limoso	Lenta
Ph5	Pillahuincó	40	Franco arcillosa	Lenta
	San Gabriel	45	Franco a franco arcillosa	Lenta
	Tres Arroyos	15	Franco a franco arcillosa	Moderadamente lenta
Ph2	Pillahuincó	100	Franco arcillosa	Lenta
RG	Afloramiento de tosca	40	-	Lenta
	Rancho Grande.	60	Franco arcillosa	Moderadamente lenta
TA6	Tres Arroyos	90	Franco a franco arcillosa	Moderadamente lenta
	Pillahuincó	10	Franco arcillosa	Lenta
TA10	Tres Arroyos	80	Franco a franco arcillosa	Moderadamente lenta
	Semillero Buck	10	Franco a franco arcillosa	Moderada
	Pillahuincó	10	Franco arcillosa	Lenta
TA12	Tres Arroyos	80	Franco a franco arcillosa	Moderadamente lenta
	Laprida	20	Franco	Moderada
TA59	Tres Arroyos	50	Franco a franco arcillosa	Moderadamente lenta
	La Loma	20	Franca	Moderada
	Laprida	30	Franco	Moderada

Tabla 16. Perfil analítico de los suelos.

A partir de los datos de la superficie de ocupación (ha) de cada combinación GH – cobertura vegetal (Tabla 17) se determina el NC ponderado.

GH	Vegetación				
	Bosques	Cultivos alineados CB	Cultivos alineados RB	Matorral, mezcla de matorral y maleza. Cubierta > 75%	Prados permanentes
B	133,9	1075,4	6883,8	143,6	896,4
C	26,7	462,3	2035,9	572,8	12892,1

Tabla 17. Superficie de ocupación (ha) de cada combinación suelo/cobertura vegetal

Resultados

A continuación se presenta la secuencia de cálculo para la resolución del ejercicio.

1. Una vez establecido el NC (Tabla 14) para cada combinación suelo/vegetación (Tabla 18) se utiliza la Ecuación 12 para calcular el NC ponderado para la cuenca.

GH	Vegetación				
	Bosques	Cultivos alineados CB	Cultivos alineados RB	Matorral, mezcla de matorral y maleza. Cubierta > 75%	Prados permanentes
B	52	75	78	48	58
C	63	82	85	65	71

Tabla 18. Número de curva Condición II.

El NC ponderado para la cuenca es de 74.

Con este valor se aplica el procedimiento de cálculo siguiente:

$$S = 254 \cdot ((100 / \text{NC}) - 1) = 89,24$$

$$I_o = 0,2 \cdot S = 17,85$$

2. Confeccionar una tabla que integre en la primer columna, la curva de masa de lluvia establecida a partir de la precipitación acumulada (P acum.), para el intervalo establecido (Tiempo) (Tabla 19).

3. Calcular la Precipitación en el intervalo por diferencia (P int).

4. En este ejemplo, en el cual $I_o = 17,85$, cuando la precipitación es igual o supera este umbral comenzará el escurrimiento. Las abstracciones serán iguales a la

precipitación acumulada, hasta que se alcance el umbral (I_o). A partir de allí las abstracciones son constantes e iguales a I_o .

5. Calcular las abstracciones del intervalo por diferencia.

6. Aplicar la Ecuación 15 para calcular el volumen de escorrentía (Q). Como se ha comentado anteriormente, **el escurrimiento comenzará una vez superado el umbral de escorrentía (I_o)**.

7. Calcular la lámina de escurrimiento del intervalo por diferencia.

Tiempo (min)	Precipitación acumulada	Precipitación intervalo	Abstracciones iniciales	Abstracciones del intervalo	Escorrentía acumulada	Escorrentía del intervalo
	P acum	P int	I_o	I_o int	Q	Q int
30	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00
60	10,50	9,50	10,50	9,50	0,00	0,00
90	13,50	3,00	13,50	3,00	0,00	0,00
120	18,00	4,50	17,85	4,35	0,00	0,00
150	25,00	7,00	17,85	0,00	0,53	0,53
180	29,10	4,10	17,85	0,00	1,26	0,73
210	32,20	3,10	17,85	0,00	1,99	0,73
240	41,00	8,80	17,85	0,00	4,77	2,78
270	56,00	15,00	17,85	0,00	11,43	6,66
300	68,50	12,50	17,85	0,00	18,34	6,91
330	70,00	1,50	17,85	0,00	19,24	0,90
360	72,00	2,00	17,85	0,00	20,45	1,21

Tabla 19. Método de cálculo de la lámina de escurrimiento (mm).

El resultado final obtenido para este ejemplo es que la precipitación de 72 mm ha generado un escurrimiento de 20,45 mm (Q).

8. Calcular el Coeficiente de Escorrentía (CE).
Al aplicar la Ecuación 16, se obtiene un CE de 0,28, significando que de los 72 mm precipitados el 28 % se transformaron en escorrentía.

9. Graficar el hietograma. En el mismo se visualiza la distribución en el tiempo del escurrimiento y las pérdidas originadas para la precipitación analizada (Gráfico 17).

10. Para el realizar el gráfico del hietograma se confecciona una planilla de cálculo indicando la pérdida en cada intervalo, por diferencias entre la precipitación del intervalo menos el escurrimiento generado (Tabla 20).

Tiempo (min)	Pint	Escorrentía del intervalo	Perdidas del intervalo
Q int			
30	1,00	0,00	1,00
60	9,50	0,00	9,50
90	3,00	0,00	3,00
120	4,50	0,00	4,50
150	7,00	0,53	6,47
180	4,10	0,73	3,37
210	3,10	0,73	2,37
240	8,80	2,78	6,02
270	15,00	6,66	8,34
300	12,50	6,91	5,59
330	1,50	0,90	0,60
360	2,00	1,21	0,79

Tabla 20. Cálculo de las pérdidas por intervalo.

Con los valores alcanzados en la Tabla 20, se confecciona el hietograma, como gráfico en columnas apiladas.

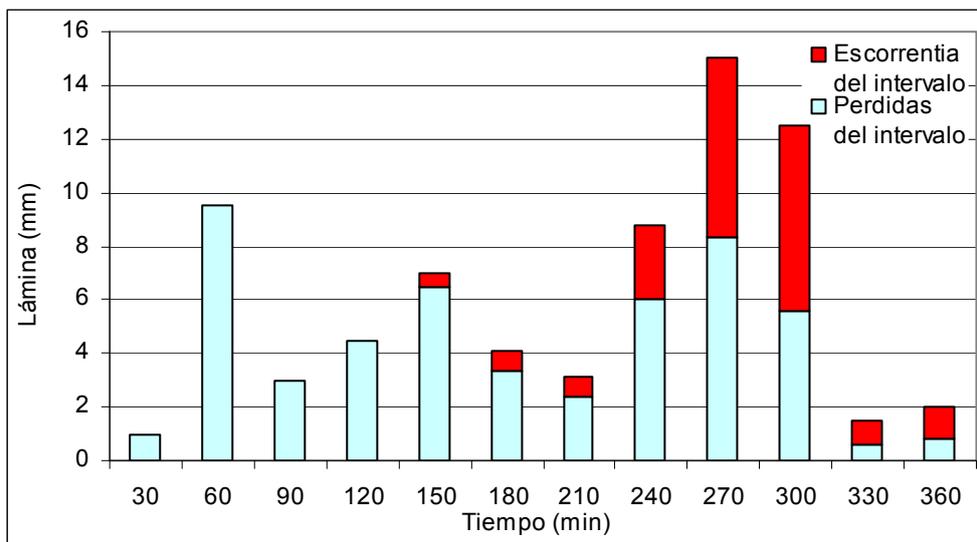


Gráfico 17. Hietograma de la precipitación diferenciando escurrimiento y pérdidas.

Para realizar el análisis en situaciones de sequía, se aplica la condición hidrológica I. Una vez definidos los nuevos NC para esta condición, se procede al cálculo, como se realizó para la condición de humedad antecedente media (II) del suelo (Tabla 21 y 22). El NC ponderado para la cuenca es de 55.

GH	Vegetación				
	Bosques	Cultivos alineados CB	Cultivos alineados RB	Matorral, mezcla de matorral y maleza. Cubierta > 75%	Prados permanentes
B	33	57	61	29	38
C	43	66	70	45	52

Tabla 21. Número de curva Condición I.

Tiempo (min)	Abstracciones iniciales(la)	Abstracciones del intervalo	Escurrimiento acumulada	Escurrimiento del intervalo
30	1,00	1,00	0,00	0,00
60	10,50	9,50	0,00	0,00
90	13,50	3,00	0,00	0,00
120	18,00	4,50	0,00	0,00
150	25,00	7,00	0,00	0,00
180	29,10	4,10	0,00	0,00
210	32,20	3,10	0,00	0,00
240	41,00	8,80	0,00	0,00
270	41,56	0,56	0,94	0,94
300	41,56	0,00	3,09	2,15
330	41,56	0,00	3,42	0,33
360	41,56	0,00	3,89	0,47

Tabla 22. Cálculo de las pérdidas por intervalo.

El resultado final obtenido es que una precipitación de 72 mm ha generado una escurrimiento de 3,89 mm (Gráfico 18). El CE es de 0,054 significando que de los 72 mm precipitados el 5,4 % de los mismos se transformaron en escurrimiento.

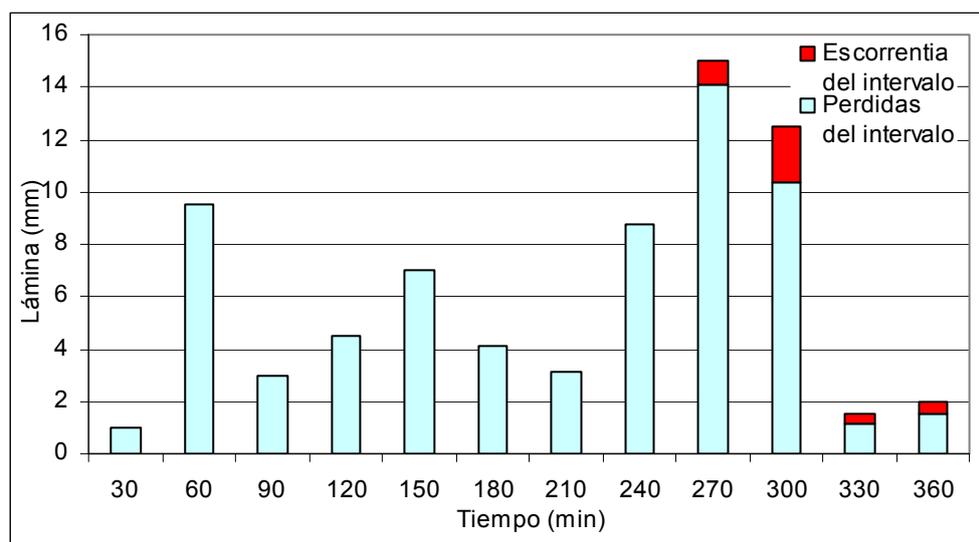


Gráfico 18. Hietograma de la precipitación diferenciando escurrimiento y pérdidas.

Para realizar el análisis en situaciones de exceso hídrico se aplica la condición hidrológica III. Una vez definidos los nuevos NC para esta condición, se procede al cálculo (Tabla 23 y 24). El NC ponderado para la cuenca es de 90.

GH	Vegetación				
	Bosques	Cultivos alineados CB	Cultivos alineados RB	Matorral, mezcla de matorral y maleza. Cubierta > 75%	Prados permanentes
B	72	91	93	68	77
C	81	95	97	83	88

Tabla 23. Número de curva para la Condición III

Tiempo (min)	Abstracciones iniciales(la)	Abstracciones del intervalo	Escurrimiento acumulada	Escurrimiento del intervalo
30	1,00	1,00	0,00	0,00
60	5,64	4,64	0,71	0,71
90	5,64	0,00	1,71	1,00
120	5,64	0,00	3,76	2,05
150	5,64	0,00	7,87	4,11
180	5,64	0,00	10,65	2,77
210	5,64	0,00	12,87	2,23
240	5,64	0,00	19,66	6,79
270	5,64	0,00	32,27	12,61
300	5,64	0,00	43,38	11,11
330	5,64	0,00	44,74	1,36
360	5,64	0,00	46,55	1,82

Tabla 24. Cálculo de las pérdidas por intervalo (en mm).

El resultado final obtenido es que una precipitación de 72 mm ha generado una escurrimiento de 46,55 mm (Gráfico 19). El CE es de 0,65 significando que, de los 72 mm precipitados el 65 % de los mismos se transformaron en escurrimiento.

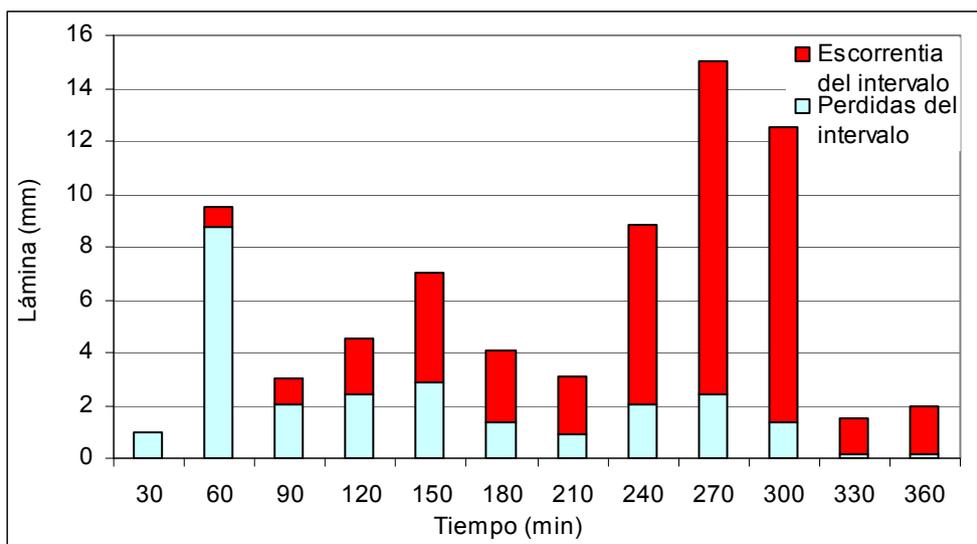


Gráfico 19. Histograma de la precipitación diferenciando escurrimiento y pérdidas.

GUÍA PRÁCTICA PARA LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA CON EL MODELO HEC – HMS

(Hydraulic Engineering Center - Hydrologic Modeling System)

Debido a las limitaciones en las técnicas de medición de fenómenos del mundo real, modelos de simulación proveen medios de extrapolación cuantitativa o predicción, que permiten simular estados de un sistema hidrológico real cuando no hay datos disponibles en el espacio o en el tiempo, y conocer el impacto de futuros cambios hidrológicos (Urciuolo et. al., 2007).

Los modelos hidrológicos, al ser una representación incompleta de la realidad, no pueden responder a todos los aspectos del mundo real, es por ello que debe considerarse al momento de elegir un modelo y realizar simulaciones, el objetivo para el cual fue creado, la exactitud de la respuesta, las rutinas y subrutinas que lo componen y las variables entrada que utiliza (disponibilidad de bases de datos o costo y tiempo para su relevamiento) (Gaspari et. al., 2009). Un modelo hidrológico consta de entradas y salidas que son variables hidrológicas mensurables y su estructura un conjunto de ecuaciones que conectan estas entradas y salidas (Chow et. al., 1994).

El centro de Ingeniería Hidrológica, del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los EEUU, diseñó el programa de computación Sistema de Modelamiento Hidrológico (HEC-HMS), este provee una variedad de opciones para simular procesos de precipitación - escurrimiento y también transito de caudales entre otros (US Army, 2009). HEC-HMS es un modelo agregado debido a que el alcance espacial se limita a un punto, cada unidad (subcuenca) es tratada como un promedio ponderado de la superficie real. Es un programa libre de acceso gratuito en la web, que permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escurrimiento, a través de un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos ya sea concentrados o distribuidos para el tránsito de caudales. Esta particularidad le otorga gran flexibilidad ya que permite combinar diferentes rutinas obteniendo así una mayor aproximación a la realidad. El enlace web es: www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/

El HEC-HMS comprende una interfaz gráfica para el usuario (GUI), componentes de análisis hidrológicos, capacidades para manejo y almacenamiento de datos, y facilidades para expresar los resultados mediante gráficas y reportes tabulados. La GUI provee los medios necesarios para especificar los componentes de la cuenca y para visualizar los resultados (US Army, 2009).

Ejemplo de aplicación.

A continuación se presenta un ejemplo de aplicación en una cuenca con una subdivisión en tres subcuencas, con características particulares de lluvias, uso del suelo y edáficas. El modelo básico se establece por la elección de los métodos de aplicación para la modelización tanto del escurrimiento superficial como el caudal de avenida erogado en cada unidad hidrológica.

La ejecución de una simulación en el HEC-HMS, requiere las siguientes especificaciones:

1. Modelo de Cuenca, contiene parámetros y datos conectados para elementos hidrológicos. Los tipos de elementos son: Subcuencas, tramos de tránsito, uniones, embalses, fuentes, derivaciones y sumidero.

2. Modelo Meteorológico, consiste en datos meteorológicos e información requerida para procesarlos.
3. Especificaciones de Control, con el cual se especifica información de relación tiempo para efectuar la simulación.

La metodología de aplicación de para cada una de las especificaciones técnicas es la siguiente:

1. **Modelo de Cuenca:** Se requiere la selección y especificación de los siguientes parámetros:

- 1.1. **Subcuenca:** Es el elemento donde se genera la escorrentía a partir de una precipitación determinada. Requiere los siguientes parámetros:

- 1.1.1. **Conexión:** Se define el elemento hacia el cual fluye el hidrograma de salida de la cuenca.

- 1.1.2. **Área:** Superficie de cada subcuenca que conforma el sistema de drenaje completo, expresada en km^2 .

- 1.1.3. **Método de pérdidas:** Se seleccionó el Método del Número de curva, asignando el NC ponderado en función de la superficie para cada una de las subcuencas a través de la Ecuación 12 del capítulo de NC.

- 1.1.4. **Método de transformación:** Como ejemplo se utilizará el método de transformación del SCS desarrollado a partir de los datos observados recogidos en pequeñas cuencas agrícolas. El hidrograma general es escalado por el lapso de tiempo para producir el hidrograma unitario, donde el 37,5% del volumen de escorrentía se produce antes del flujo máximo y la base de tiempo del hidrograma es cinco veces el retraso. Estudios realizados por el SCS encontraron que en general el tiempo de retraso se puede aproximar al tomar el 60% del tiempo de concentración (T_c) (US Army, 2009).

El tiempo de concentración puede ser calculado a partir de diferentes ecuaciones, siendo las más conocidas: Kirpich y Dirección General de Carreteras, de España, donde T_c es el tiempo de concentración (en horas), L es la longitud del cauce principal (expresada en kilómetros) y J es la pendiente media de la cuenca (expresada en metro/metro). Para su cálculo aplicar la ecuación 9 o 10.

Una vez obtenido el T_c se calcula el Tiempo de retraso (T_{lag}) como un 60% del tiempo de concentración: $T_{lag} = 0,6 \cdot T_c$

- 1.2. **Tramos de tránsito:** Corresponde a cada tramo del curso de agua que conecta las diferentes subcuencas hacia la salida. Requiere los siguientes parámetros:

- 1.2.1. **Conexión:** Se define el elemento hacia el cual fluye el hidrograma de salida del tramo

- 1.2.2. **Método de tránsito:** La ejecución de este método utiliza como parámetros de entrada para cada uno de los cauces que son conectores hidráulicos entre subcuencas, el largo total del tramo (expresada en metros), la pendiente expresada (en metro/metro), y los números de Manning del margen derecho, izquierdo y lecho, y una sección transversal del cauce (x ; y). Para ello se utilizará el método Muskingum-Cunge Eight Point, el cual define la geometría del canal utilizando ocho puntos de una sección transversal, para la especificación apropiada del radio hidráulico. Estos puntos se toman como cota sobre el nivel del mar (msnm) (Figura 19).

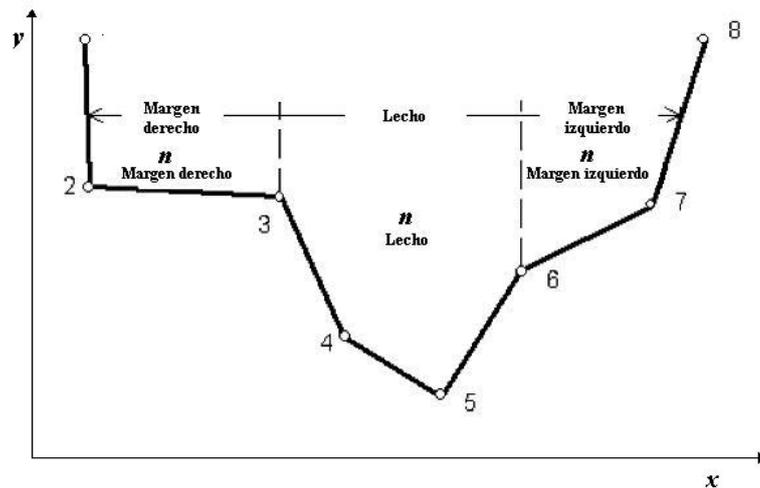


Figura 19: Formato para describir la geometría de canal con 8 puntos.
Adaptado de Technical Reference Manual HEC HMS 3.1.0

1.3. **Unión:** Constituye el punto de encuentro de dos o mas elementos. Requiere el siguiente parámetro:

1.3.1 **Conexión:** Se define el elemento hacia el cual fluye el hidrograma de salida de la unión.

1.4. **Sumidero:** Representa la salida o punto de cierre de la cuenca.

2. **Modelo Meteorológico.** Especificación del Hietograma: El modelo meteorológico será elaborado a partir de fajas pluviográficas. Cada uno de los modelos meteorológicos se crea a partir de una curva de masa de lluvia con intervalos cada 30 minutos especificando el día y hora de comienzo de la precipitación.
3. **Especificaciones de Control.** En este ítem se detallan el día y hora de inicio de la simulación, a partir del cual se comenzarán a los cálculos, y día y hora de la supuesta finalización de la modelización.

La metodología para la modelización hidrológica aplicando el HEC-HMS 3.4 se presenta a continuación.

A) Creación de un proyecto en HEC-HMS 3.4

1. Ejecute HEC-HMS.

El modelo cuenta con una interfaz gráfica a fin de facilitar al usuario todas las operaciones necesarias para realizar una simulación hidrológica. En la figura 20 se detallan los componentes de la interfaz gráfica.

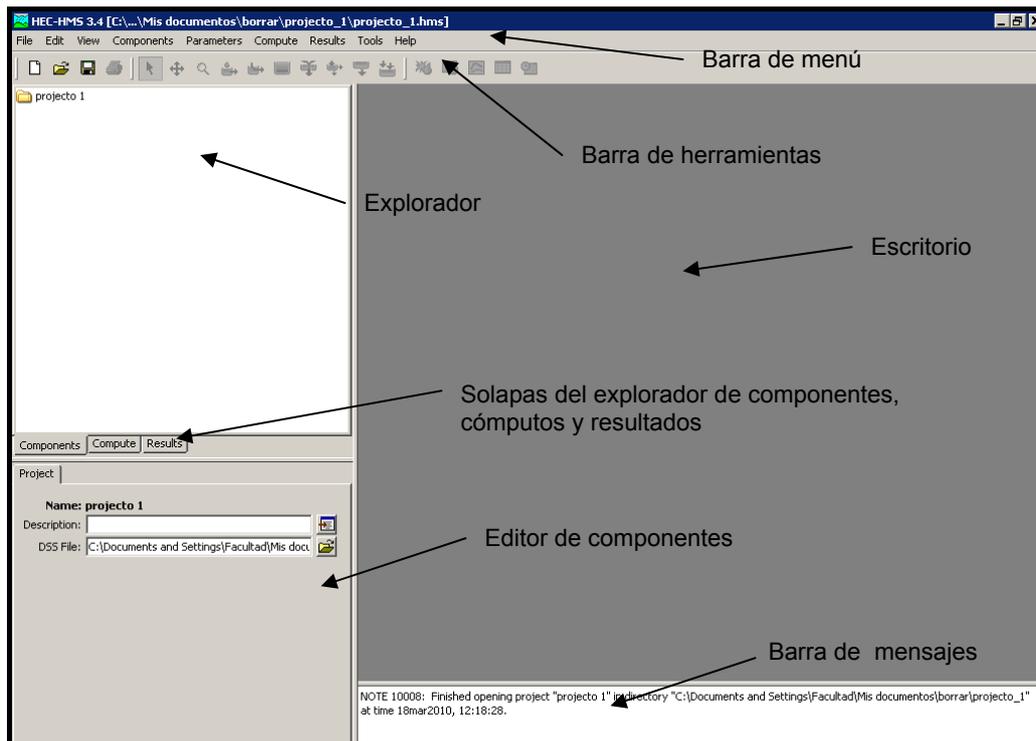


Figura 20. Componentes de la interfaz gráfica.

2. Cree un nuevo proyecto con directorio utilizando el icono  ó desde la barra de menú **File/New...**(Figura 21)

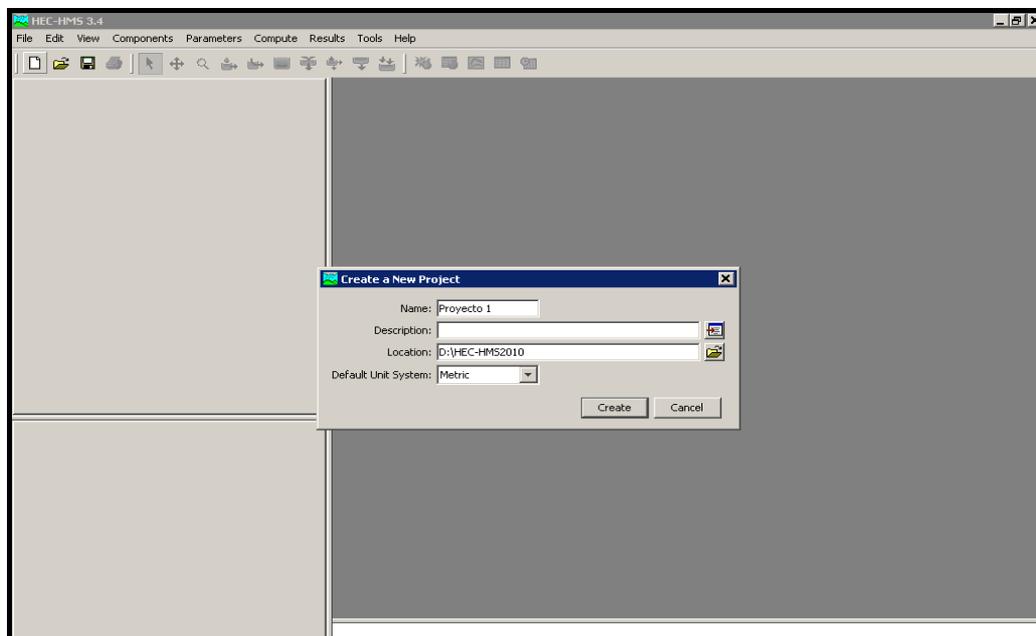


Figura 21. Creación de un proyecto.

3. Sobre la barra de menú haga clic en **Tools / Program settings** y seleccione la solapa **defaults** para seleccionar los métodos de cálculo de las variables de los componentes a ser creados (Figura 22).

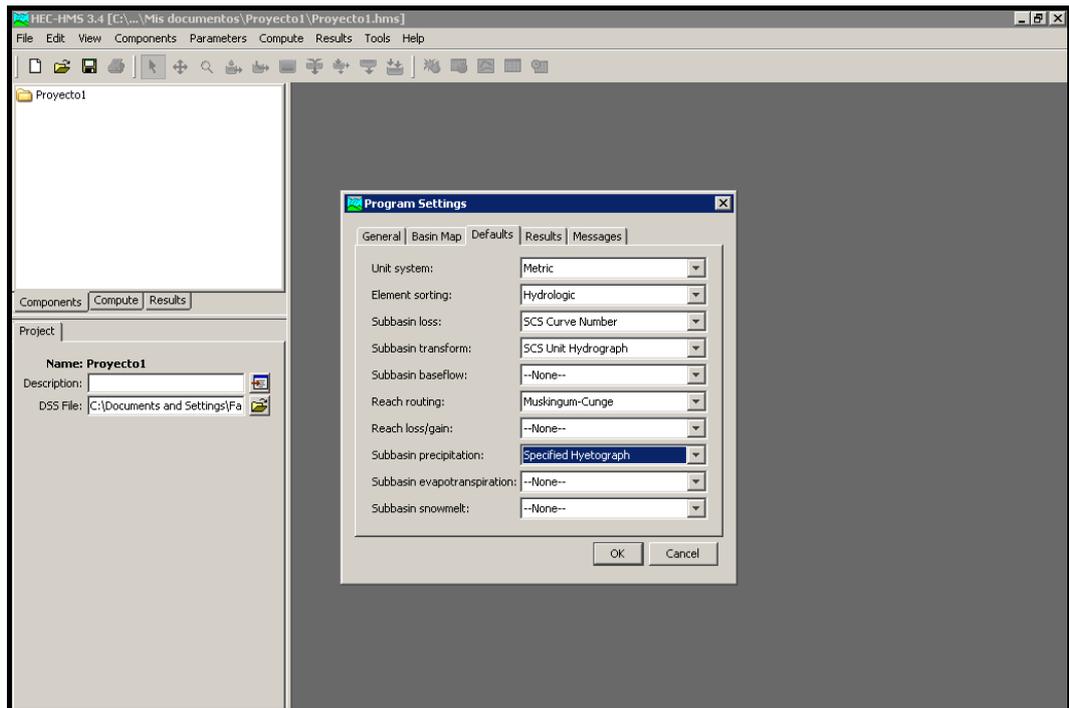


Figura 22. Asignación de los métodos de cálculo de las variables de los componentes.

B) Creación del modelo de cuenca

1. Cree un modelo de cuenca, para ello en la barra de menú haga clic en **Components / Basin Model Manager**. Se abrirá un cuadro de diálogo, haga clic en **New...** nombre su modelo de cuenca (Figura 23).

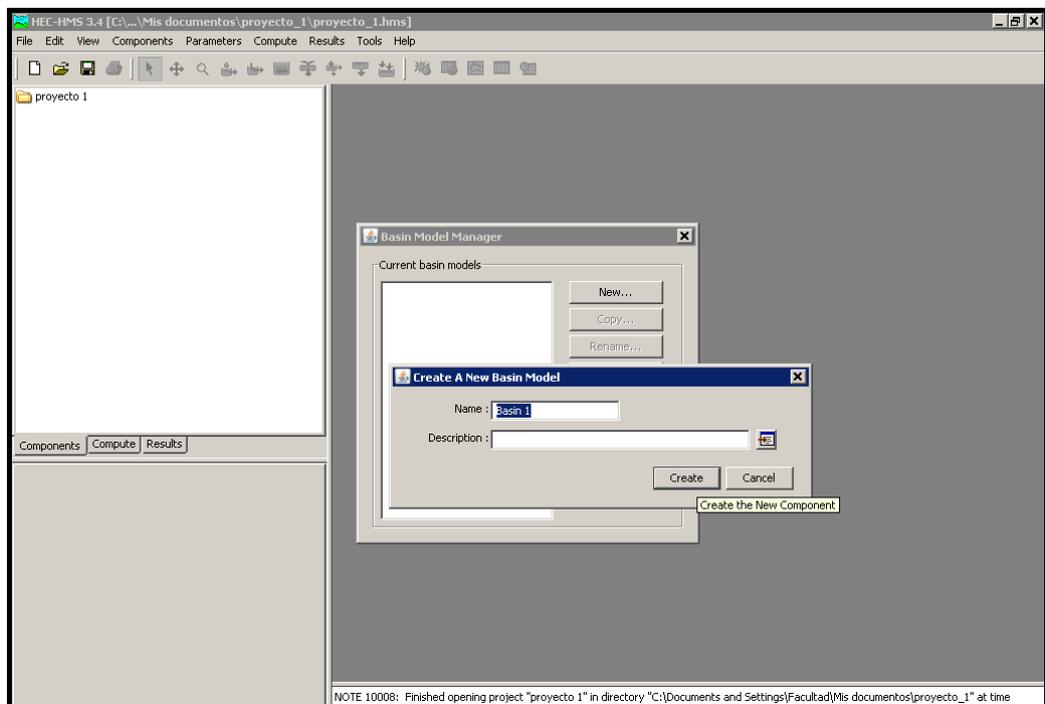


Figura 23. Creación del modelo de cuenca.

- De modo opcional, una vez creado el modelo de cuenca, pueden cargarse mapas de fondo con el fin de facilitar la creación de elementos del modelo de cuencas. Para ello haga clic en el explorador y en la barra de menú seleccione, **View / Background maps**, haga clic en **add...** y seleccione los archivos drenaje.shp, repita el proceso y seleccione subcuencas.shp (Figura 24).

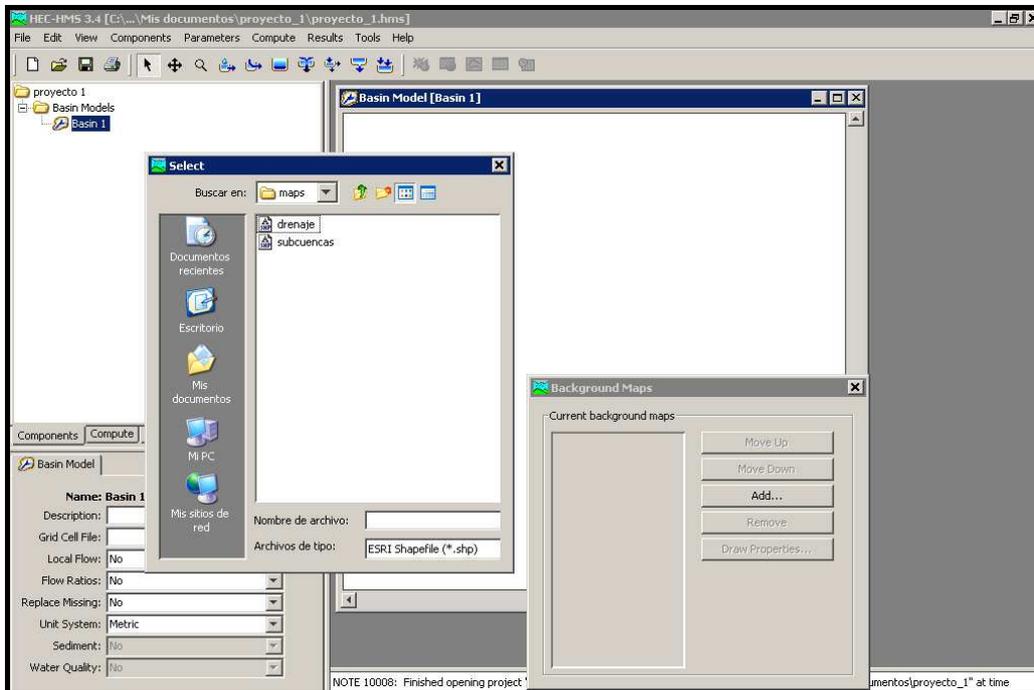


Figura 24. Adición de mapas de fondo.

Una vez incorporados los archivos, se visualizarán los mapas cargados (Figura 25).

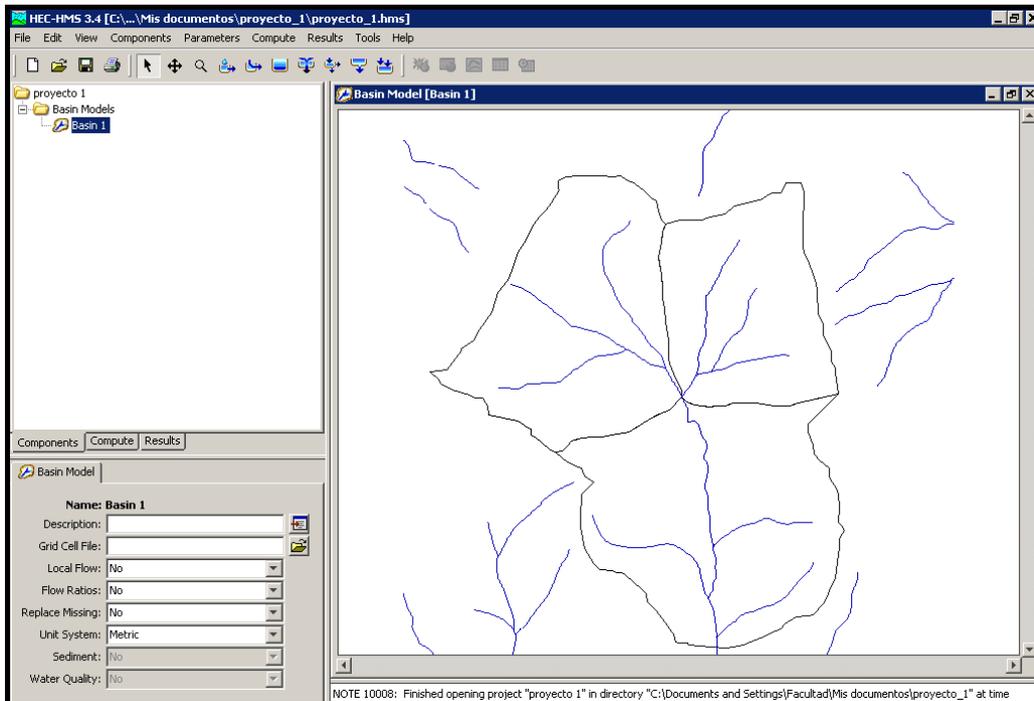


Figura 25. Visualización de mapas de fondo en el escritorio de HEC HMS.

3. A continuación, se crearán los elementos, que en nuestro caso 3 subcuencas (**subbasin**), un río (**reach**) y una salida (**sink**). Para la creación de dichos elementos utilice la barra de creación de elementos ubicada en la barra de herramientas (Figura 26).

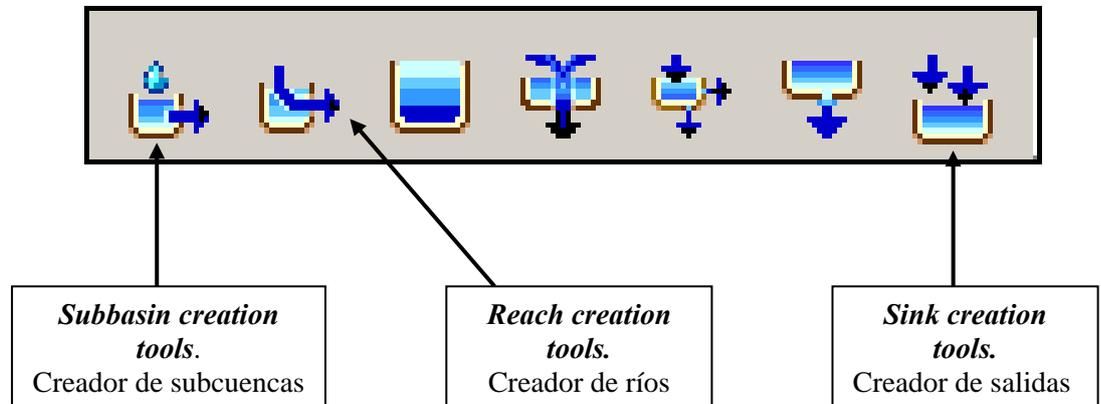


Figura 26. Barra de creación de elementos.

Haga clic sobre el icono del elemento ha ser creado y luego clic sobre el escritorio, nombre el elemento (Figura 27).

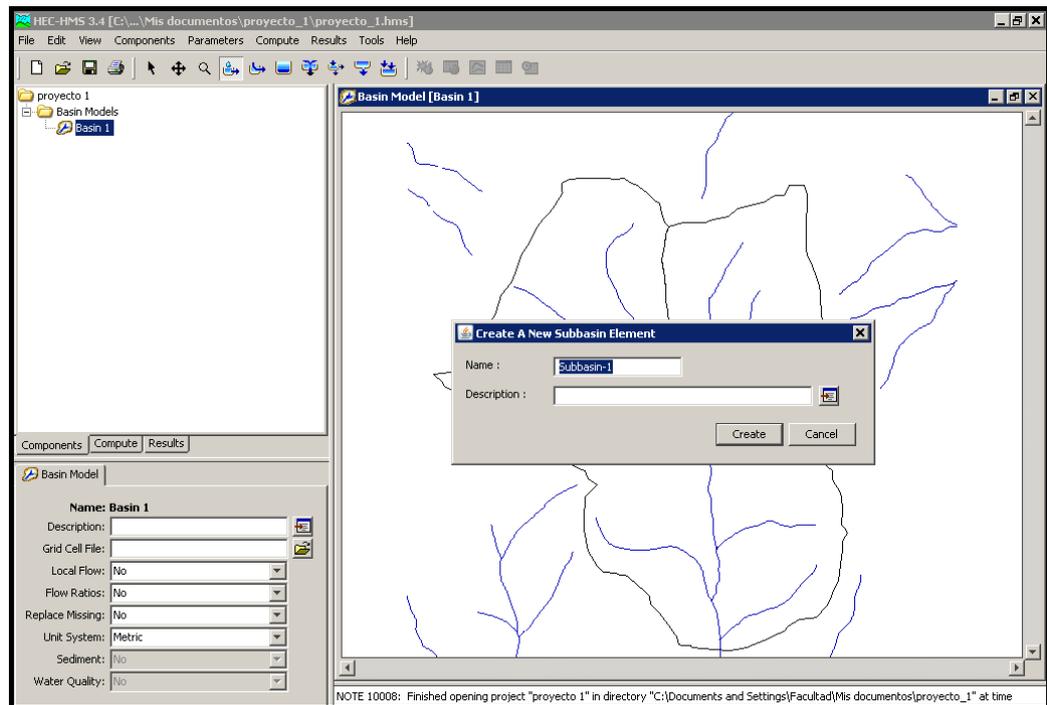


Figura 27. Creación y denominación de elementos.

Reitere la operación para cada uno de los elementos que desee crear (Figura 28).

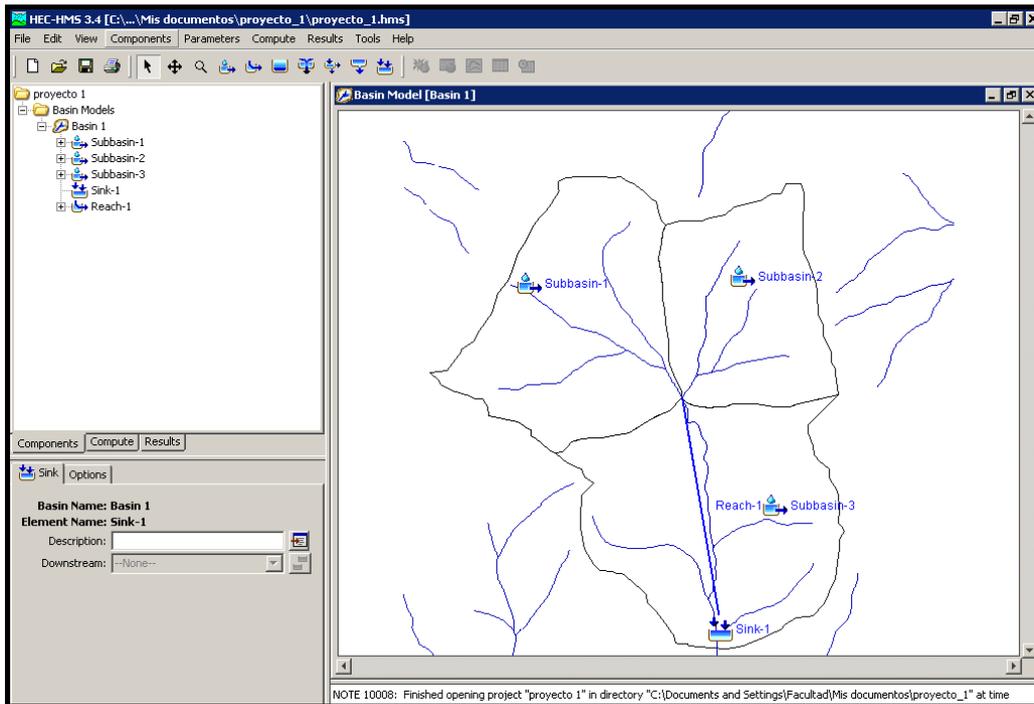


Figura 28. Creación de todos los elementos del modelo de cuenca.

4. Una vez creados los elementos del modelo de cuenca, debe editarlos a fin de darles sus características propias. Los elementos pueden ser editados de a uno, con el editor de componentes, o también desde la barra de menú asignar parámetros, a partir de un listado de elementos. A continuación se detalla esta última opción.
5. Asignación de áreas de subcuencas. Haga clic en la barra de menú / **Parameters / Subbasin Area**. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignarán las áreas de las subcuencas (Figura 29).

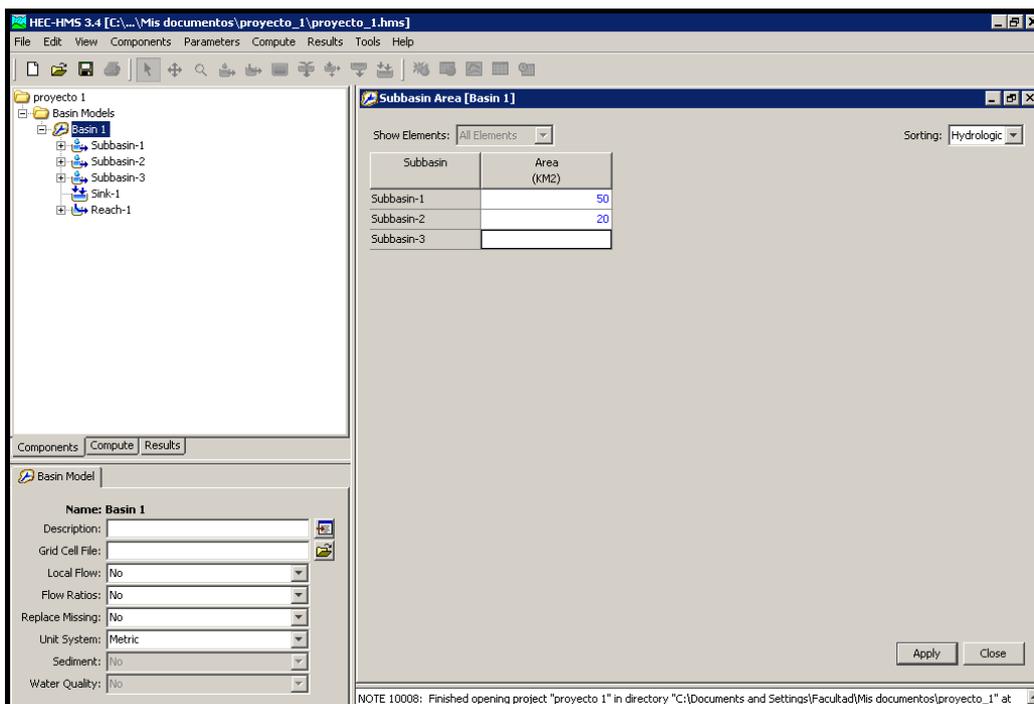


Figura 29. Asignación de áreas de subcuencas.

- Asignación del método de transformación de lluvia – escorrentía. En este caso se aplicará el método del Número de curva. Haga clic en la barra de menú / **Parameters / Loss / SCS Curve Number**. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignarán los números de curva de cada subcuenca. El cuadro de diálogo consta de 3 columnas para editar, la primera es la abstracción inicial, (si se deja vacía, HEC HMS la calcula como $0,2 \cdot S$). La segunda es el número de curva ponderado para la subcuenca y la tercera corresponde al porcentaje de área impermeable presente en la cuenca (Figura 30). En el caso de existir dicha área, no debe ser incluida en el cálculo de ponderación, ya que se estaría ponderando dos veces en el cálculo.

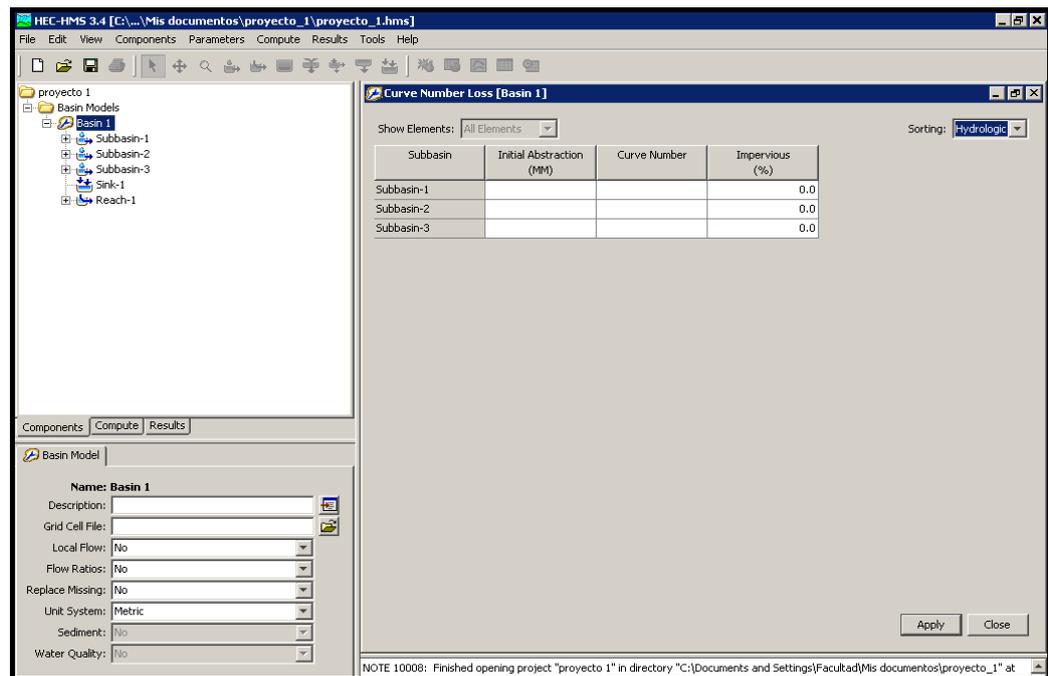


Figura 30. Asignación de Números de curva a las subcuencas.

- Transformación de la escorrentía en hidrograma. Haga clic en la barra de menú / **Parameters / Transform / SCS Unit Hydrograph**. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignarán los valores de tiempo de retraso (**Lag Time = Tlag**) de cada subcuenca (Figura 31).

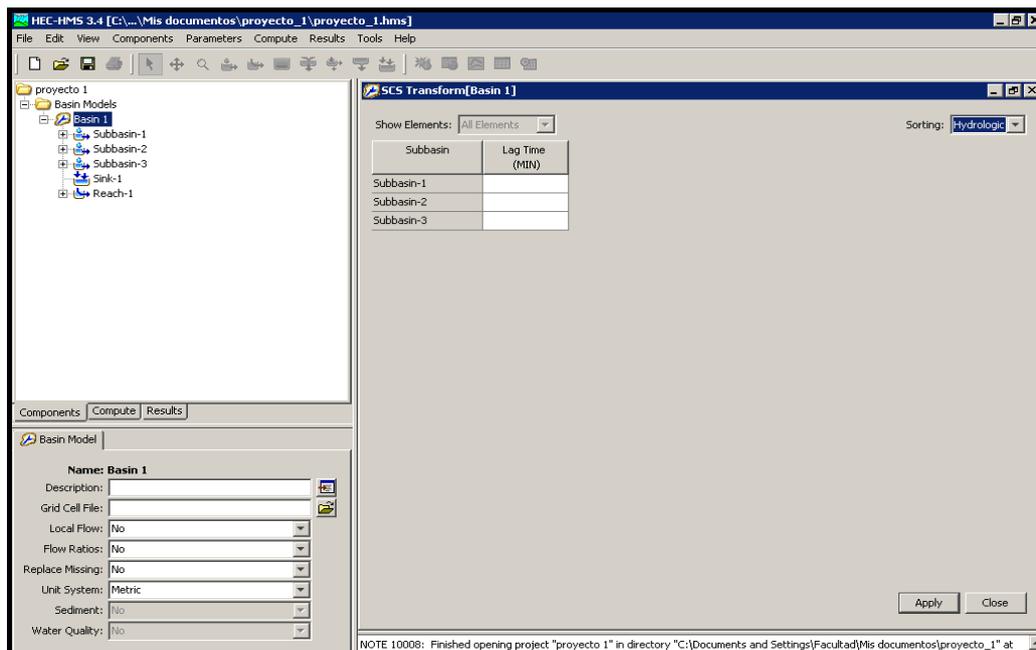


Figura 31. Asignación de tiempos de retraso a las subcuencas.

8. Método de traslado de caudales por el cauce. Haga clic en la barra de menú / **Parameters / Routing / Muskingum Cunge**. Se desplegará sobre el escritorio un cuadro de diálogo donde se asignarán los valores de **largo del cauce**, **pendiente**, **número de Manning del lecho** y selección de **tipo de conducto** de los ríos. En el ejemplo de aplicación se utilizará el **Eighth Point** (Figura 32).

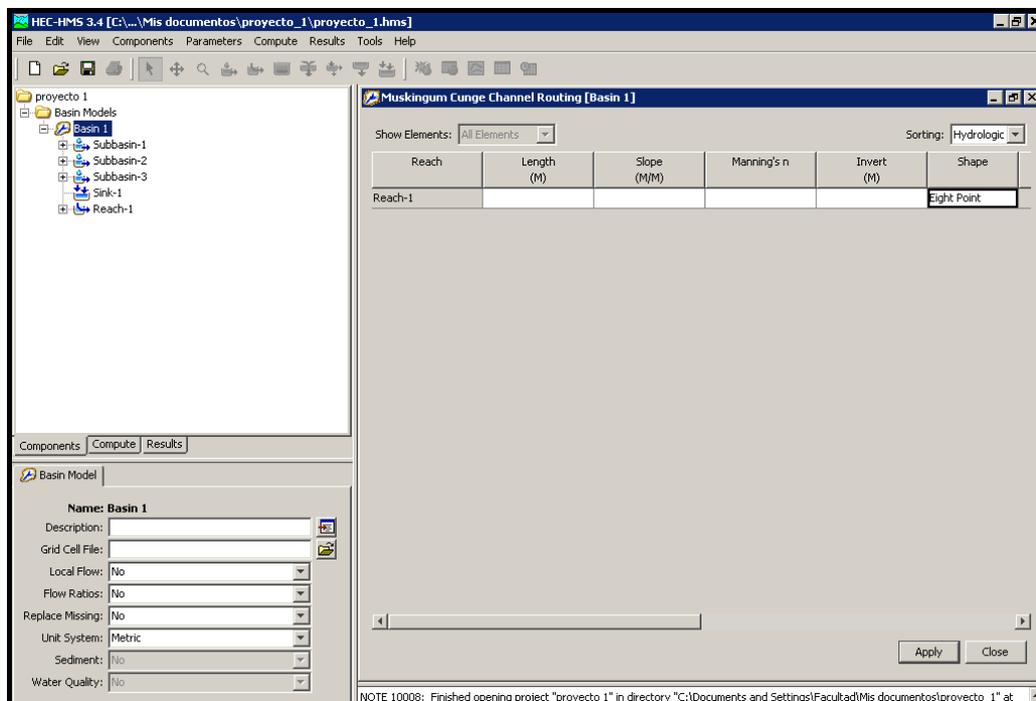


Figura 32. Asignación de las características del cauce.

9. Conexión de los elementos. Consiste en asignarle a los elementos el sentido de flujo del agua, es decir hacia que elemento circula el agua desde un elemento determinado. Para poder asignar esta conexión, haga clic en el

explorador sobre el elemento a conectar. En el editor de componentes, seleccione del menú desplegable, ubicado a la derecha de **Downstream**, el elemento hacia el cual debe erogar el elemento seleccionado (Figura 33). Repita el proceso para todos los elementos.

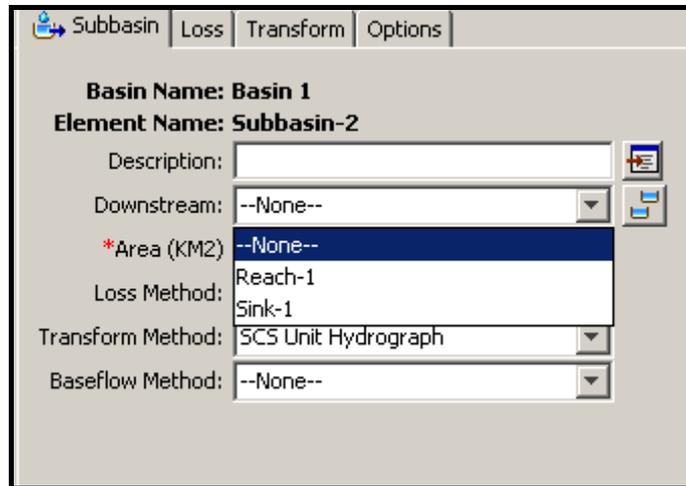


Figura 33. Conexión de elementos.

- Definición de la sección / corte transversal / perfil. En la barra de menú haga clic en **Components / Paired Data Manager**. Aparecerá un cuadro de diálogo con un menú desplegable, seleccione **Cross Sections** para este estudio, y haga clic en **New...** asigne un nombre a la tabla (Figura 34).

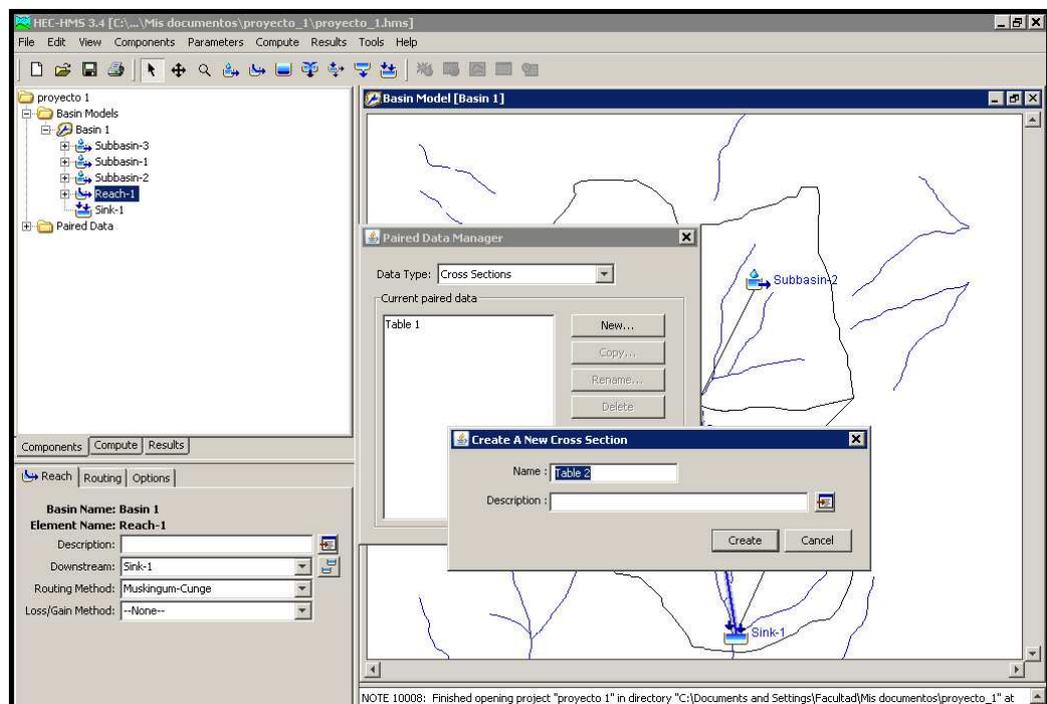


Figura 34. Creación de una tabla de perfil transversal al cauce.

- En el explorador abra la carpeta **Paired Data** y dentro de ella abra la carpeta **Cross Sections**, allí estará la tabla creada anteriormente. Con esta tabla, en el editor de componentes, seleccione la solapa **Table** y complete los pares de

valores de distancia – elevación (**Station, Elevation** respectivamente) (Figura 35). Podrá visualizar el perfil en la solapa **Graph** del editor de componentes. Es importante recordar que los datos de elevación deben ser incorporados como cota sobre el nivel del mar.

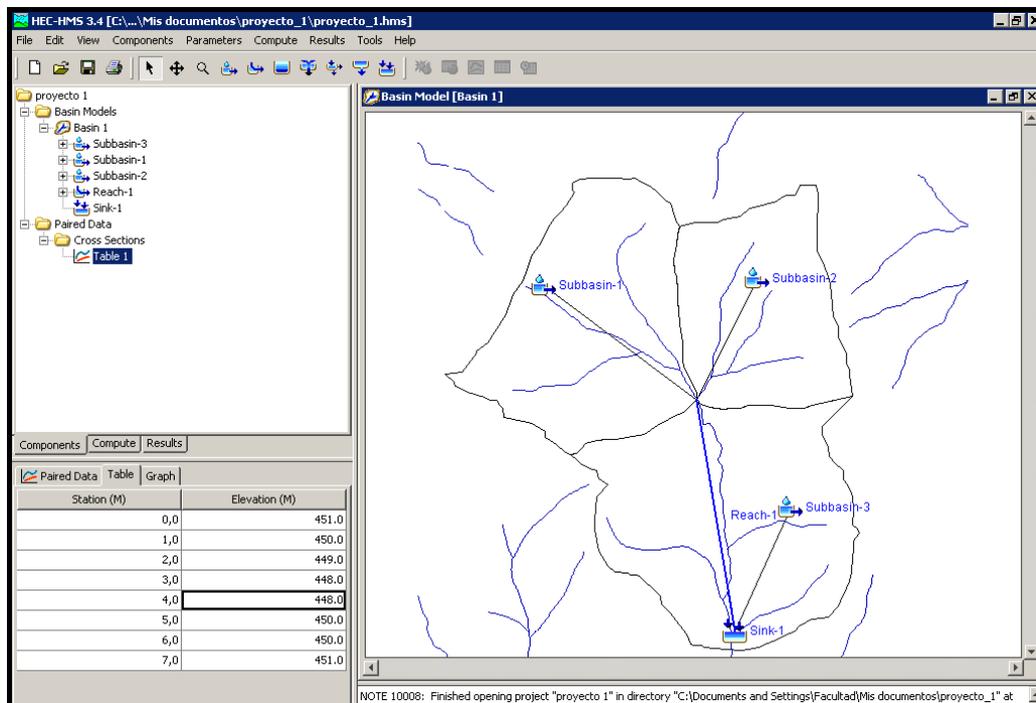


Figura 35. Asignación de valores de distancia – elevación del perfil.

- Para asignar dicha tabla al río, seleccione en el explorador dicho elemento. En el editor de elementos seleccione la solapa **Routing**, y en el ítem **Cross section** aparecerá un menú desplegable en el cual deberá seleccionar la tabla correspondiente al perfil de dicho cauce (Figura 36). Luego complete los valores de número de Manning correspondientes a las planicies izquierda y derecha (Left Manning's n y Right Manning's n, respectivamente).

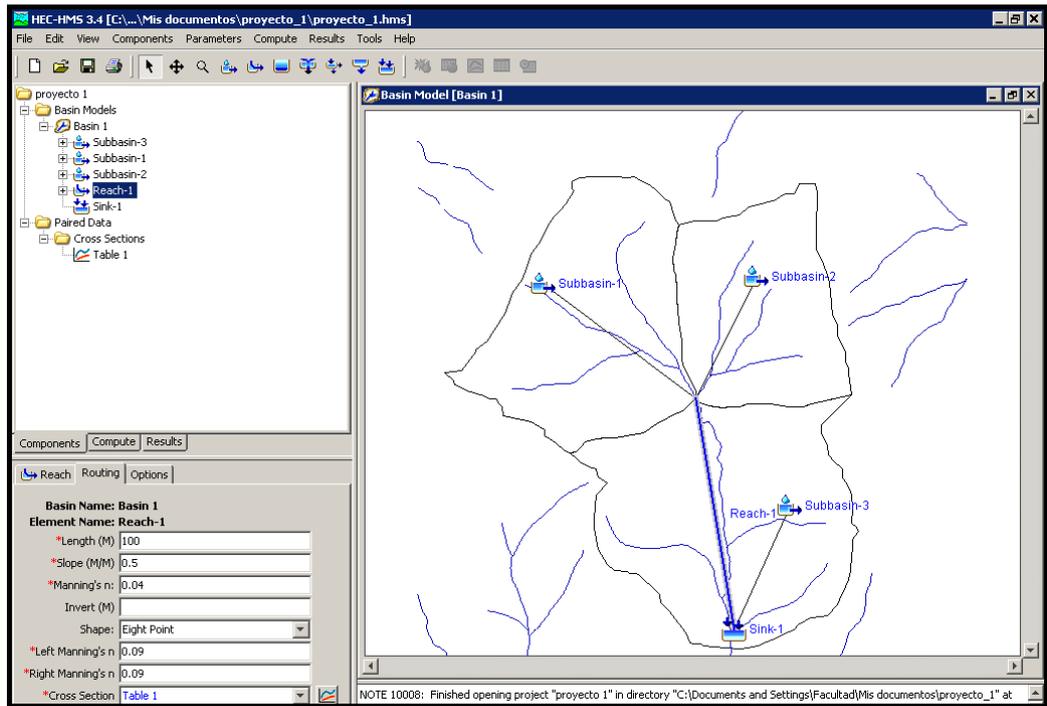


Figura 36. Asignación de números de Manning y del perfil transversal al río.

C) Creación del modelo meteorológico

1. Cree un modelo meteorológico. Para ello, en la barra de menú haga clic en **Components / Meteorologic Model Manager**. Se abrirá un cuadro de diálogo, haga clic en **New...** y nombre su modelo meteorológico (Figura 37).

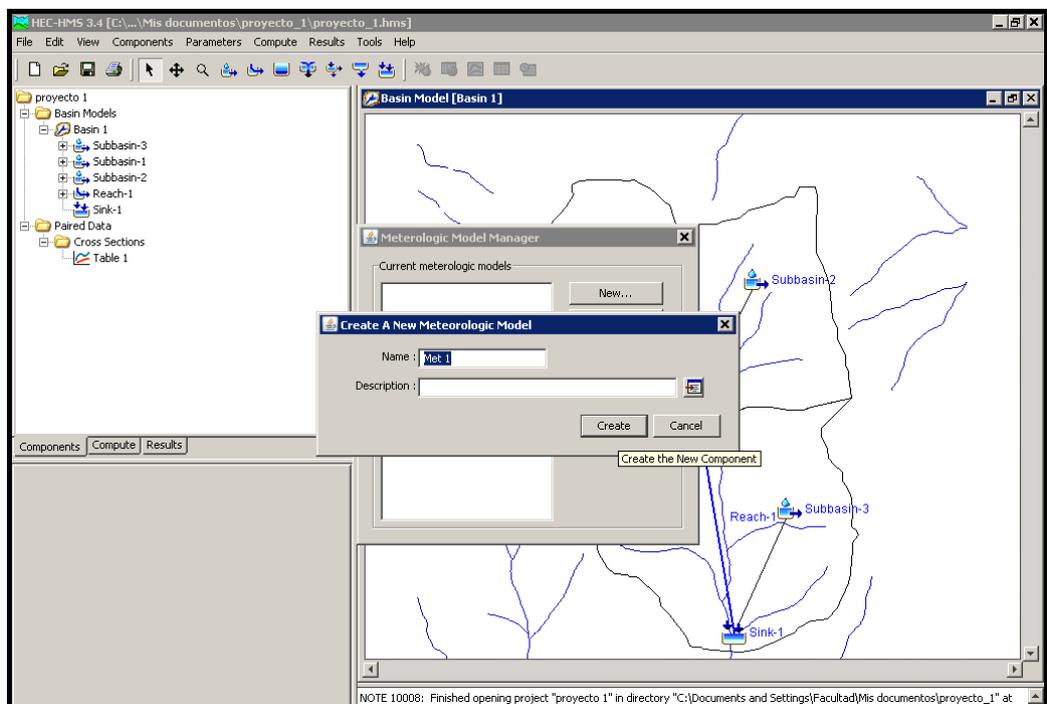


Figura 37. Creación de un modelo meteorológico.

2. El modelo meteorológico consiste en un evento de precipitación que se deberá asignar a cada subcuenca. Para crear una tormenta, en la barra de menú haga clic en **Components / Time-Series Data Manage**. Se abrirá un cuadro de diálogo con un menú desplegable, seleccione **Precipitation Gages** y haga clic en **New...** de nombre a la tormenta, repita el proceso para crear nuevas tormentas (Figura 38).

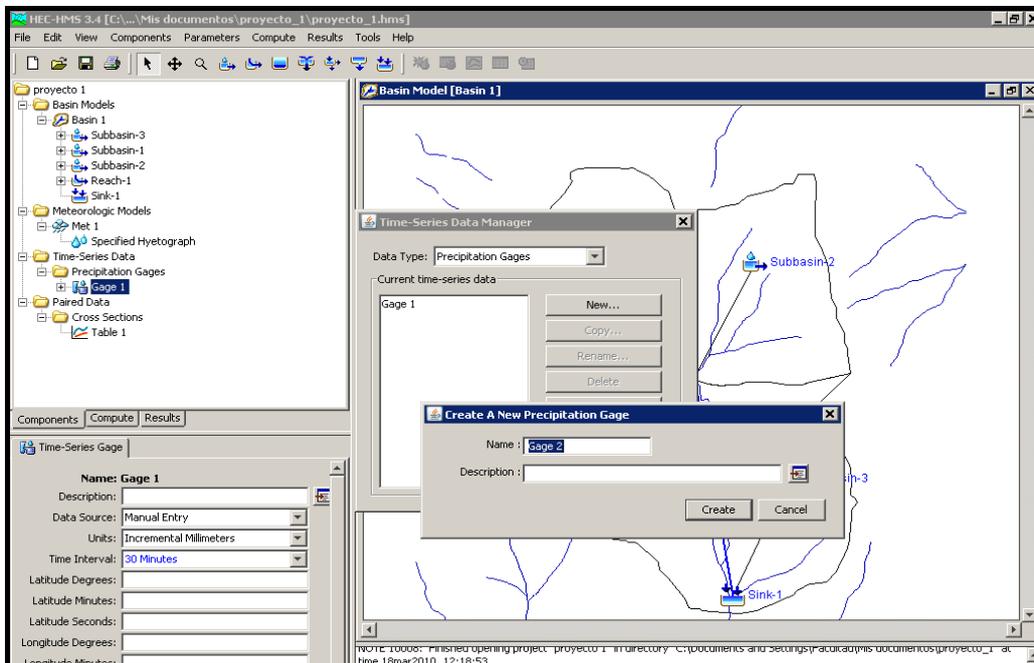


Figura 38. Creación de tormentas.

3. Para asignar valores de precipitación a las tormentas creadas con anterioridad, en el explorador abra la carpeta **Time-Series Data / Precipitation Gages** y haga doble clic sobre la tormenta a editar (aparecerá un dato de inicio y fin de la tormenta por defecto) y luego selecciónela. En el editor de elementos seleccione la solapa **Time-Series Gage**, seleccione el tipo de unidades y el intervalo de tiempo a través de los menús desplegables. En este ejemplo de aplicación, se utilizará una curva de masa de lluvia, cuya unidad será **Cumulative millimeters** y el intervalo será de **30 minutos** (Figura 39).

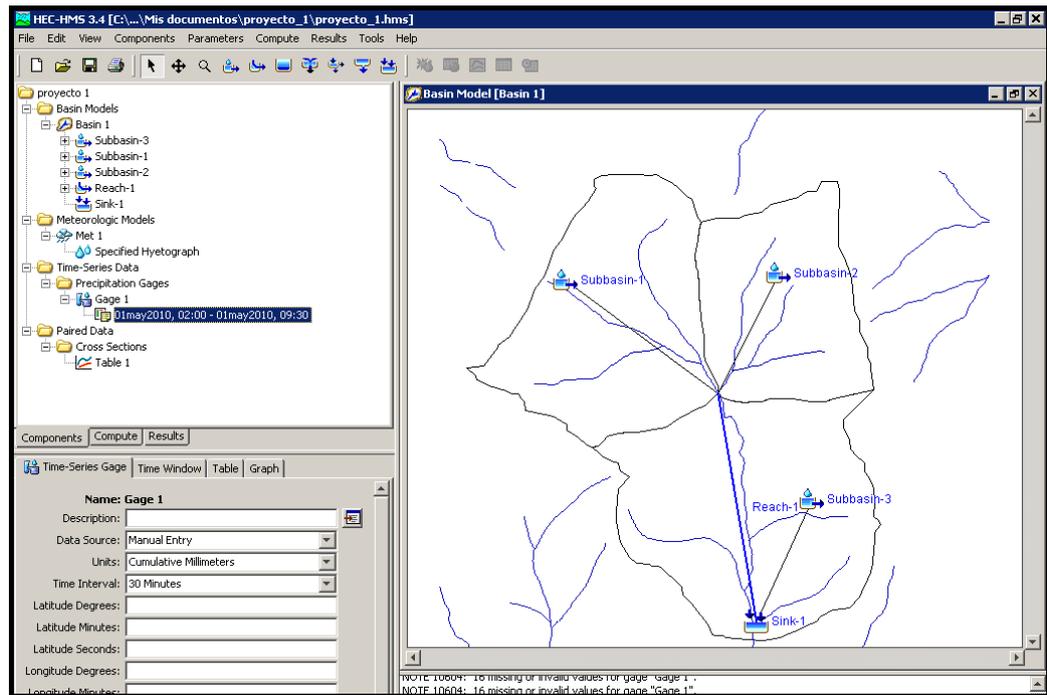


Figura 39. Asignación de las características de la tormenta.

4. En la solapa *Time Windows* asigne los datos de día y hora de comienzo (**Start Date, Start Time**) y fin (**End Date, End Time**) de la precipitación (Figura 40).

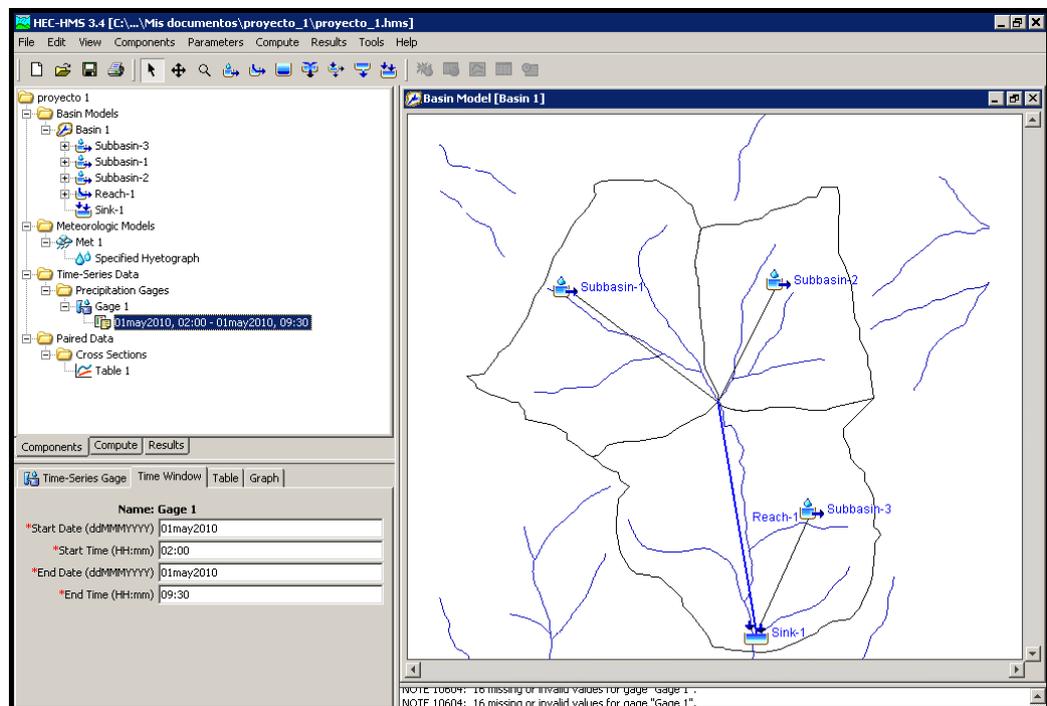


Figura 40. Asignación de día y hora de comienzo y fin de la precipitación.

5. En la solapa *Table* complete los valores de precipitación acumulada (Figura 41). Podrá visualizar el perfil en la solapa *Graph* del editor de componentes. Repita el proceso para cada una de las precipitaciones creadas con anterioridad.

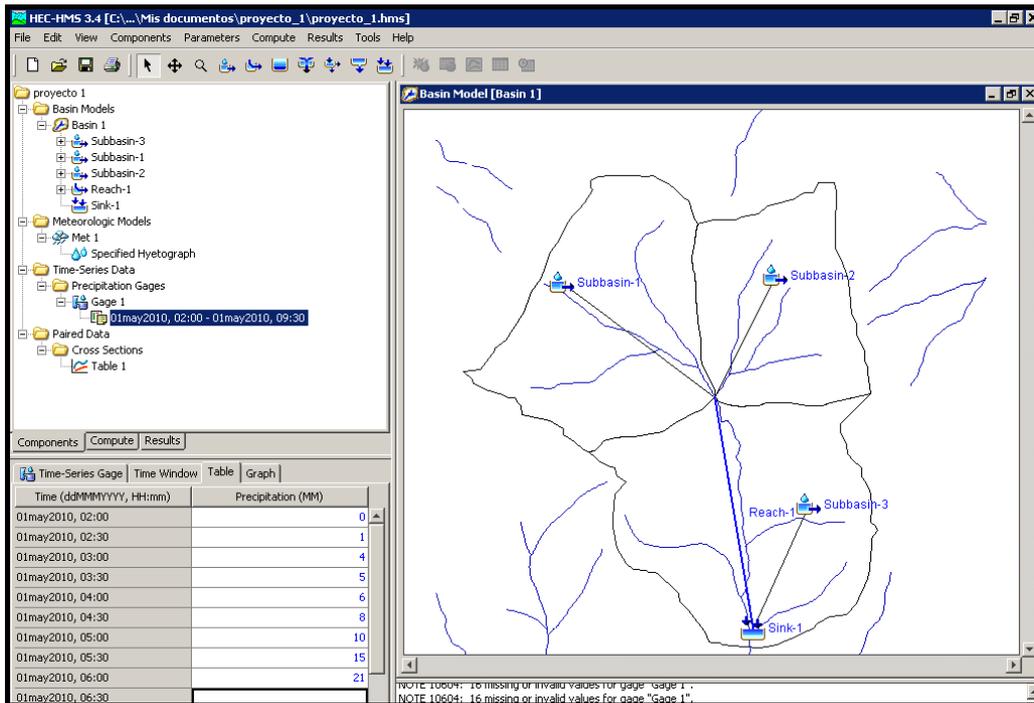


Figura 41. Asignación de valores de lámina de la precipitación.

- En el explorador seleccione dentro de la carpeta **Meteorologic Models** el modelo meteorológico creado, dentro del editor de elementos seleccione la solapa **Basins** y del menú desplegable elija la opción **Yes** para incluir las subcuencas (Figura 42).

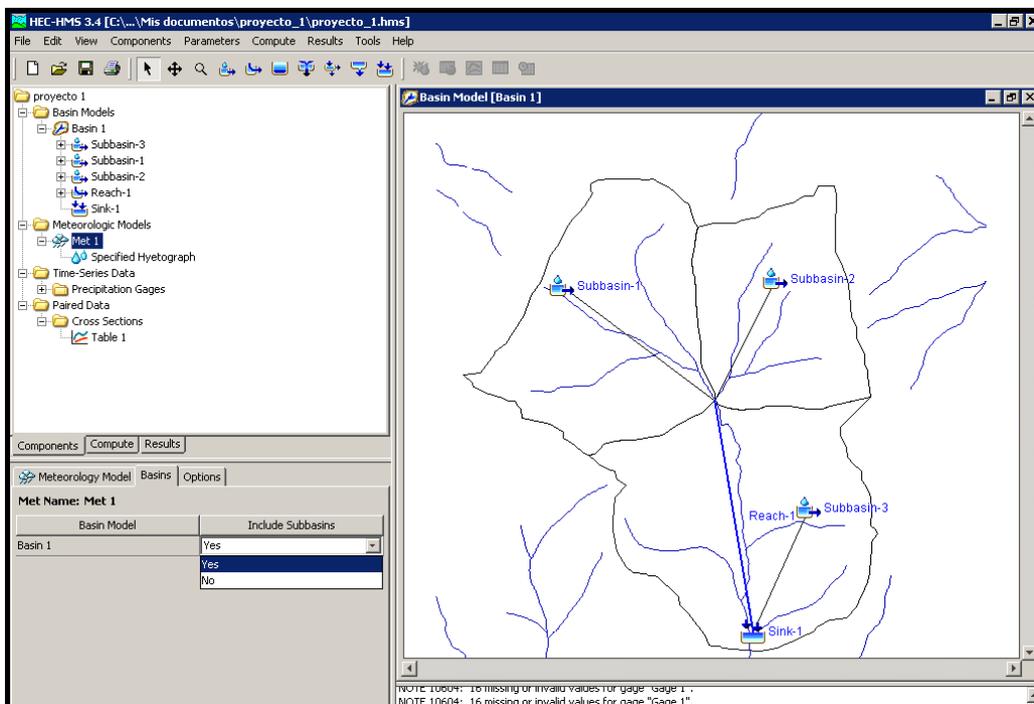


Figura 42. Inclusión de subcuencas al modelo meteorológico.

- Haga doble clic en el modelo meteorológico creado y seleccione **Specified Hyetograph**. En el editor de elemento asigne, a través del menú desplegable, la tormenta que corresponda a cada subcuenca (Figura 43).

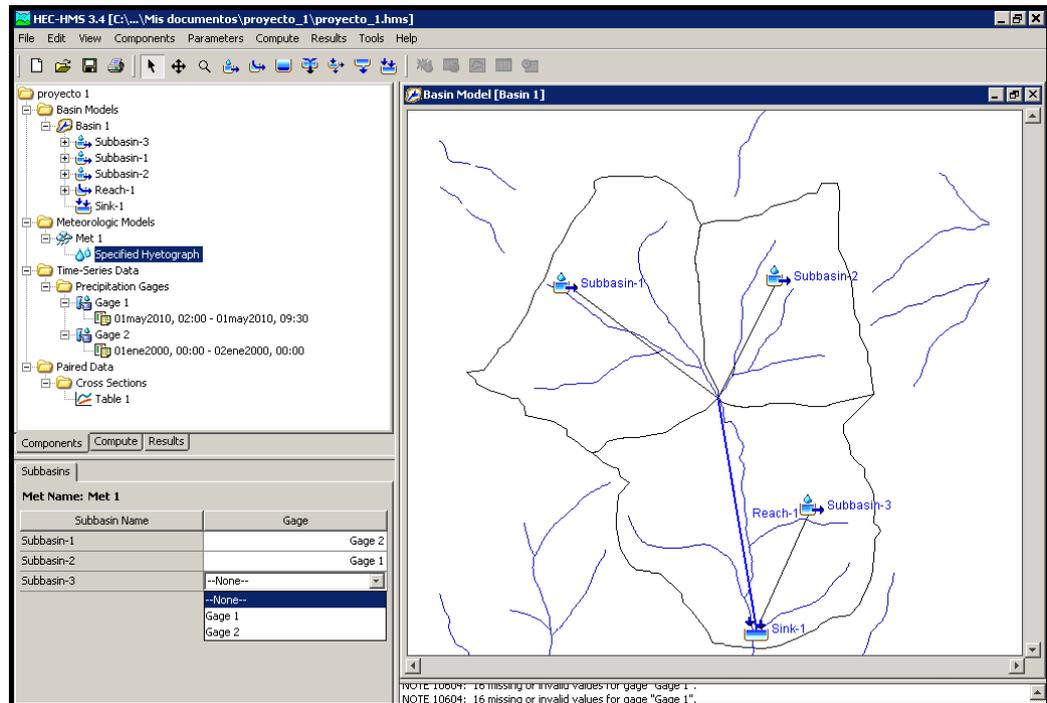


Figura 43. Asignación de tormentas a cada subcuenca.

D) Creación de las especificaciones de control

- Creación de una especificación de control. Para ello en la barra de menú haga clic en **Components / Control Specifications Manager**. Se abrirá un cuadro de diálogo, haga clic en **New...** y nombre su especificación de control (Figura 44).

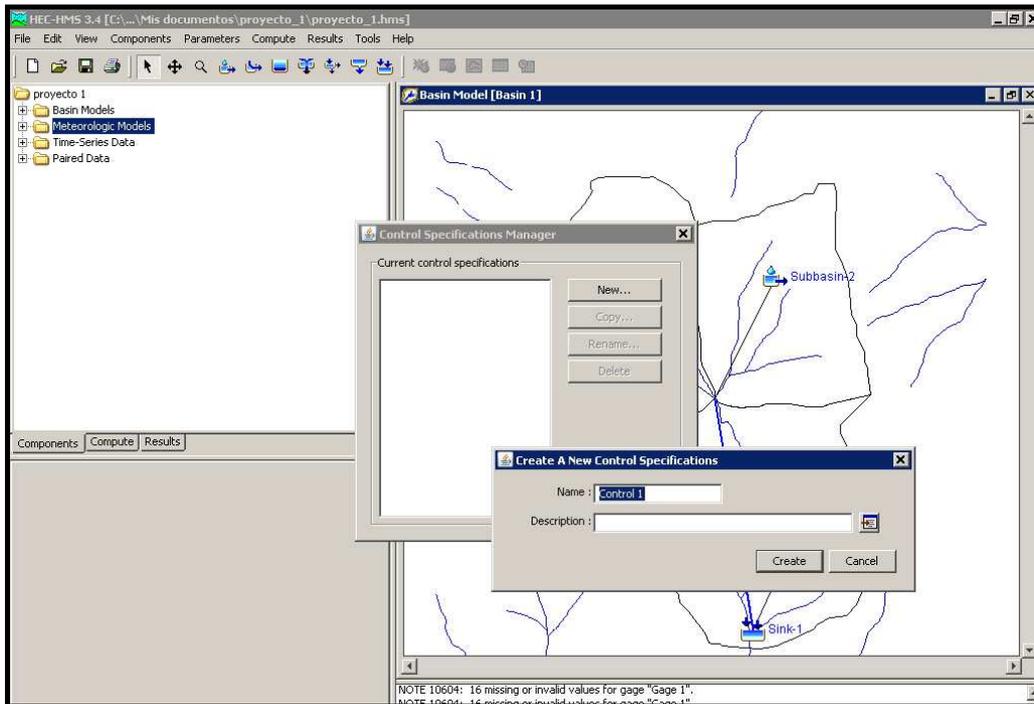


Figura 44. Creación de Especificaciones de control.

- Para asignar inicio y fin de la tormenta seleccione en el explorador la carpeta **Control Specifications** y haga doble clic sobre el control creado con anterioridad. En el editor de elementos, indique fecha y hora de comienzo (**Start Date, Start Time**) y fin (**End Date, End Time**) de los cálculos e intervalo de tiempo de cálculo (Figura 45).

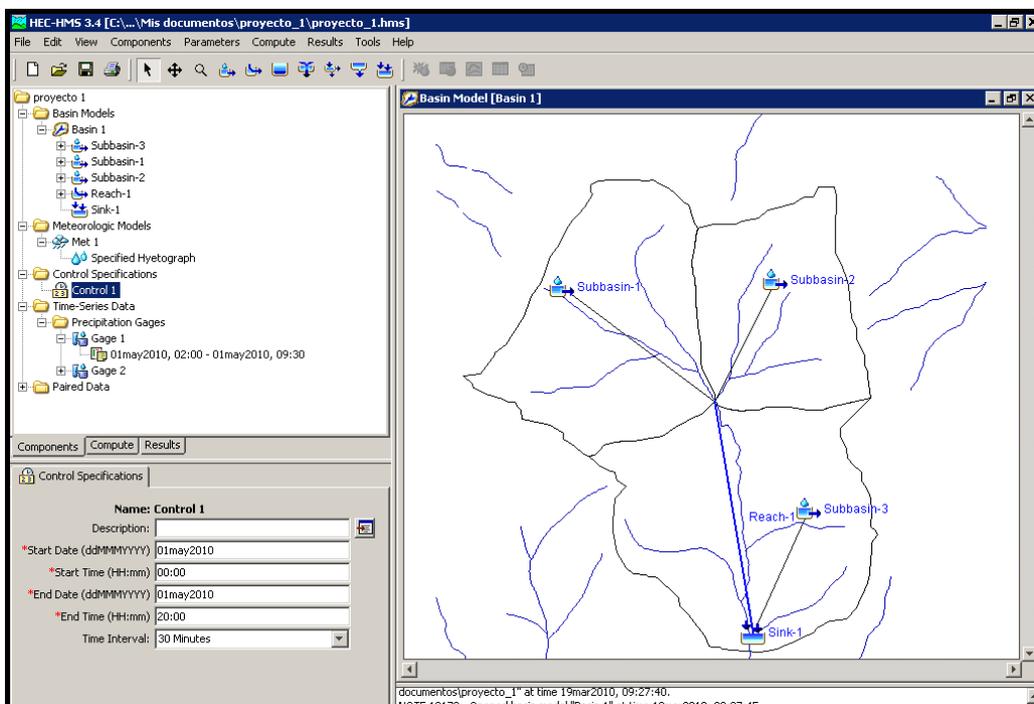


Figura 45. Asignación de fecha y hora de comienzo y fin de los cálculos e intervalo de tiempo de cálculo.

E) Creación de una simulación hidrológica

√ Para crear una simulación, se debe asignar al programa cual es el modelo de cuenca, el modelo meteorológico y las especificaciones de control que utilizará, ya que en un mismo proyecto pueden crearse uno o más de cada uno. Para nombrar y asignar las características de la simulación haga clic en **Compute** de la barra de menú y seleccione **Create Simulation Run**. A continuación se abrirá un cuadro de diálogo donde se le asignará un nombre (Figura 46).

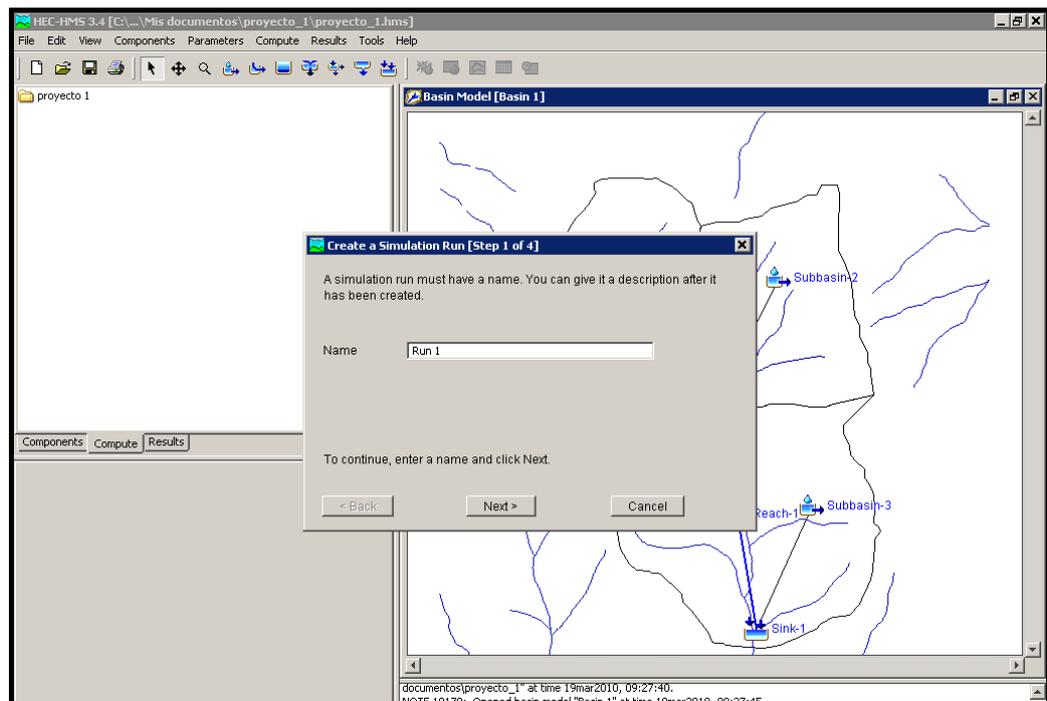


Figura 46. Creación de una simulación hidrológica.

√ Haga clic en Next > para seleccionar el modelo de cuenca, de clic en Next > para seleccionar el modelo meteorológico, de clic en Next > para seleccionar las especificaciones de control y de clic en Finish para terminar. Aparecerá la simulación creada en la solapa Compute del explorador (Figura 47).

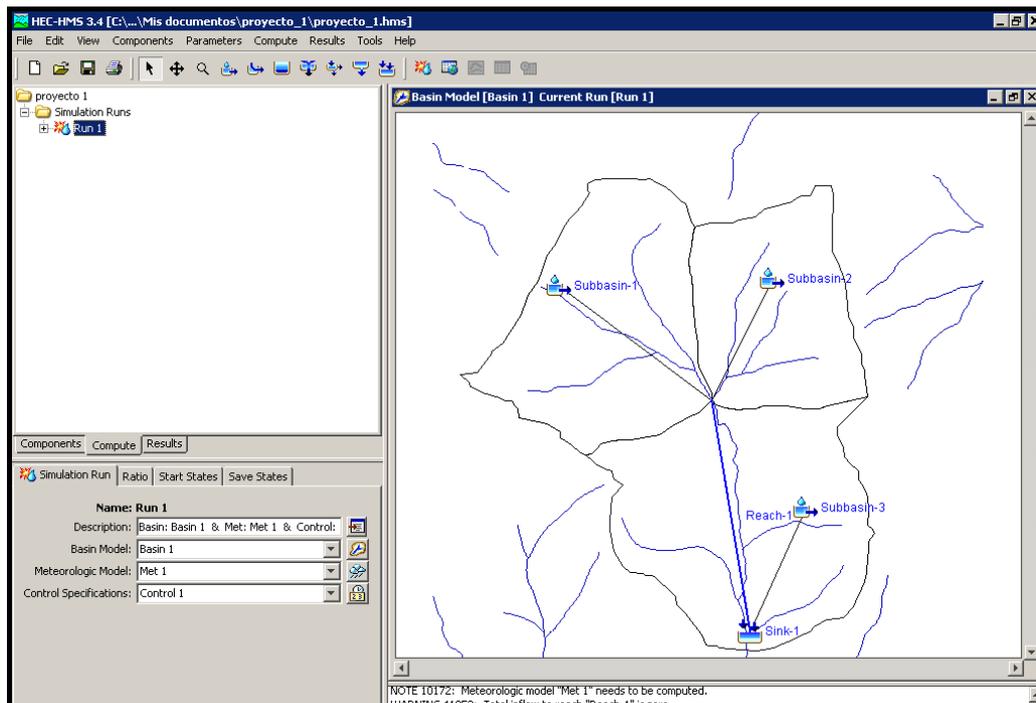


Figura 47. Visualización de la simulación creada.

Para ejecutar la simulación haga clic en la simulación creada con anterioridad y haga clic en el icono **Compute Current Run**  (Figura 48).

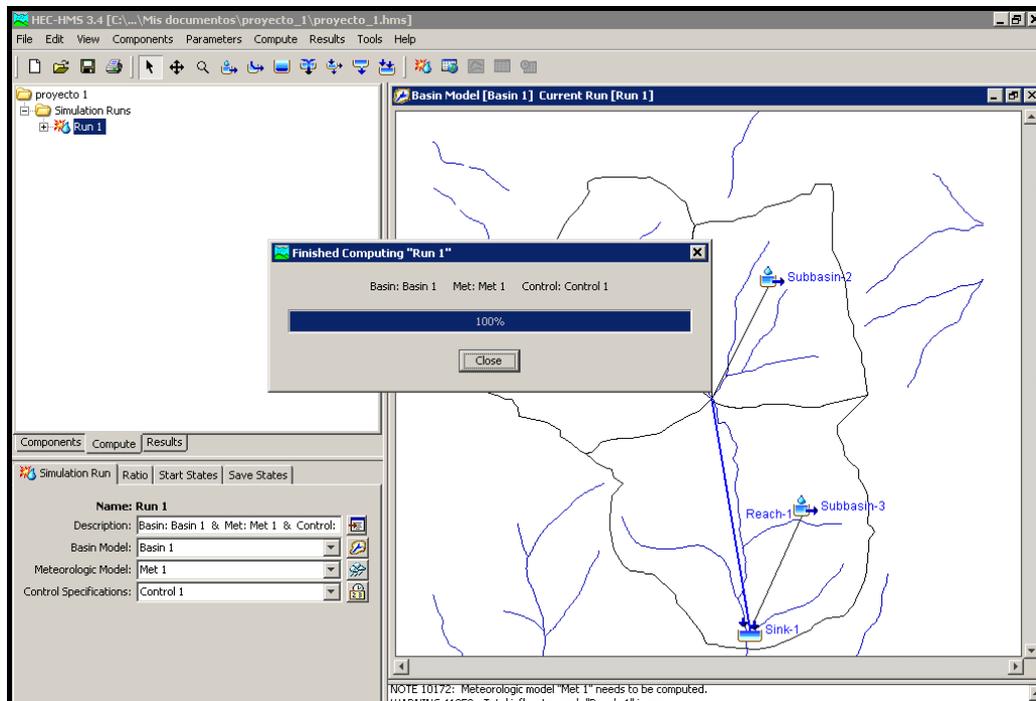


Figura 48. Ejecución de una simulación.

F) Visualizar los resultados de la simulación hidrológica

1. Haga clic en la solapa **Results** del explorador, dentro de la carpeta **Simulations Run** y luego doble clic en la simulación. Se desplegarán todos los elementos del modelo de cuenca. Podrá visualizar el hietograma e hidrograma en un mismo gráfico haciendo clic en **Graph**. (Figura 49).

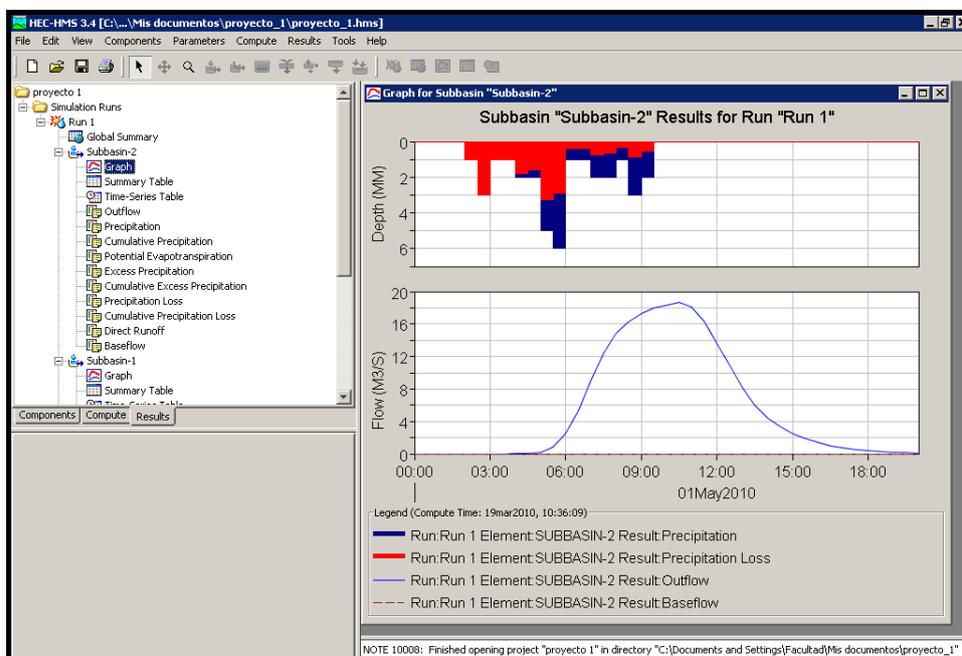


Figura 49. Visualización del hietograma e hidrograma en un mismo gráfico.

2. Haciendo clic sobre **Time-Series Table** de cada elemento podrá visualizar los resultados de las diferentes variables calculadas por el modelo en forma tabular (Figura 50).

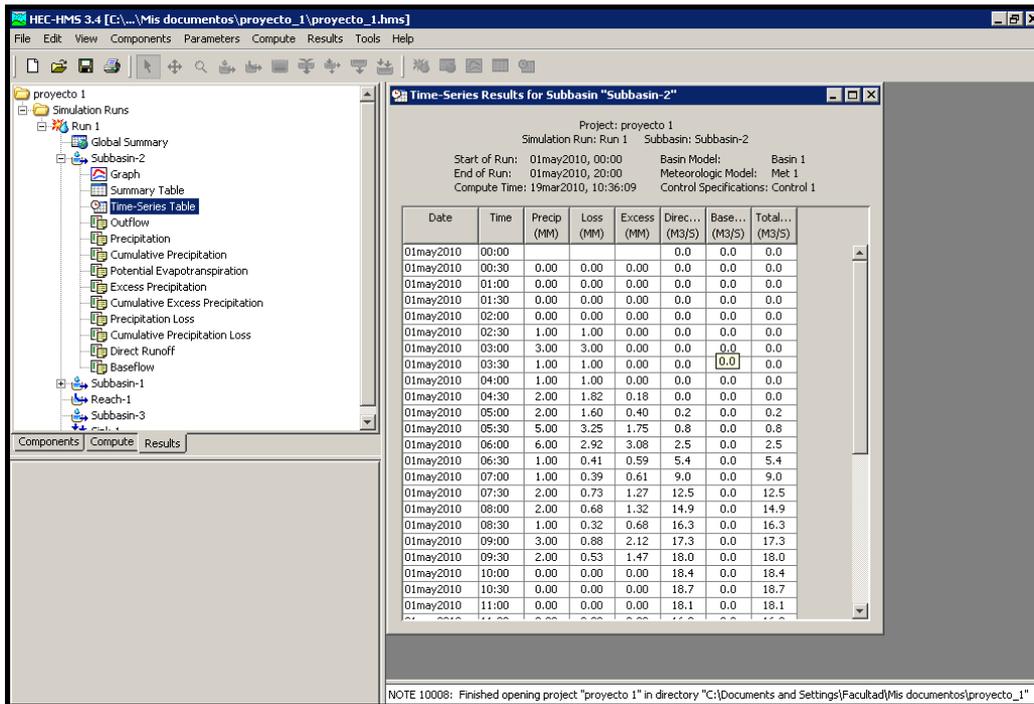


Figura 50. Visualización de los resultados en forma tabular de las diferentes variables calculadas.

- Haciendo clic sobre cada elemento podrá visualizar los resultados de las diferentes variables en forma gráfica (Figura 51) o tabular (Figura 52), utilizando los iconos  y  respectivamente.

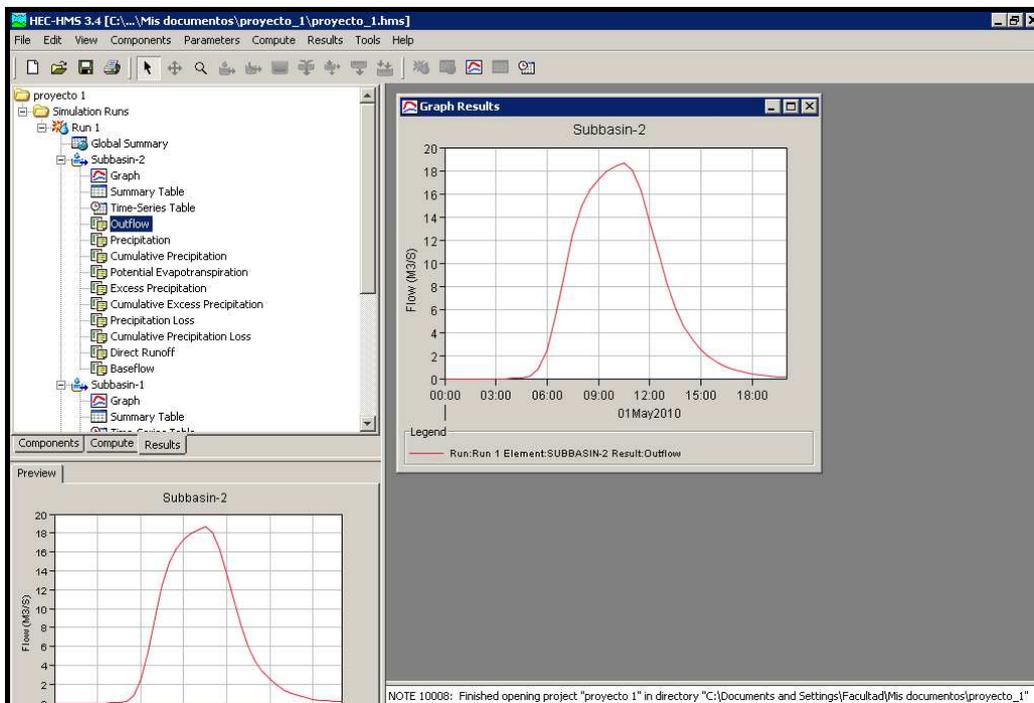


Figura 51. Visualización de resultados en forma gráfica.

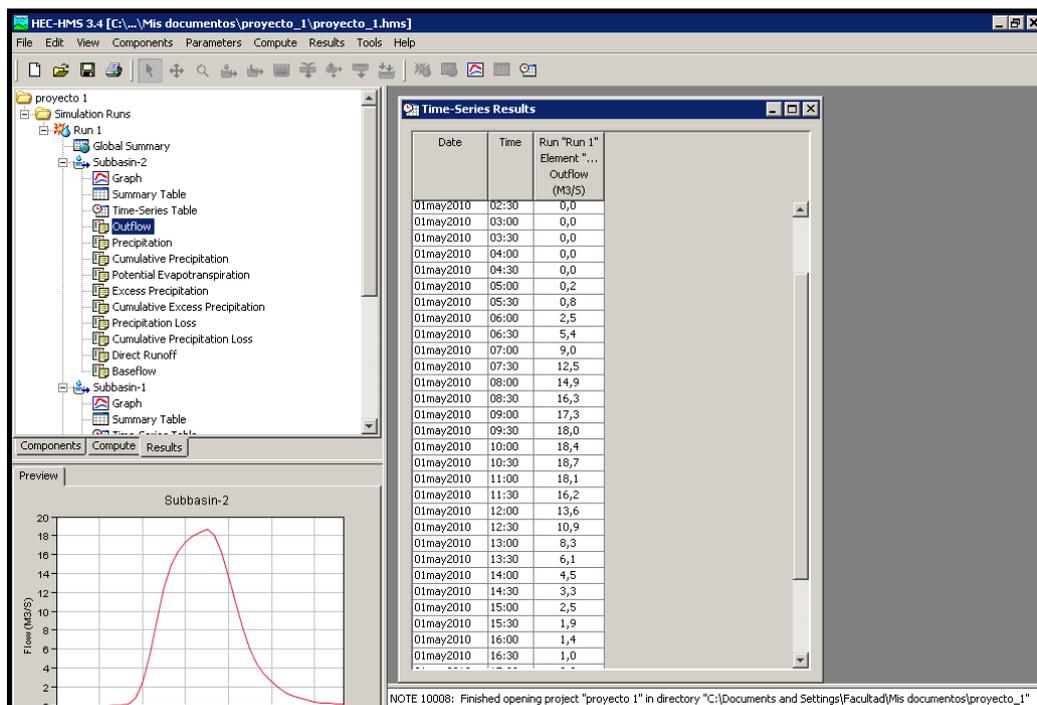


Figura 52. Visualización de resultados en forma tabular.

- Los datos tabulares pueden ser copiados (*Copy*) o exportados (*Export*) haciendo clic en el botón derecho del Mouse sobre la tabla y con los datos a copiar seleccionados (Figura 53).

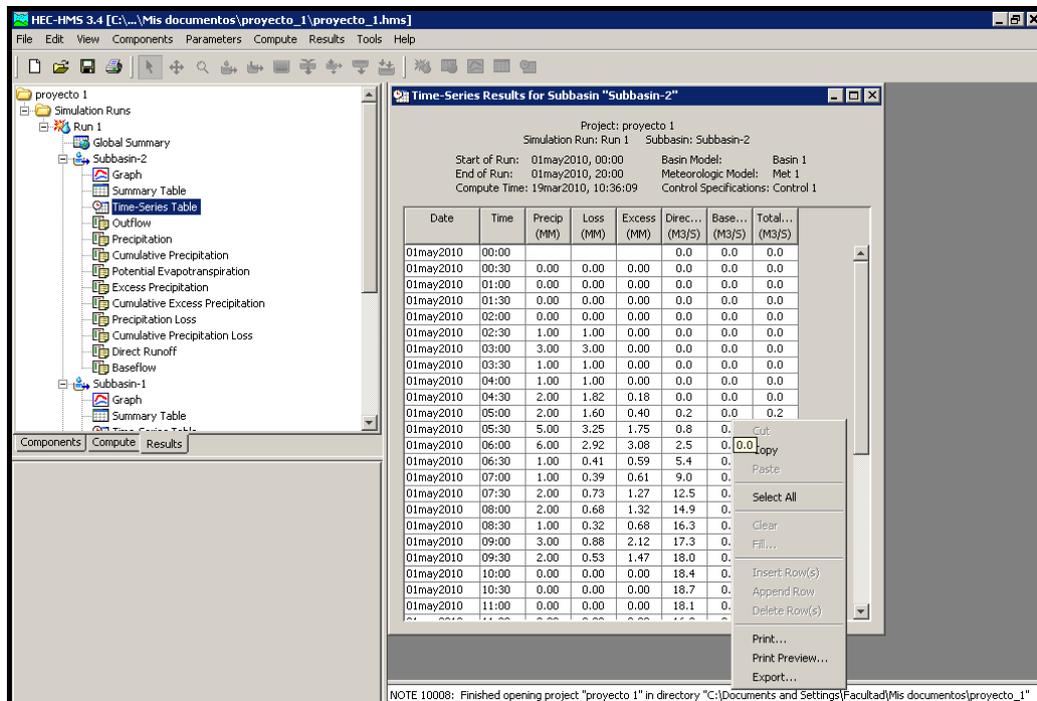


Figura 53. Exportación de resultados.

A continuación se presenta, a modo de resumen, la Figura 54, donde se exponen los datos básicos y las metodologías empleadas en el ejemplo de aplicación, como así también los resultados que otorga la modelización con el HEC-HMS 3,4 ®.

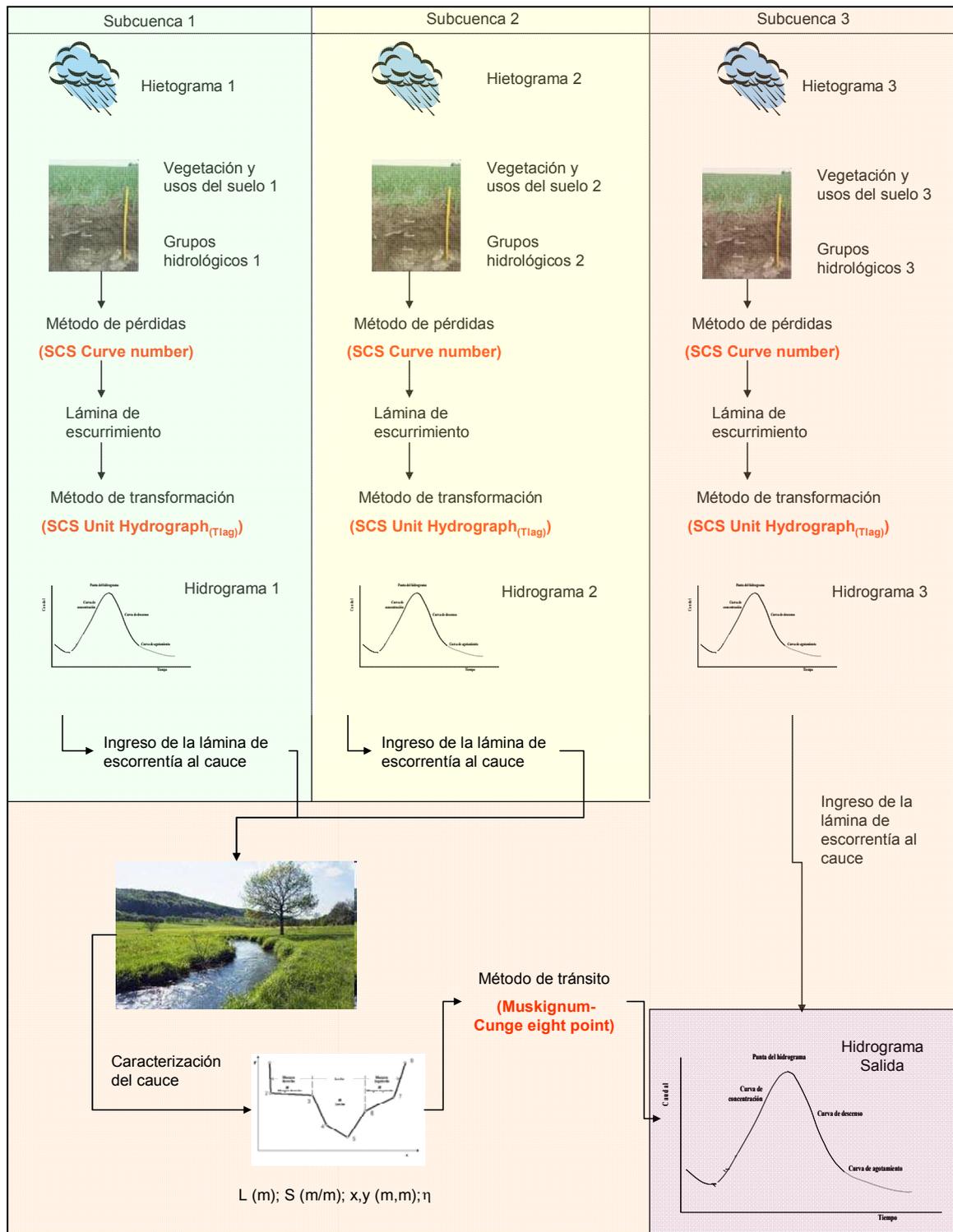


Figura 54. Cuadro resumen de la modelización con HEC-HMS ®.

APLICACIÓN DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

La gestión de cuencas presenta la necesidad de tener una base de datos que permita coordinar y planificar acciones en cada unidad de manejo y gestión (UMG), a fin de contribuir a establecer pautas para su ordenación. Para ello un Sistema de Información Geográfica (SIG) constituye un instrumento básico para el procesamiento de datos geoespaciales y cartográficos, debido a su versatilidad de almacenamiento, superposición y asociación de variables físicas, naturales, sociales y económicas. Se comenzaron a utilizar en la década de 1960, como resultado de la extensión a bases de datos geoespaciales a dispositivos informáticos.

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas informáticas que procesan y analizan datos con algún componente espacial (Chuvieco, 2000; Ordoñez y Martínez Alegría, 2003). El *National Centre of Geographic Information and Analysis* (NCGIA) expresa que un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión (1990, Disponible en <http://www.ncgia.ucsb.edu/>).

PROYECCIÓN GEOGRÁFICA

El uso de datos geoespaciales necesita de un Sistema de Coordenadas Geográficas que determina la posición de cualquier punto de la superficie terrestre. Puede utilizar dos coordenadas angulares de un sistema de coordenadas esféricas que está alineado con el eje de rotación de la Tierra, como son latitud y longitud.

Debido a que existen ciertas distorsiones que pueden afectar la forma, área, distancias o ángulos de los elementos representados en la tierra según la escala, es necesario realizar una proyección geográfica a otro sistema de referencia. Esta correspondencia debe ser biunívoca entre los puntos de la superficie terrestre y los correspondientes al plano de proyección.

En Argentina se utiliza el sistema de proyección Gauss–Krüger para la elaboración de cartografía. Se trata de una proyección geodésica, conforme y transversa. Esta proyección permite reducir las deformaciones, dividiendo al país en siete fajas de 3° de Longitud, con denominación de oeste a este, 1 a 7 respectivamente. La ventaja es que la deformación de la cuadrícula de la cartografía en papel queda absorbida por sí misma. El norte cuadrícula es coincidente con el eje vertical, considerando también que los mapas deben expresar la declinación magnética. La cuadrícula Gauss–Krüger, constituye una escala gráfica extendida sobre toda la superficie de una carta topográfica o un mapa específico, facilitando la cuantificación de distancias. Además, la cuadrícula permite definir que las coordenadas Gauss–Krüger que se determinen para un punto cualquiera en un plano a escala 1:25.000, no difieran de las que se saquen para el mismo punto de una hoja de la carta a escala 1:50.000 ó 1:100.000 ó 1:500.000.

MODELO CARTOGRÁFICO

La cartografía puede ser generada en formato digital o en papel. El formato digital presenta ventajas en relación a la cartografía en papel, debido a que es simple de actualizar, la transferencia de la información es rápida y accesible, requiere pequeño espacio de almacenamiento, es de fácil mantenimiento con un procesamiento y análisis automático.

Para realizar un procesamiento avanzado interrelacionando varios elementos de una base de datos, con diversos tipos de información, se debe generar un modelo o esquema cartográfico. El mismo consta de tres niveles de mapas según el grado de procesamiento:

1. Primario o de primer orden: Se elabora a partir de una base de datos de observación y medición de la superficie terrestre y del ambiente. Ejemplo: topografía, suelos, red de drenaje, cobertura vegetal.
2. Secundario o de segundo orden: Se obtiene por el procesamiento de la cartografía primaria. Ejemplo: rangos de pendiente, subcuencas, orientación de laderas.
3. Terciario o de tercer orden: Se logra por procesamiento conjunto de uno o más mapas primarios y/o secundarios. Ejemplo: Riesgo de erosión.

En la Figura 55 se presenta un ejemplo de Modelo Cartográfico para la obtención del Riesgo de erosión hídrica, indicando la secuencia de análisis de las diferentes capas temáticas según el procesamiento efectuado.

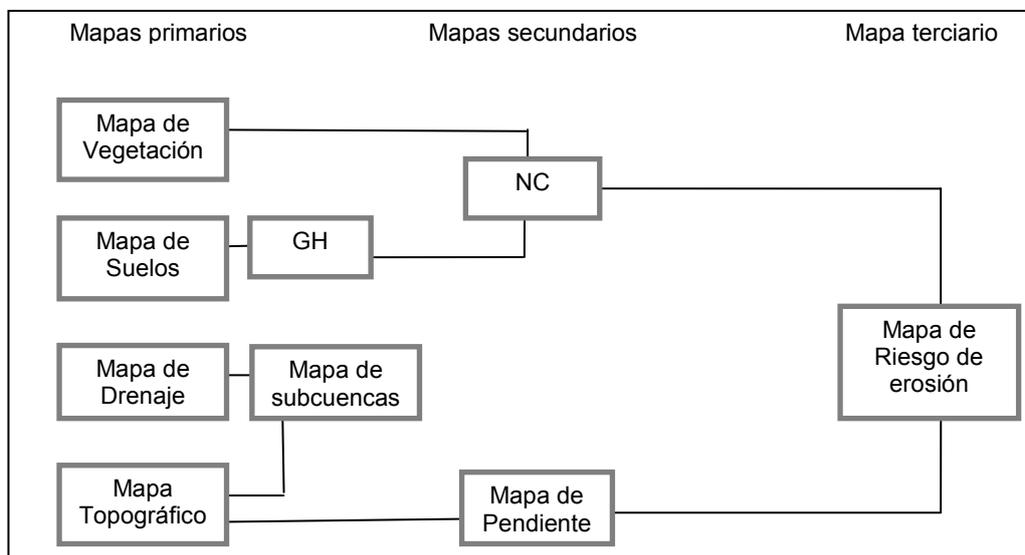


Figura 55. Modelo cartográfico para la obtención del Riesgo de erosión

Los SIG utilizan diversos tipos de información de base para reflejar la realidad simplificada en función del objetivo del mapa a obtener. Esta información se genera según modelos georreferenciados de información.

Los modelos se clasifican en:

1. Vectoriales: Están representados por una serie de segmentos lineales expresados por vectores, localizados por sus coordenadas en un sistema de referencia.

A partir de la información definida, se pueden obtener diferentes tipos de vectores:

- Punto: abstracción de un objeto de cero dimensiones representado por un par de coordenadas (X, Y). Ejemplo: ubicación de puntos de muestreo, estación meteorológica, entre otros.
- Línea: unión de dos pares de coordenadas por medio de segmentos. Si la línea presenta curvatura, se denomina arco. Si se unen varios segmentos ordenados secuencialmente se corresponde a una polilínea. Ejemplo: curvas de nivel, ríos, etc.
- Polígono: entidad utilizada para representar superficies. Un polígono se define por la unión de las polilíneas que forman su contorno, cerrándolo. Los polígonos tienen atributos que describen al elemento geográfico que representan. Ejemplo: vegetación, tipo de suelo, etc.

2. Raster, de cuadrícula, de grilla o de celdas: Representa el contenido de un objeto por su dominio geográfico en una malla regular. En este tipo de base de datos, la unidad básica de información geográfica se denomina celda o píxel. La misma posee coordenadas geográficas (centro del píxel) y un identificador (cualitativo o cuantitativo).

Las fuentes directas de datos en formato raster son principalmente las imágenes satelitales. Entre las fuentes indirectas se encuentran las obtenidas por rasterizado de cartografía en formato vectorial y/o el escaneado y procesamiento con software específico.

El procedimiento para obtener un píxel es el siguiente:

1) Se calcula, según la escala de análisis establecida, la cantidad de filas y columnas que debe tener el mapa raster, a partir de los extremos geográficos de las cuatro esquinas del mapa (filas y columnas tomadas como $(n-(n+1))$).

2) Luego se genera la grilla raster con dicho valor de filas y columnas. Dado que la grilla generada es regular (el tamaño del píxel es constante) y se conoce la posición en coordenadas del centro de cada celda, todos los píxeles del mapa están georreferenciados.

3) Se le atribuye un valor numérico a cada celda que constituya un polígono representando una capa temática, como ser suelo, vegetación, otros.

Ejemplo de aplicación.

La práctica que se presenta a continuación expresa la aplicación del SIG para zonificar el Riesgo de erosión en la cuenca. Alta del Arroyo Pillahuinco Grande aplicando el modelo cartográfico de la Figura 55.

El diagnóstico cartográfico se inicia con la toma de datos a campo y/o relevamiento de información antecedente. Esta información puede ser cartográfica en papel, como base de datos tabular, una imagen escaneada o de la web, como mapas vectoriales disponibles en la web o en base de datos geográfica digitales. La misma se incorpora a un SIG para su procesamiento.

A continuación se presenta el procedimiento informático de aplicación de Idrisi 32 © por medio de un tutorial, que constituye una guía de comandos básicos, con el fin de guiar las tareas a desarrollar durante el procesamiento geoespacial.

Idrisi 32 © es un software de un sistema de información geográfico y tratamiento digital de imágenes desarrollado por la Graduate School of Geography, Clark University. Es una herramienta de investigación geográfica a nivel profesional. Abarca un rango completo de necesidades de los SIG y la Teledetección, desde la consulta de bases de datos, a la modelización espacial, el realce de imágenes y la clasificación. Incluye herramientas especiales para el estudio del medio ambiente y la gestión de recursos naturales, que incluyen el análisis de cambios en series temporales, toma de decisiones multicriterio y multiobjetivo, análisis de incertidumbre y modelos de simulación. A pesar de la compleja naturaleza de estas funciones, el sistema es muy fácil de utilizar (Eastman, 1997; 2000).

Idrisi es un programa con una interfaz principal (con menú y sistema de barra de herramientas) y un conjunto de más de 100 módulos de programa que contienen los medios necesarios para la introducción, visualización y análisis de datos espaciales.

Herramientas básicas del programa

Definición del proyecto y directorio de trabajo

Una vez abierto el programa, la pantalla muestra una serie de iconos que representan las diferentes funciones del SIG.

El comando *<ENVIRONMENT>* se encuentra en la parte superior izquierda de la barra de herramientas. En él se establece el directorio principal en el que se trabajará (*MAIN WORKING FOLDER*), que debe ser creado previamente en el disco de la PC (Figura 56). En este directorio se almacenan automáticamente todos los archivos generados.

Se podrá agregar (*ADD*) directorios auxiliares, para obtener los archivos que se necesiten (*RESOURCE FOLDER*). Los directorios auxiliares permiten incorporar archivos de otros directorios, pero manteniendo el directorio de trabajo para el guardado automático de nuevos archivos.

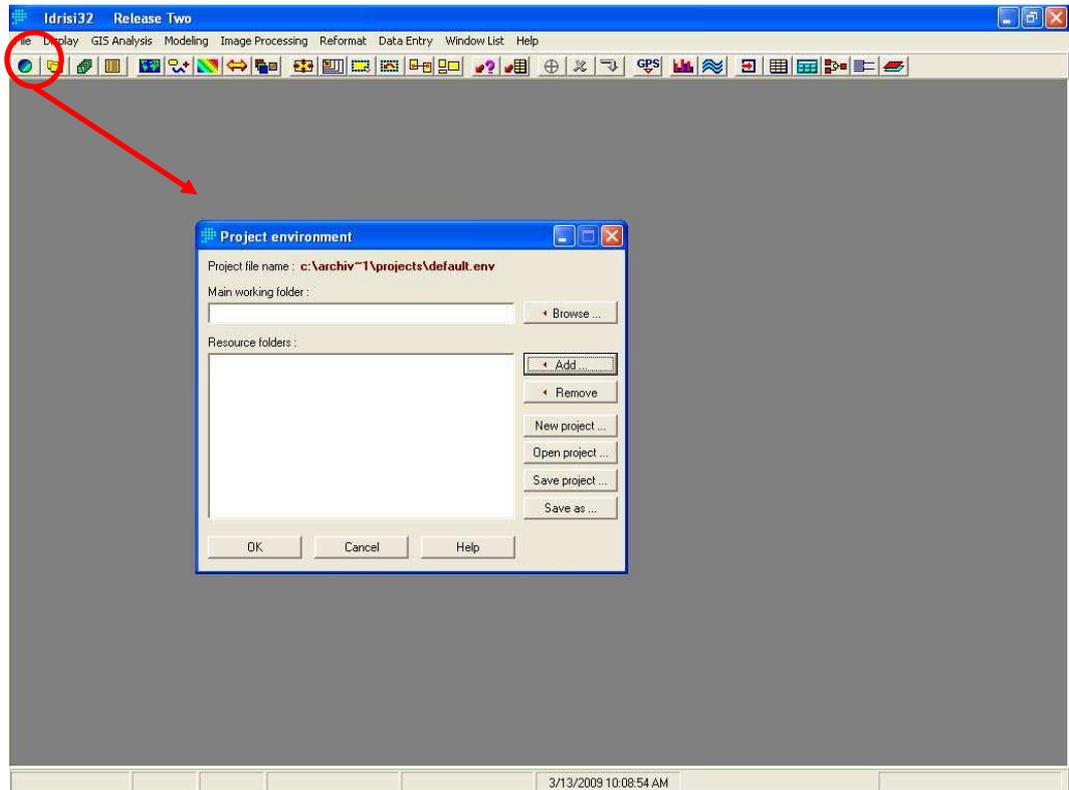


Figura 56.

Explorador de archivos

El comando <**FILE EXPLORER**> permite realizar múltiples tareas con los archivos, como por ejemplo buscar, renombrar (**RENAME**), borrar (**DELETE**), copiar (**COPY**), mover (**MOVE**), visualizar (**DISPLAY LAYER**), describir (**VIEW METADATA**), entre otros (Figura 57).

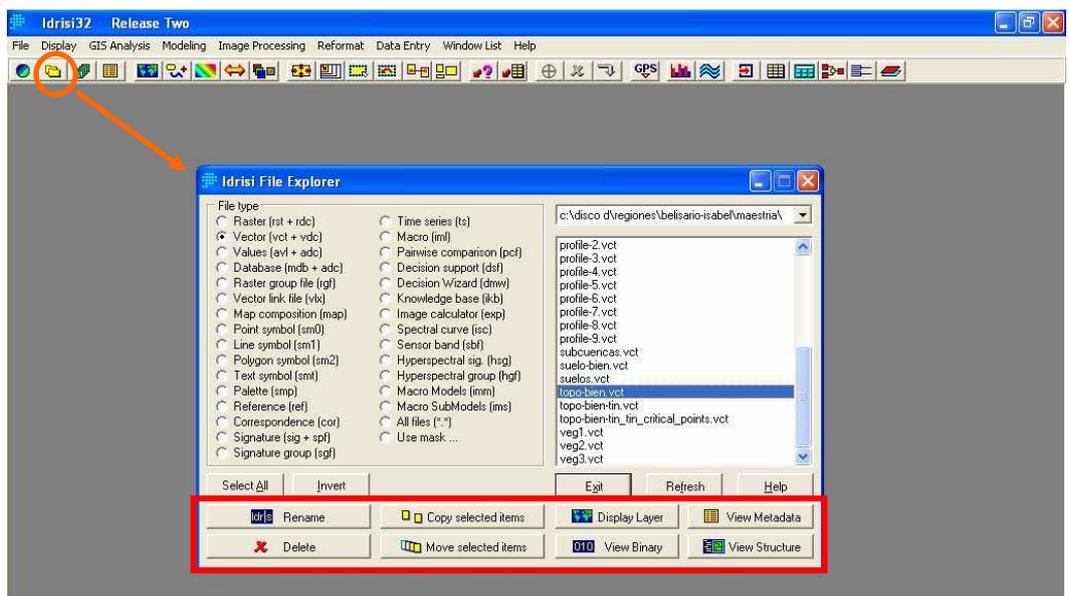


Figura 57.

Este explorador de archivos permite el análisis de diferentes tipos de archivos, los cuales deben ser identificados con anterioridad a la tarea a realizar, por medio del tildado del mismo.

Caracterización de la base de datos

El comando **<METADATA>** se utiliza para obtener información base de un archivo como ser: el título, el tipo de archivo, el tipo de dato, la cantidad de filas y columnas (en el caso de un archivo raster), las coordenadas máxima y mínima del sistema de referencia, la posición del error, y los valores expresados en la imagen, entre otros (Figura 58).

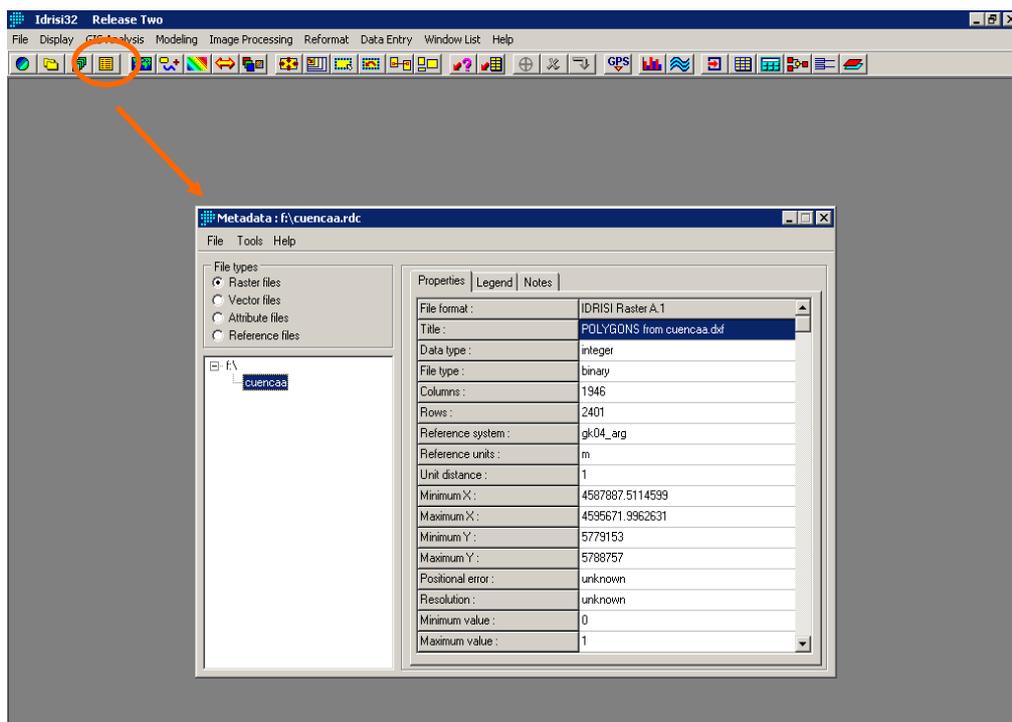


Figura 58.

También se genera y visualiza la leyenda y notas. A este comando se puede ingresar por el Explorador o directamente a través del icono correspondiente.

Presentación de mapas

El **<DISPLAY LAUNCHER>** es el comando utilizado para buscar el archivo que se desea presentar / abrir en pantalla (Figura 59).

Permite la visualización de capas temáticas de archivos vectoriales, raster y de composición de mapa, disponibles en el directorio previamente definido. Se debe seleccionar la paleta (**Symbol file**) con que se desee visualizar el mapa. Además tildar si desea visualizarlo autoescalado, con título y/o con leyenda.

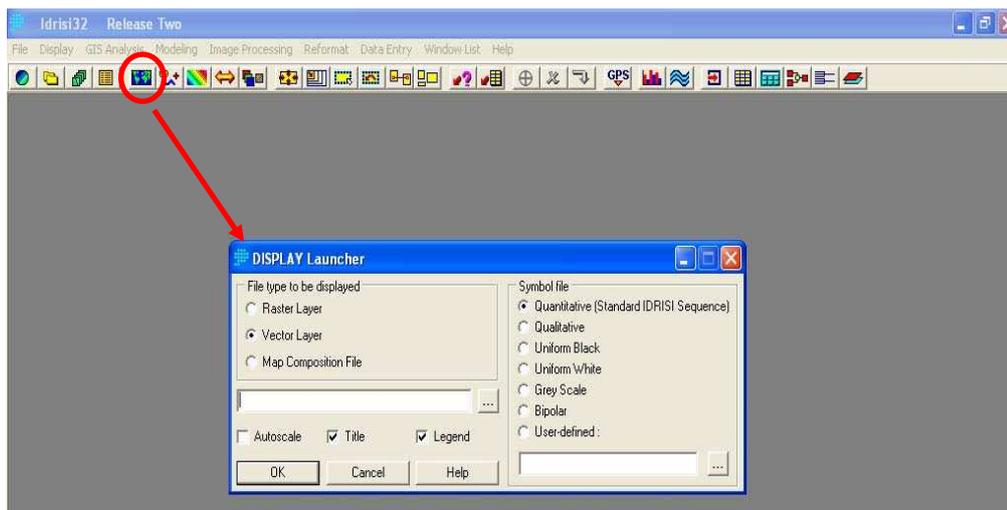


Figura 59.

Composición de mapas

Al abrir un archivo vectorial, raster o de composición, se despliega a la derecha de la pantalla, la ventana de composición (**COMPOSER**) (Figura 60).

En la misma se pueden efectuar varias operaciones, como por ejemplo: agregar un archivo (**Add Layer**) y/o quitar un archivo (**Remove Layer**). Además permite: visualizar las propiedades del archivo (**Layer Properties**), obteniéndose información respecto de tipo de archivo, sistema de referencia, unidades, valores máximos y mínimos, presentados también desde <**METADATA**>; generar o modificar las propiedades particular del mapa (título, sistema de referencia, grilla, escala gráfica, presentación del norte) (**Map Properties**); y brindar información sobre las propiedades de las figuras (**Features Properties**); habilitar al usuario a guardar o copiar el archivo con diferentes formatos, e imprimirlo (**Save Composition – Print Composition**).

Por último se presentan unos iconos que indican el zoom y cambios de dirección de la presentación del mapa.

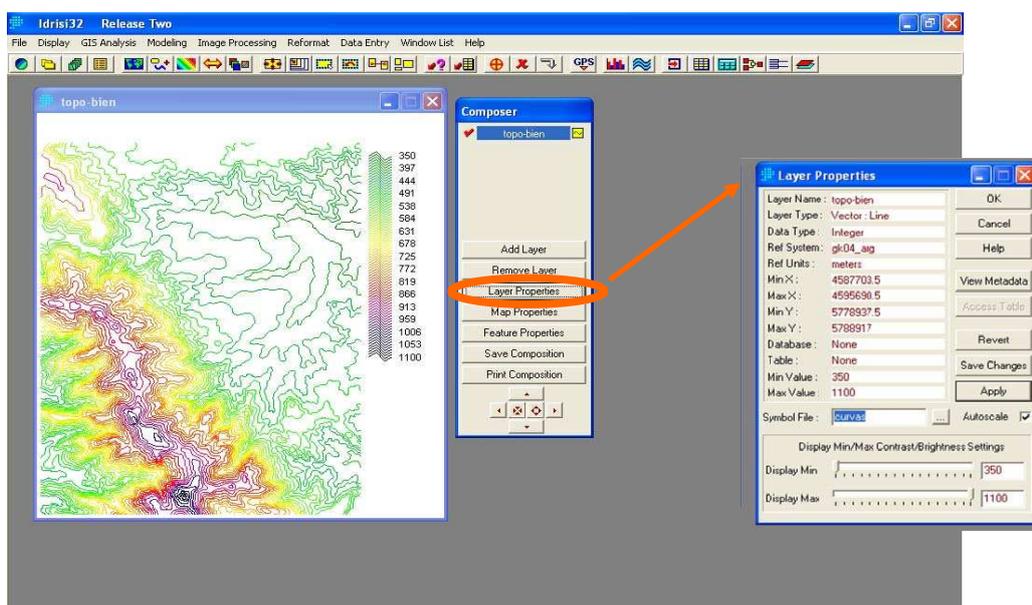


Figura 60.

Paleta de colores

Si bien el programa brinda una amplia gama de paletas de colores, también ofrece la opción de crear nuevas paletas a elección. Para ello se debe ir a <**SYMBOL WORKSHOP**>. La paleta puede brindar un color diferente para los 256 valores, teniendo en cuenta el tipo de paleta se está creando, si la misma va a ser utilizada para un archivo raster o vectorial, de puntos, líneas o polígonos (Figura 61).

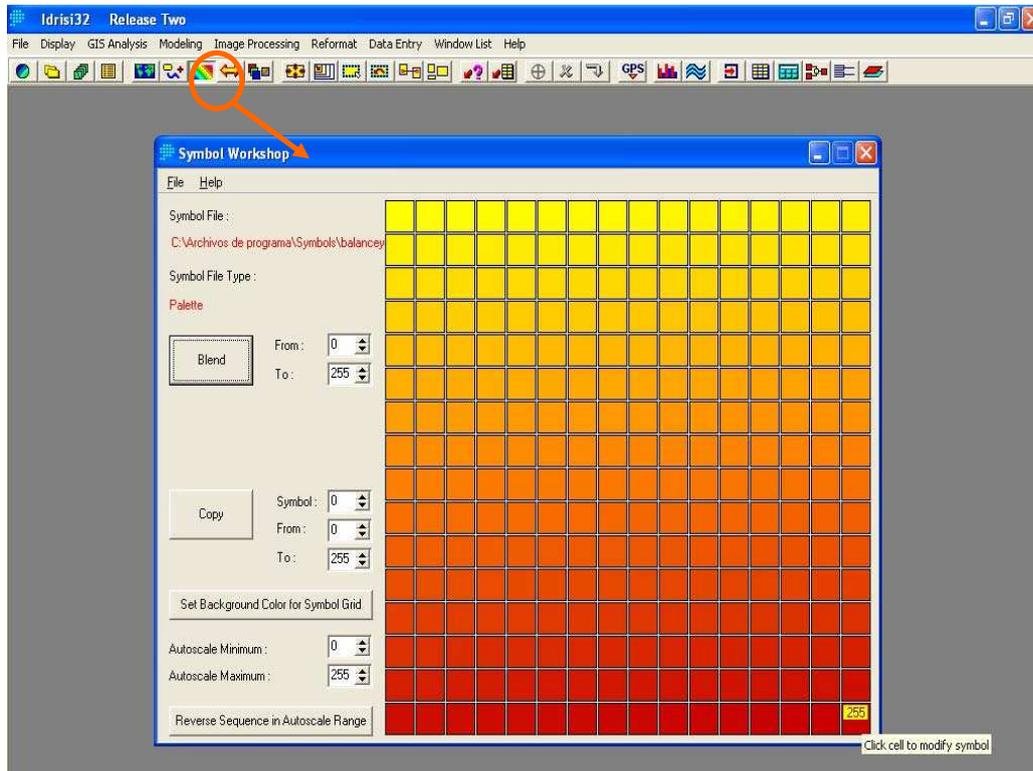


Figura 61.

Digitalización vectorial en pantalla

En el caso de tener cartografía en papel o escaneada se debe digitalizar la información por medio de un procesamiento con un programa específico. Cuando se quiere realizar con el programa Idrisi 32 ©, se aplica el siguiente procedimiento:

Para digitalizar en pantalla se debe abrir la imagen georreferenciada sobre la que se desea trabajar. Utilizar el comando <**DIGITIZE**>, el cual se encuentra remarcado en rojo en la Figura 62. Cuando tilda este comando, se activan otros dos iconos: para borrar y para guardar lo realizado.

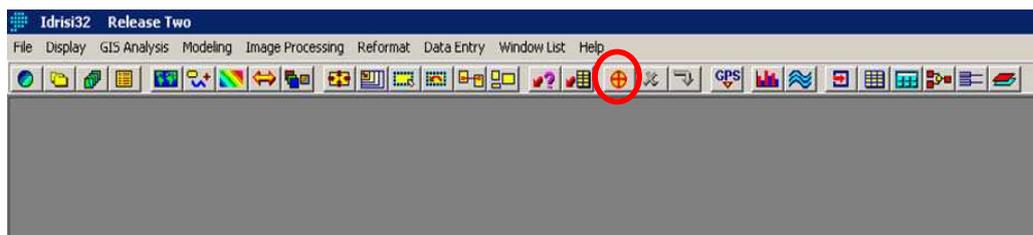


Figura 62.

Para digitalizar el primer objeto de una capa (por ejemplo la cuenca), se debe elegir la opción **CREATE A NEW LAYER**, considerando que se generará una nueva capa temática (layer).

Al apretar OK, se desplegará la ventana de la Figura 63, en la cual se debe indicar el nombre de la nueva capa a ser creada y seleccionar la paleta de colores a utilizar (**Symbol file for display**), el tipo de dato (**Data type**: entero o real), el valor de ID inicial (valor del identificador del vector digitalizado), y el tipo de capa (**Layer type**: punto, línea, polígono o texto). Luego aceptar (OK).

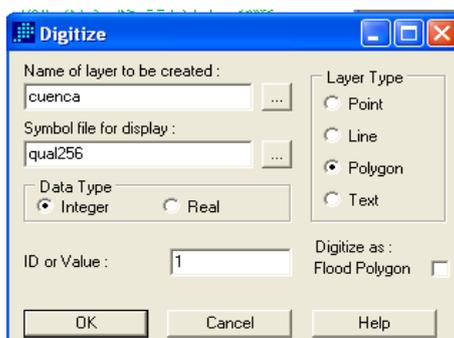


Figura 63.

Al concluir la digitalización, se debe guardar lo digitalizado pulsando el icono **Save**, ubicado a la derecha del icono de borrar. El archivo creado estará en formato vectorial.

En caso de querer borrar un objeto digitalizado, se debe recurrir al icono correspondiente, luego pulsar el botón izquierdo sobre el objeto a borrar, y posteriormente teclear la tecla **Delete** o **Suprimir** del teclado.

En el caso de querer trabajar en Idrisi 32 © con archivos vectoriales con otros formatos, los mismos se pueden incorporar al proyecto por medio de la importación de archivos.

Importación de archivos

El programa Idrisi 32 © permite importar y exportar archivos de distinto formato, desde una amplia gama de programas.

Cuando se desee trabajar con un archivo de formato CAD (Diseño asistido por computadora), que presenta extensión **.dxf**, se debe importar el mismo, con la ruta presentada en la Figura 64: **< FILE == > IMPORT == > DESKTOP PUBLISHING FORMATS == > DXFIDRIS >**.

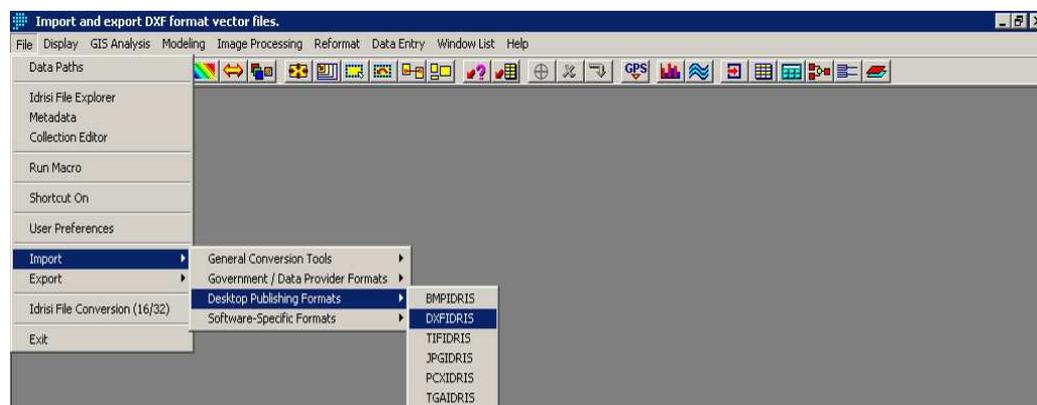


Figura 64.

Posteriormente se debe indicar un nombre de salida del archivo, el formato (archivo de puntos, líneas o polígonos), el sistema de referencia que se prefiera y las unidades de medidas. El nuevo archivo generado será un archivo en formato vectorial (con extensión **.vct**).

En el caso de querer importar un archivo vectorial de formato ESRI, con extensión **.shp**, se debe seguir la ruta especificada en la Figura 65: **< FILE == > IMPORT == > SOFTWARE SPECIFIC FORMATS ==> ESRI FORMATS == > SHAPEIDR >**.y luego seguir el procedimiento anteriormente mencionado.

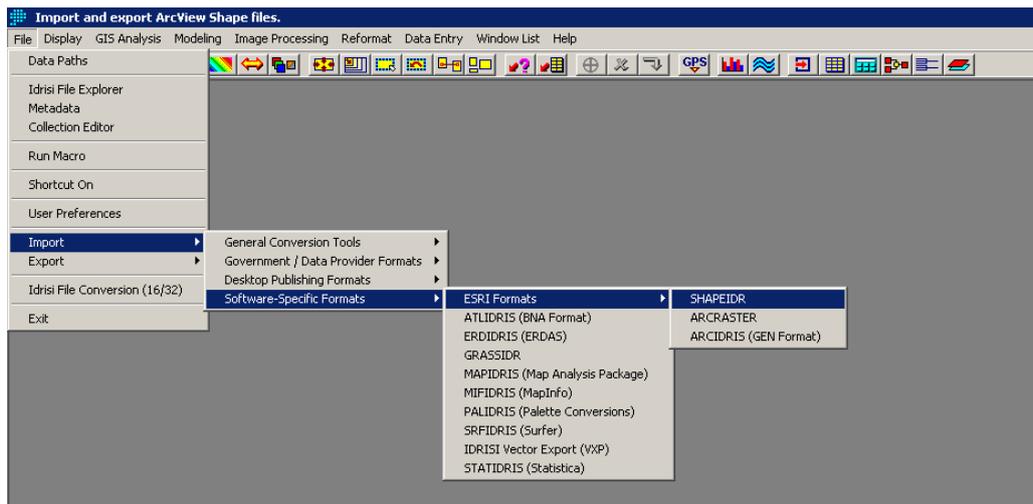


Figura 65.

Conversión de archivos de formato vectorial a raster

Para convertir archivos vectoriales a raster – grilla (rasterizar un vector) se debe utilizar el comando **< REFORMAT => RASTER / VECTOR CONVERSION >**, y dependiendo de si el archivo es de puntos, líneas o polígonos, se utiliza **<POINTRAS, LINERAS, POLYRAS>**, según corresponda a un archivo vectorial de puntos, líneas o polígonos, respectivamente (Figura 66).

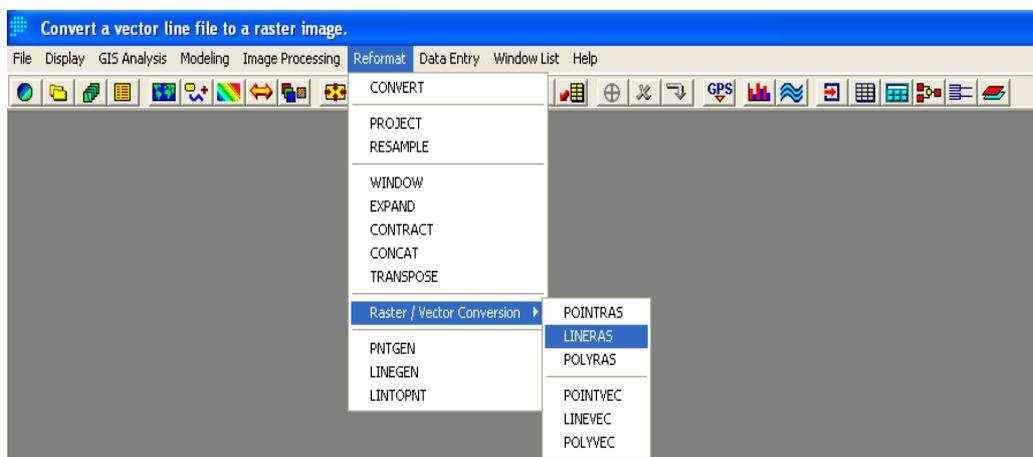


Figura 66.

En la ventana que aparece, se debe ingresar el nombre del archivo vectorial de entrada y el nombre del archivo raster de salida (recordar que se puede utilizar el mismo nombre que el del archivo vectorial, ya que el formato y la extensión es distinta). Aparecerá un cuadro de diálogo indicando que el archivo no existe y preguntando si desea crearlo (INITIAL), a lo que deberá indicarse que sí (Figura 67).

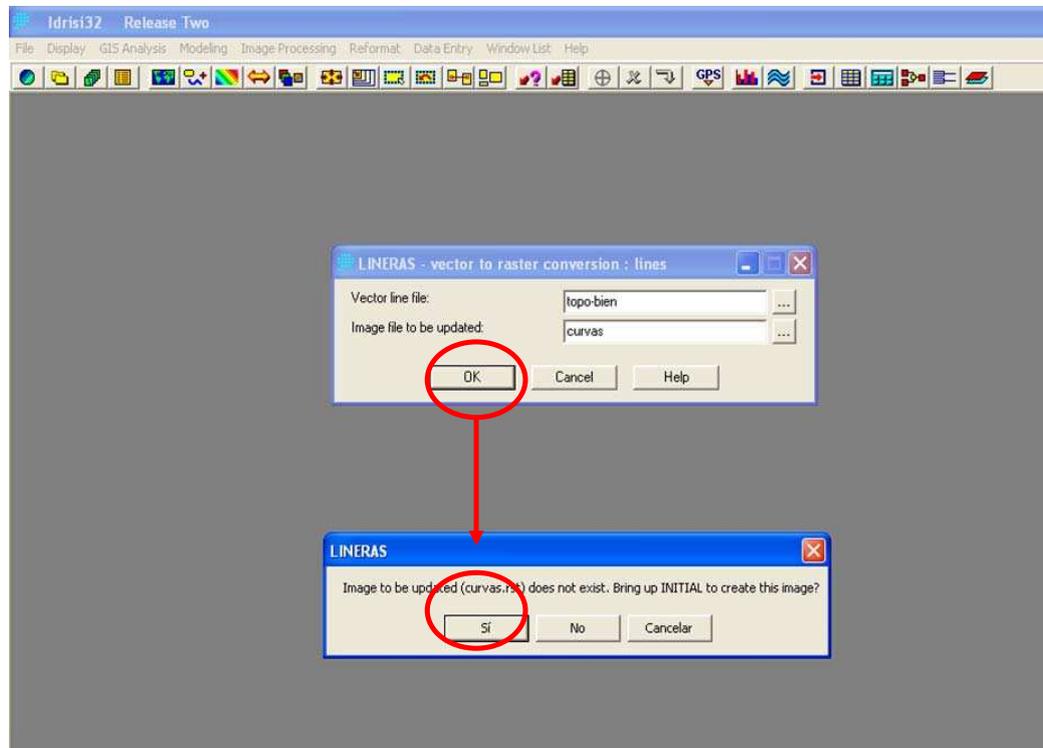


Figura 67.

En la ventana siguiente se debe indicar si se quieren copiar los parámetros espaciales de otra imagen raster existente, que ya haya sido creada, o si se ingresan dichos parámetros manualmente.

También se debe especificar el tipo de datos (tipo binario, entero o real) y el valor inicial de la imagen (Figura 68).

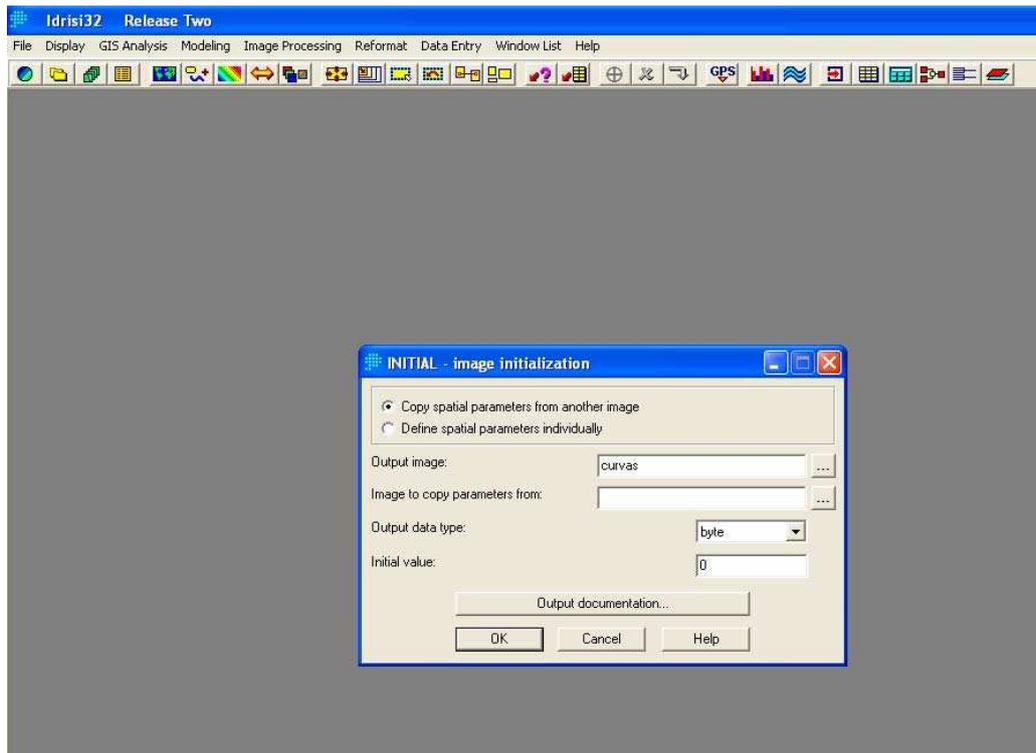


Figura 68.

En caso de copiar los parámetros de otra imagen, se debe indicar el nombre de dicha imagen, según el siguiente cuadro de diálogo, donde aparecerán automáticamente los valores de los parámetros espaciales (Figura 69).

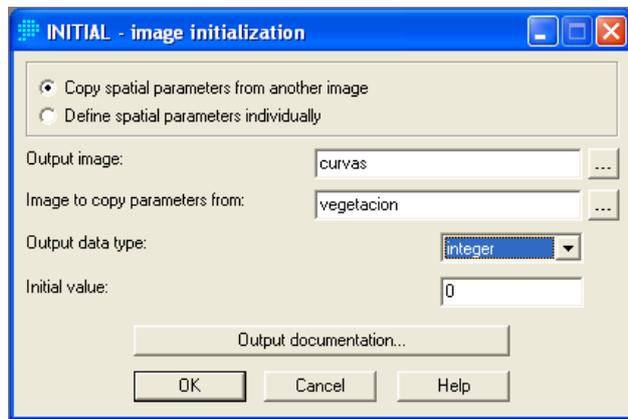


Figura 69.

En caso de optar por ingresar los valores manualmente, se debe ingresar cada uno de los valores iniciales de los parámetros espaciales del sistema de referencia **<OUTPUT REFERENCE INFORMATION>** (Figura 70). Estos están comprendidos por el número de filas y columnas dependiendo de la resolución que se desee generar para la imagen de salida. El sistema de referencia, sus valores máximos y mínimos, las unidades de referencia y la unidad de distancia aparecen por defecto, debido a que estaban incorporadas en el archivo vectorial.

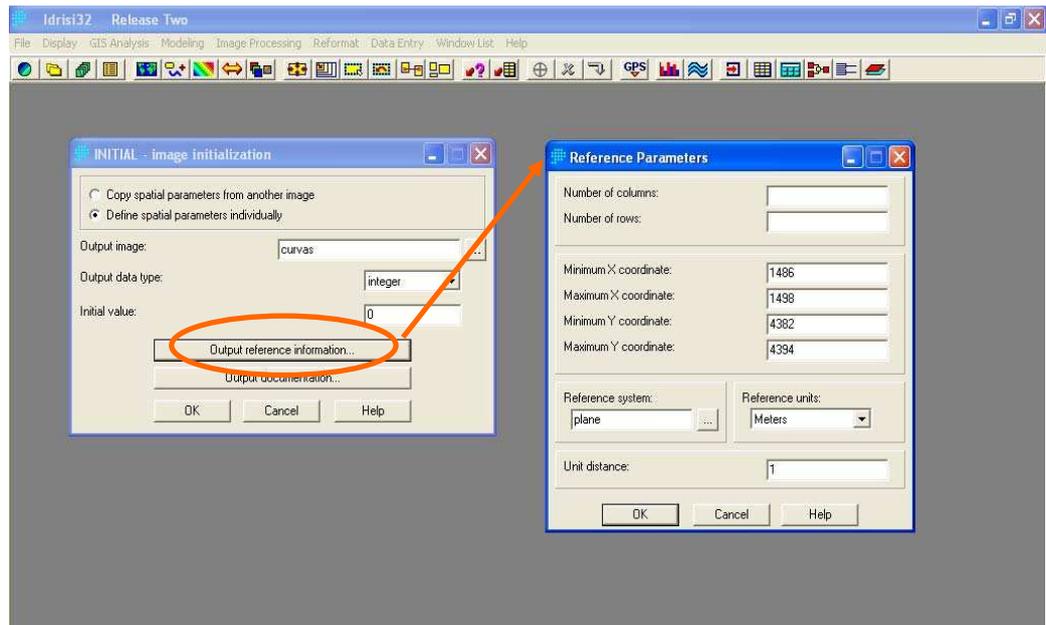


Figura 70

Conversión de tipo de archivo

Este comando permite realizar un cambio en el tipo de dato (*integer* (entero), real o byte) y tipo de archivo (ASCII, *binary* (binario) o *packed binary*) según la siguiente pantalla de la Figura 71, con el comando <**CONVERT**>.

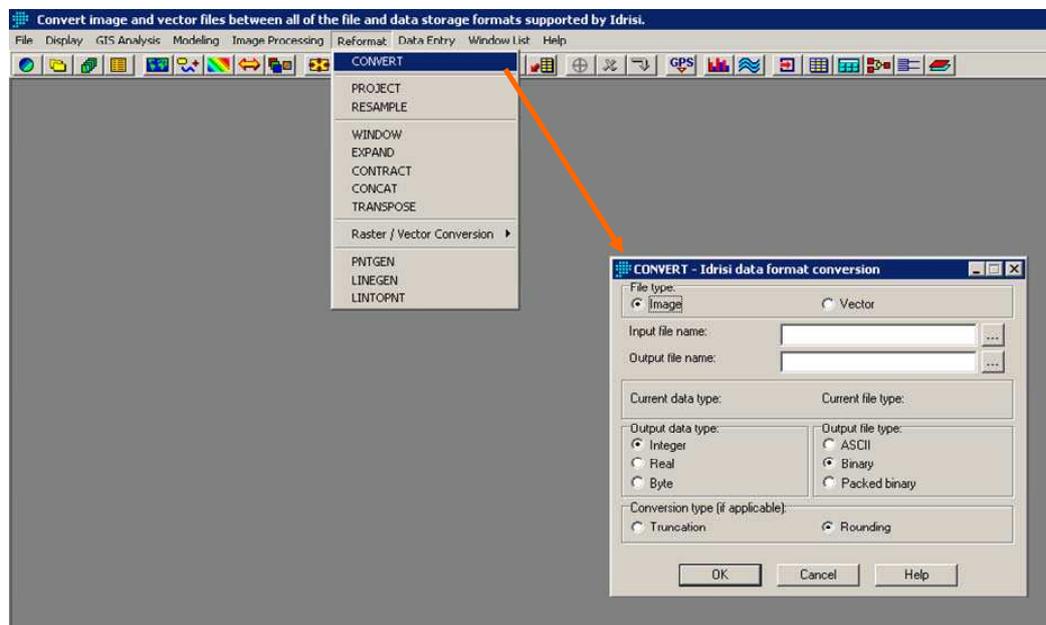


Figura 71

Cruzamiento de mapas

El mapa de aptitud edáfico – vegetal para procesar el Número de Curva (NC) se debe realizar por medio de una tabulación cruzada (<**CROSS TABULATION**>) que consta de un cruzamiento entre el mapa de Grupos Hidrológicos (GH) y el mapa de

Vegetación, como se realizó en el ejercicio de aplicación de determinación del NC en una cuenca hidrográfica, en ese caso con la utilización de una planilla de cálculo.

Se parte de un mapa de GH, que se obtiene a partir de la información de textura de los suelos de la cuenca. En este caso de estudio, se presenta una cuenca con nueve tipos de suelos con características bien diferenciadas, por lo cual se distinguen dos GH, por ello para zonificar y cartografiar el GH se parte del mapa de suelos.

Como el mapa de GH contiene los mismos polígonos que el mapa de suelos, entonces, se procede a realizar una copia del mapa de suelos (Figura 72), y denominarlo GH, creando un nuevo archivo.

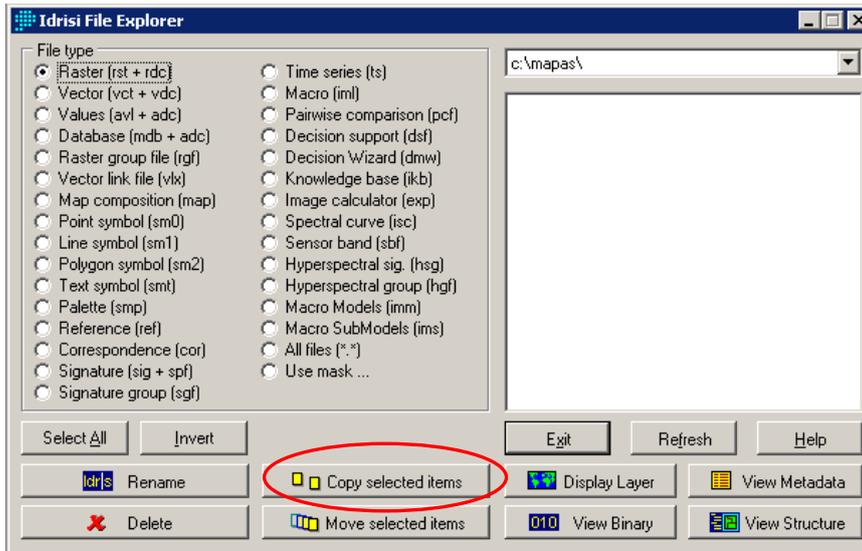


Figura 72.

Al nuevo mapa de GH obtenido se le debe cambiar la leyenda (desde *Metadata*), de modo de que se corresponda con la de Grupos Hidrológicos, obteniéndose la Figura 73.

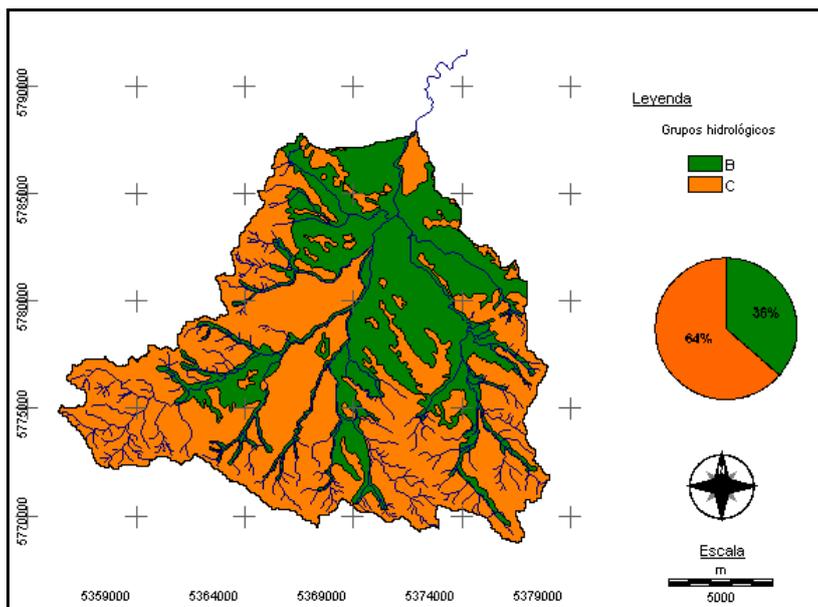


Figura 73. Mapa de Grupos Hidrológicos de la cuenca alta del A° Pillahuinco Grande.

El mapa de vegetación que se utilizará también será el provisto de la información otorgada en el ejercicio de aplicación de NC (Figura 74).

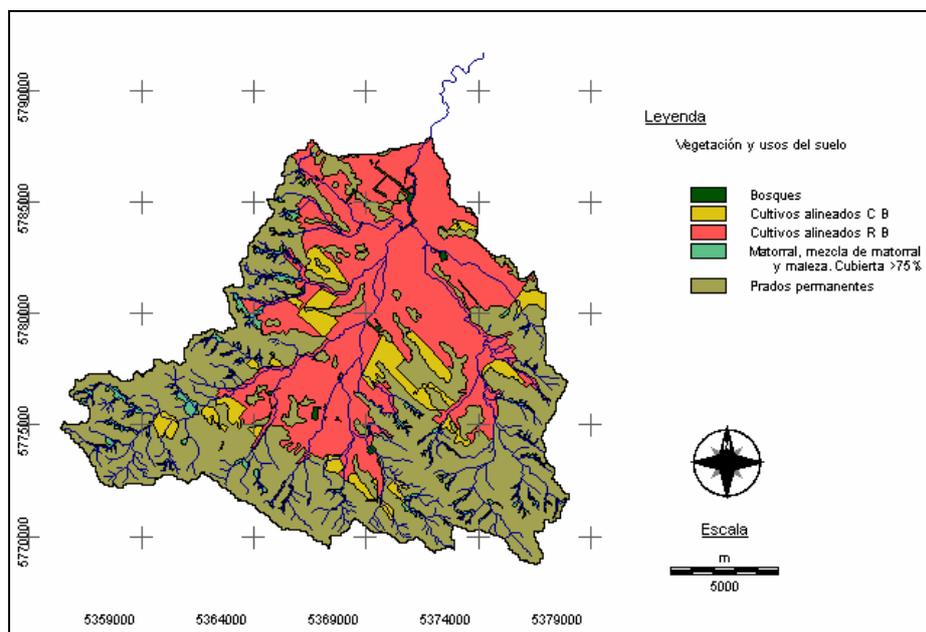


Figura 74. Mapa de vegetación de la cuenca alta del A° Pillahuinco Grande.

Cabe mencionar que ambos mapas (GH y de vegetación) deben tener formato raster previamente al cruzamiento, debido a que este análisis se hace a nivel de píxel para identificar los que comparten GH y vegetación.

Para realizar el cruzamiento entre los atributos de valor de los dos mapas, y obtener de este modo un nuevo tercer mapa, se puede utilizar el comando **<CROSSTAB>** que se encuentra en **<SIG ANALYSIS => DATABASE QUERY >**, optar por el comando **<CROSSTAB >**.

Este comando solicita ingresar el nombre de las dos imágenes a procesar, y como nombre de salida, la imagen producto del cruzamiento. Se puede optar una de las tres primeras opciones, para este procedimiento, dependiendo de cuál sea el resultado esperado. Las mismas son: obtener una imagen de clasificación del cruzamiento, definir una tabla de imagen de clasificación del cruzamiento o generar ambas cosas (una imagen de clasificación del cruzamiento y su tabla) (Figura 75). La imagen de similaridad no se utilizará en este ejercicio.

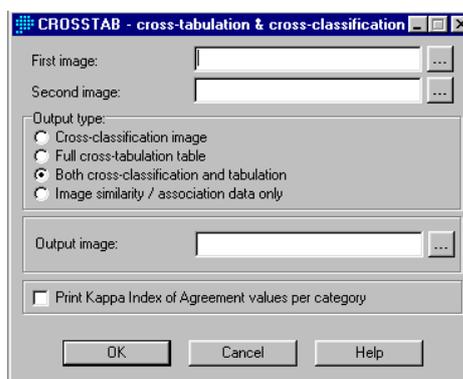


Figura 75.

El nuevo mapa elaborado como producto del cruzamiento, se debe editar en función de las características de cada cuenca en estudio. La edición se asigna según el NC que le corresponde a cada intercepción de GH y la cobertura vegetal, como se realizó en el ejercicio de aplicación de NC, para lograr zonas de igual aptitud edáfica – vegetal o NC (Tabla 25).

GH	Vegetación				
	Bosques	Cultivos alineados CB	Cultivos alineados RB	Matorral, mezcla de matorral y maleza. Cubierta > 75%	Prados permanentes
B	52	75	78	48	58
C	63	82	85	65	71

Tabla 25. Número de curva para la Condición Hidrológica II.

Edición del mapa de NC

En el caso de necesitar cambiar la denominación de un polígono, se debe editar su estructura. Para ello, se debe ir a la ventana <**DATA ENTRY**> y optar por el comando <**EDIT**>, desplegándose la ventana correspondiente. Otra forma de acceder al comando es a través del icono directamente (Figura 76).

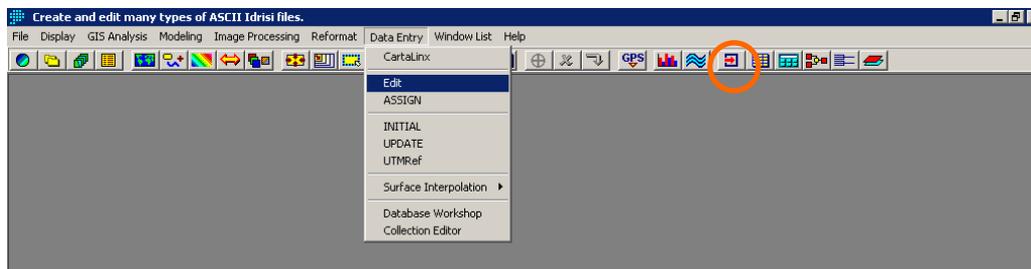


Figura 76.

Antes de editar un mapa se debe tener correctamente identificado cada elemento del mismo, sino se estará arribando a conclusiones erróneas en la etapa posterior.

Se recomienda tomar el tiempo necesario para entender qué información se está editando, y su objetivo.

A modo de organizar mejor la información, suele ser muy útil tomar nota con papel y lápiz.

El comando <**EDIT**> se comporta como un archivo de texto, generalmente utilizado en dos columnas. Se debe comenzar a tipear el código numérico identificatorio (de valor cuali o cuantitativo) de cada polígono del mapa en la columna de la izquierda, dejar un espacio y tipear en la columna de la derecha el nuevo valor a asignar (Figura 77). El valor de la columna izquierda es el valor que actualmente tiene el polígono y el de la derecha es el nuevo valor que quiere asignar.

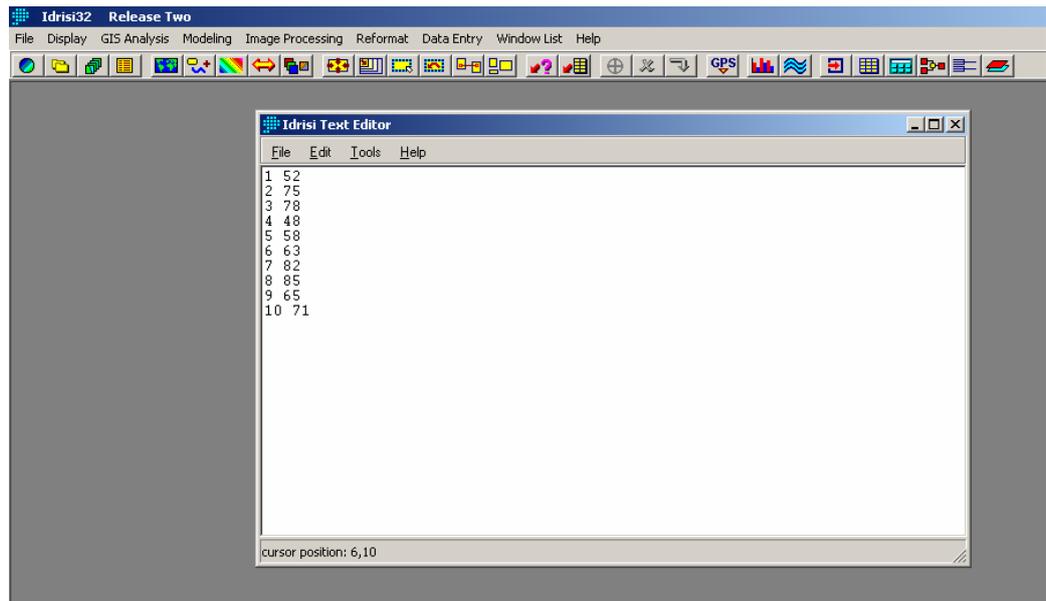


Figura 77.

Posteriormente, se debe ir a < **FILE** => **Save as** >, eligiendo como tipo de archivo a guardar la opción **Attribute Values File (*.avl)**, y luego asignar un nombre al archivo (Figura 78). Cerrar la ventana.

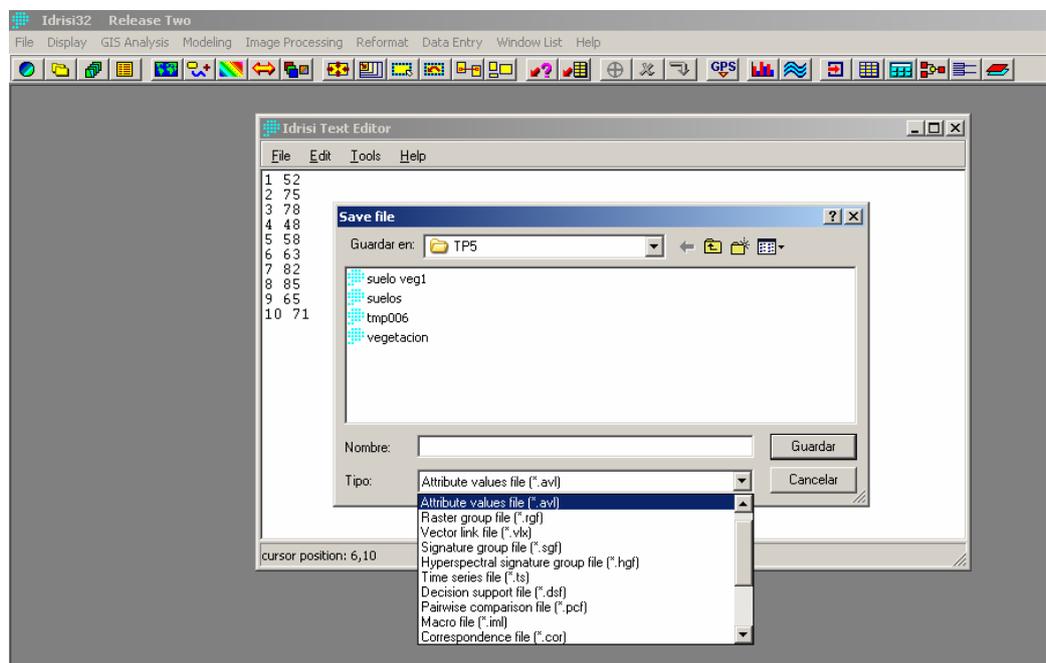


Figura 78.

Para asignarle este archivo de valor a un mapa raster / vectorial se debe recurrir al módulo < **DATA ENTRY** > y optar por el comando < **ASSIGN** > el cual le asignará el archivo de valor de atributos (*.avl). Por ejemplo al archivo raster generado anteriormente con el < **CROSSTAB** >.

Optar si se trata de un archivo raster o vectorial.

En los casilleros a completar “*Feature definition image*” se introduce el nombre del archivo a editar. Luego el nombre del archivo de salida a ser creado.

Por último, el nombre del archivo de atributo de valor (*.avl) de salida (Figura 79).

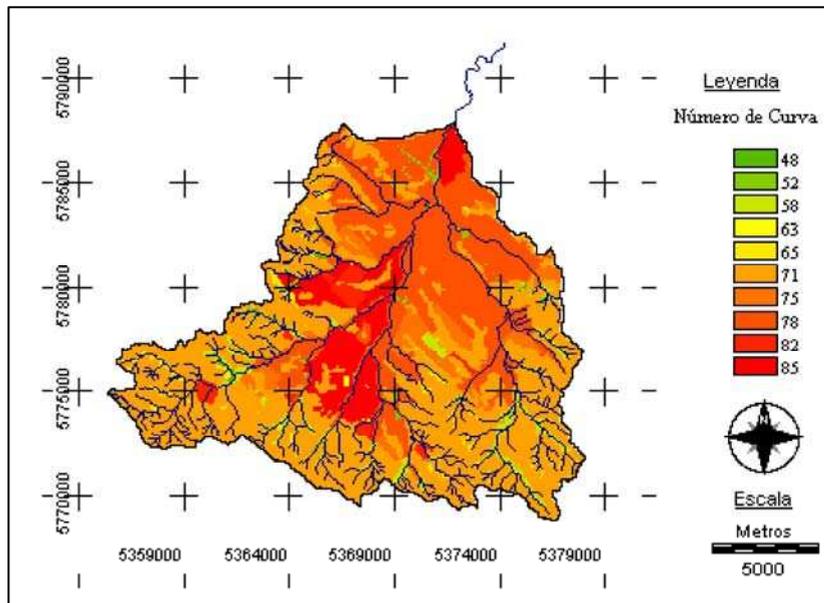


Figura 79. Zonificación del Número de Curva en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Este procedimiento sirve para definir el valor puro de cada polígono y la correspondiente leyenda del mapa.

Determinación de área y perímetro

Para conocer el área o perímetro ocupado por cada polígono que conforma cada clase de NC (en este caso de estudio), se debe recurrir al módulo < **SIG ANALYSIS** => **DATA BASE QUERY** > y optar por el comando **ÁREA** ó **PERIM**, respectivamente. El resultado lo aporta en dos formatos, imagen o tabla. Se recomienda elegir la opción “**Tabular**”, que agiliza la operación en el caso de conocer el valor del dato. Los valores de los resultados pueden solicitarse en la unidad de medida de superficie o lineal, según sea el caso, que se crea más conveniente (Figura 80).

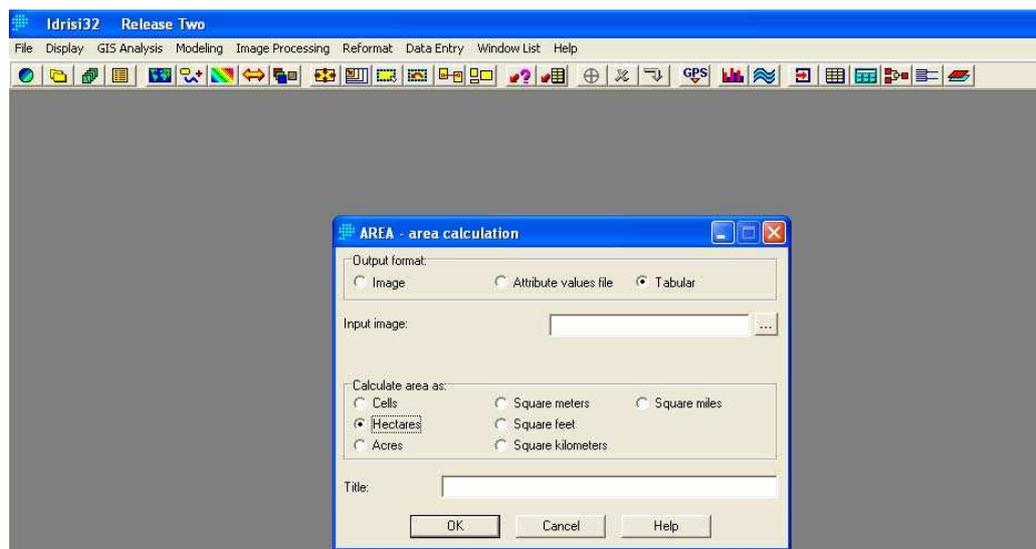


Figura 80.

La tabla lograda es la misma que se presentó en el ejercicio de aplicación de obtención de la superficie de ocupación del NC.

A continuación se presenta un mapa que integra el valor de NC de cada polígono y su grado de ocupación porcentual en superficie, cuyo valor fue establecido por medio de la aplicación del comando *AREA* y su posterior procesamiento con una planilla de cálculo (Figura 81).

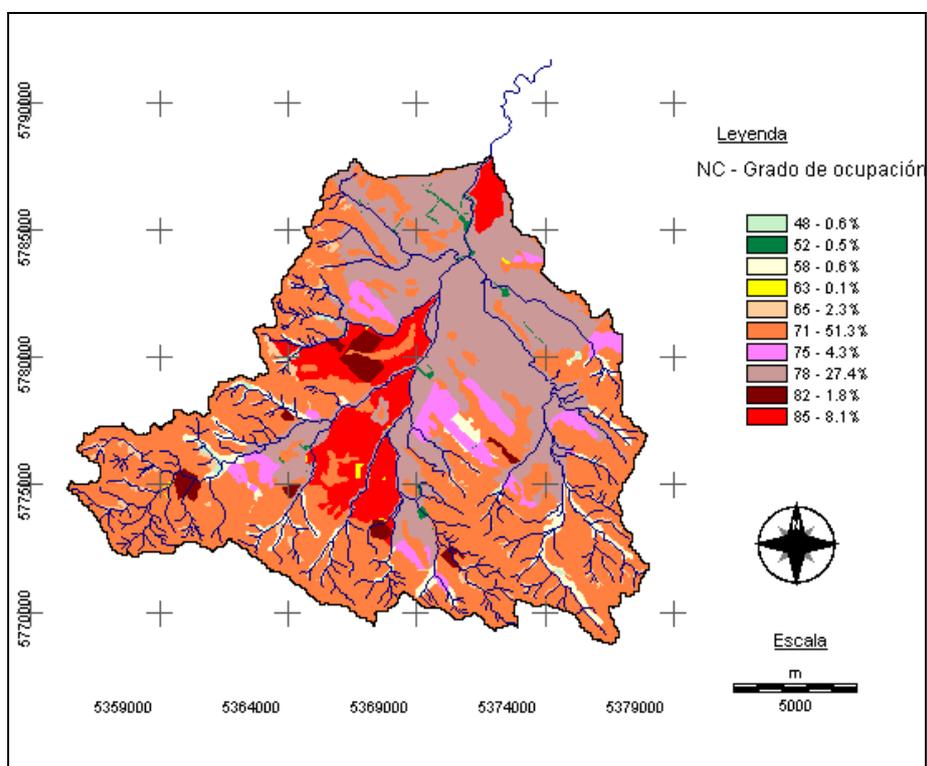


Figura 81. Zonificación del Número de Curva y grado de ocupación en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Reclasificación en clases - categorías

Para determinar un mapa de aptitud edáfico – vegetal, generalmente se procede a una reclasificación del NC en tres categorías. El comando a utilizar es el siguiente < **SIG ANALYSIS** => **DATABASE QUERY**> y optar por el comando <**RECLASS**> (Figura 82).

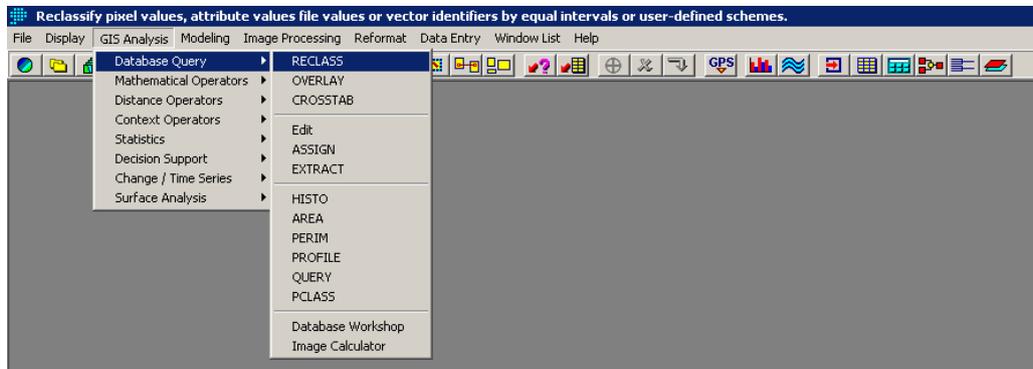


Figura 82.

En la ventana emergente como lo indica la Figura 83, se debe ingresar el tipo de archivo que se desea reclasificar (imagen, vector, o atributo de valor) e indicar el tipo de reclasificación: definidos por el usuario (**User-Defined Reclass**) o con la magnitud del intervalo uniformes (**Equal Interval Reclass**). Al elegir la primera opción se debe ingresar el atributo del nuevo rango y los valores máximos y mínimos del mapa original que estarán comprendidos este nuevo rango. En caso de optar por la segunda opción, se debe ingresar la magnitud del intervalo (ancho de la clase), o el número de clases a ser creadas.

Luego seleccionar el archivo a reclasificar y definir el nuevo nombre del archivo de salida. Los rangos establecidos pueden guardarse generando un nuevo archivo (*.rcl), de modo de aplicar la misma clasificación a otros mapas.

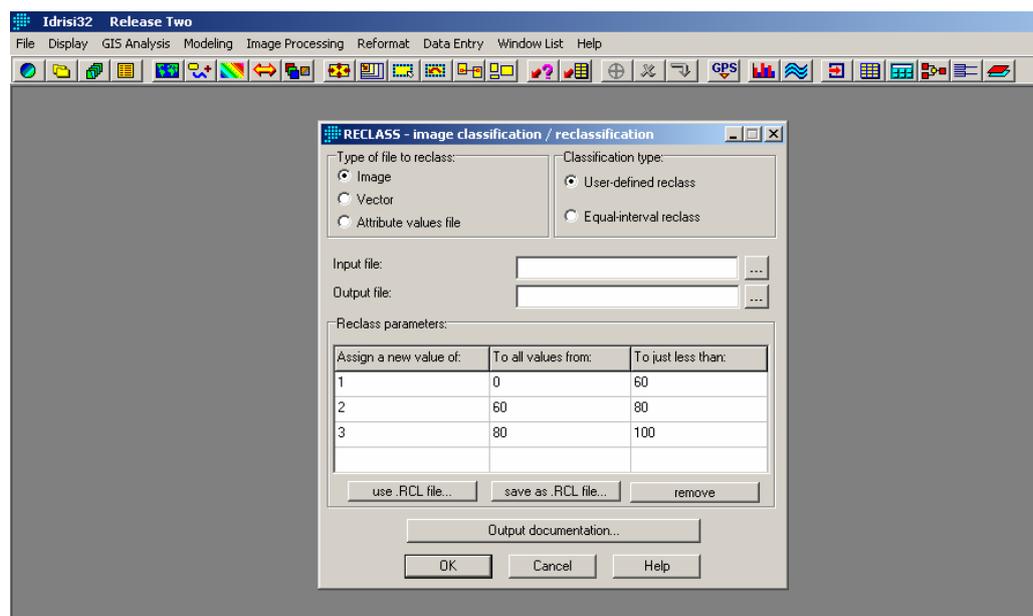


Figura 83.

En la Figura 84 se presenta el mapa de rangos de NC al que se aplicó el procedimiento expuesto.

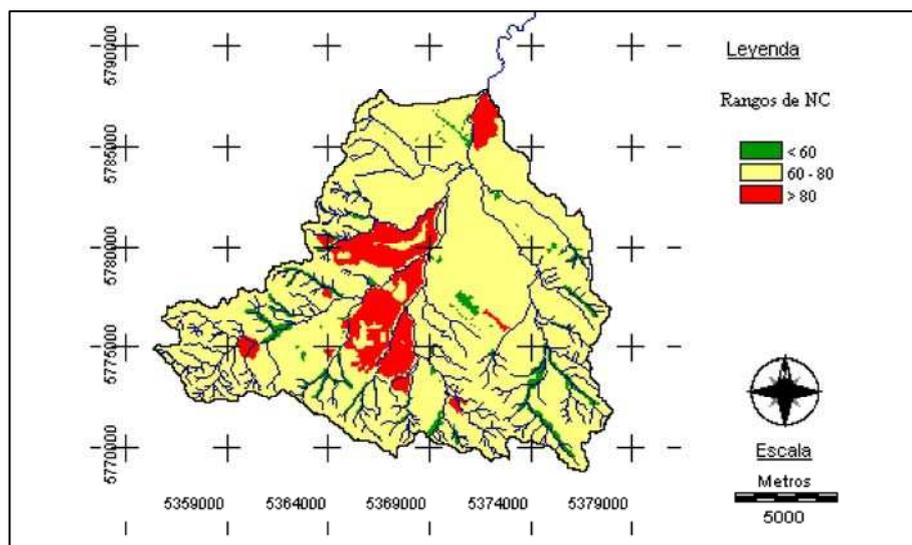


Figura 84. Mapa de rangos de de Número de Curva en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Interpolación topográfica. Elaboración de un modelo digital del terreno.

El modelo digital del terreno (MDT) es un archivo raster, en el cual los valores de cada píxel representan la cota del terreno.

Entre los pasos previos a su obtención se debe realizar la digitalización de las curvas de nivel a partir de cartas topográficas. Para ello se puede utilizar un software CAD y guardar el archivo en formato *.dxf, de AutoCAD 12, para procesarlo con Idrisi 32©. Este archivo se debe importar en Idrisi 32 como archivo vectorial (*.vct). También se pueden digitalizar en pantalla las curvas de nivel con Idrisi 32 ©.

Posteriormente, se debe convertir este archivo vectorial de curvas de nivel, al formato raster (*.rst), por medio de una rasterización.

Este archivo rasterizado se debe interpolar para obtener el MDT. Para tal fin, ir a la ventana <SIG ANALYSIS => SURFACE ANALYSIS => INTERPOLATION>, y acceder al comando <INTERCON> que realizar la interpolación entre líneas con valor, que en este caso es la cota (Figura 85).

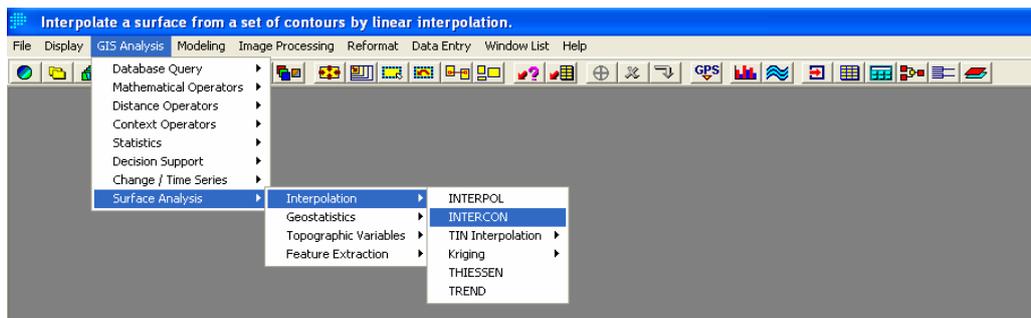


Figura 85.

La ventana emergente que se presenta a continuación, solicita ingresar el nombre del archivo raster de curvas de nivel, y además los valores de cota de los cuatro extremos de la imagen. Se debe ingresar el nombre del archivo de salida a ser creado (el cual también será un archivo raster) (Figura 86).

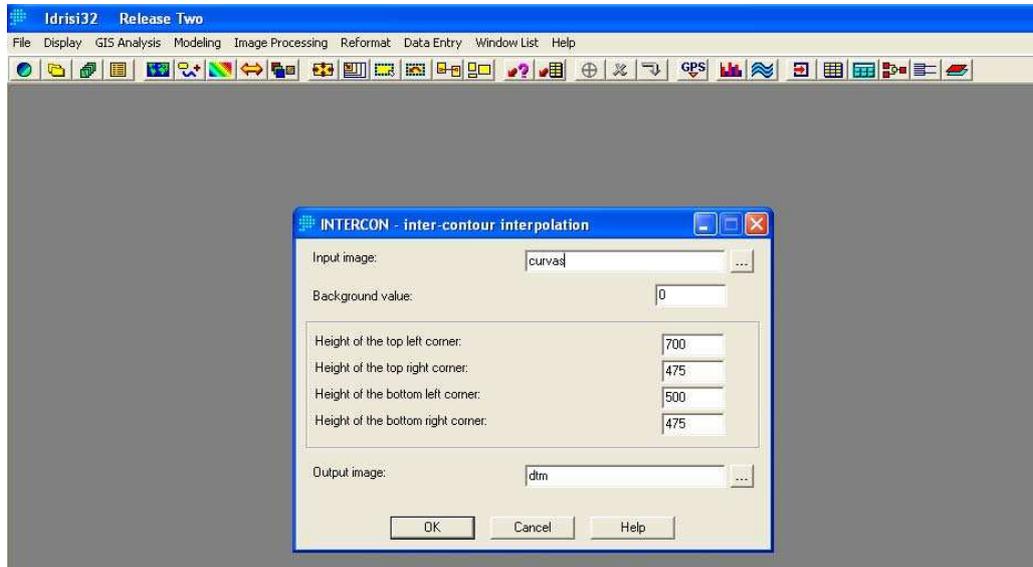


Figura 86.

El proceso puede demorarse, dependiendo del grado de detalle empleado (determinado a través del número de filas y columnas). El mapa generado es el Modelo Digital del Terreno (MDT).

A fin de lograr un correcto procesamiento de los datos en etapas posteriores, será necesario mantener el mismo número de filas y columnas en todos los mapas raster creados.

Para visualizar el MDT, se debe elegir la paleta adecuada a través del comando <**LAYER PROPERTIES**> del <**COMPOSER**>. Existen otros métodos de interpolación, pero en el desarrollo del trabajo práctico se utilizará el explicado previamente (Figura 87).

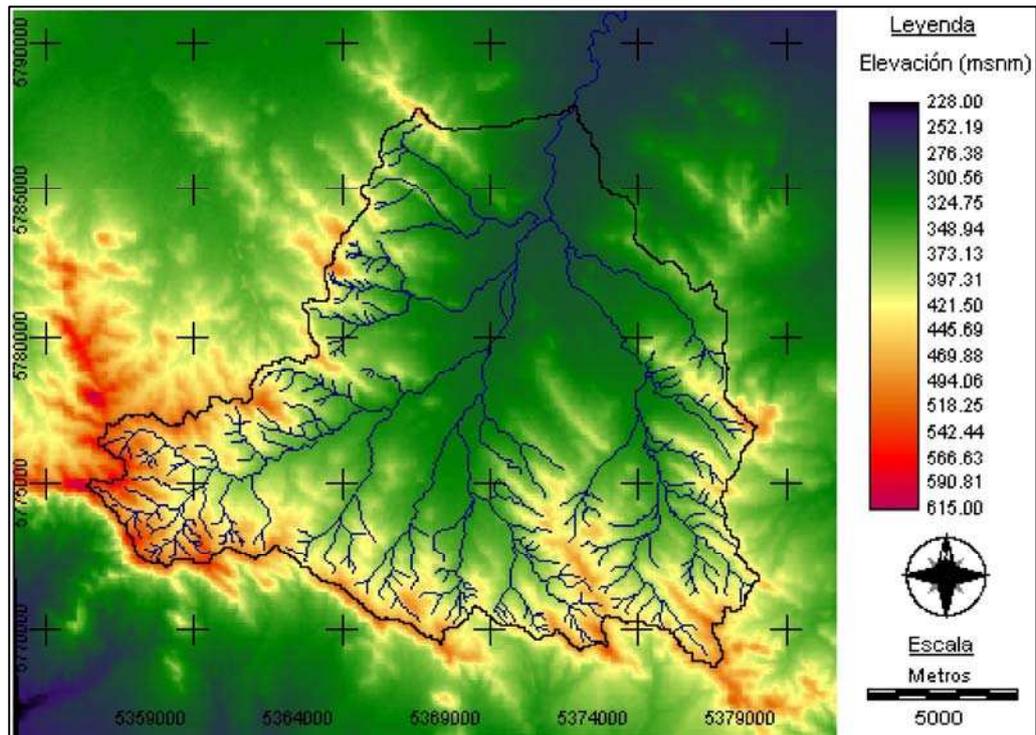


Figura 87. Mapa Modelo Digital del Terreno (MDT) en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Generación de un mapa de pendientes

Para obtener la pendiente del terreno se utiliza el siguiente comando **<SIG ANALYSIS => SURFACE ANALYSIS => TOPOGRAPHIC VARIABLES>**, y optando por el comando **<SLOPE>** (Figura 88).

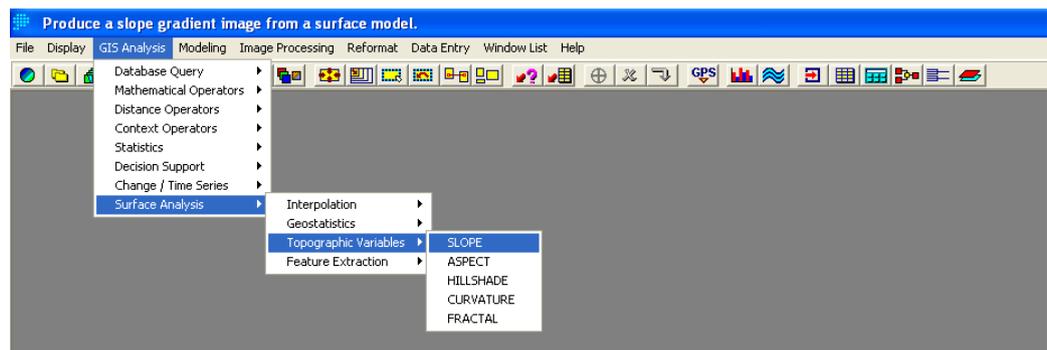


Figura 88.

Se debe indicar en la ventana emergente, el nombre del archivo de entrada y el de salida a ser generado (Figura 89) Además, si la pendiente se desea obtener en grados (*degrees*) o porcentaje (*percent*). Se debe agregar el factor de conversión, el cual debe relacionar la unidad de medida de la georreferenciación y la unidad de medida altitudinal.

Por ejemplo, si las coordenadas geográficas son en kilómetros y las cotas son en metros, este factor de conversión es 0,001. En el caso de que las coordenadas

geográficas y las cotas ambas son en metros, este factor de conversión adquiere el valor 1.

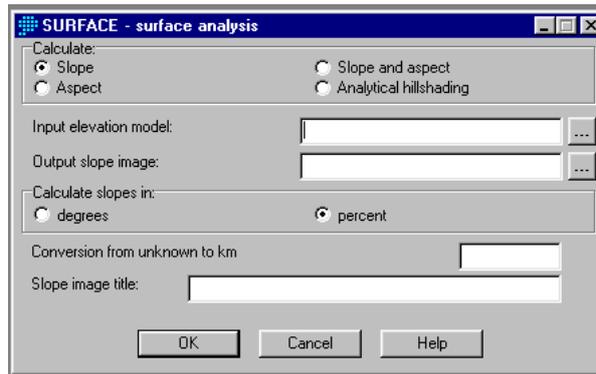


Figura 89.

El mapa obtenido es un mapa de pendientes, en este caso expresado en porcentaje (%) (Figura 90).

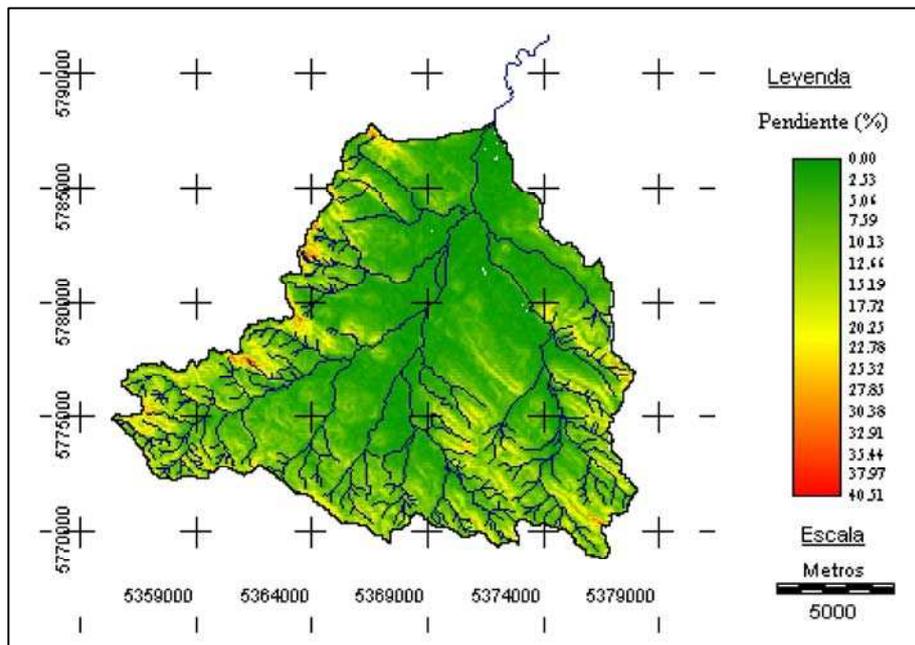


Figura 90. Mapa de Pendientes en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Para este caso en estudio, es conveniente reclasificar la pendiente del terreno en los rangos según la agresividad que genera la pendiente sobre la cuantificación hacia el riesgo de erosión hídrica superficial. Por ello se recomienda reclasificar la pendiente según la Tabla 26.

Rango	Pendiente (%)
1	0-3
2	3-12
3	12-18
4	18-24
5	24-30
6	>30

Tabla 26: Rangos de pendiente.

El comando a utilizar es el siguiente < **SIG ANALYSIS** => **DATABASE QUERY**> y aquí optar por el comando <**RECLASS.**> (Figura 91)

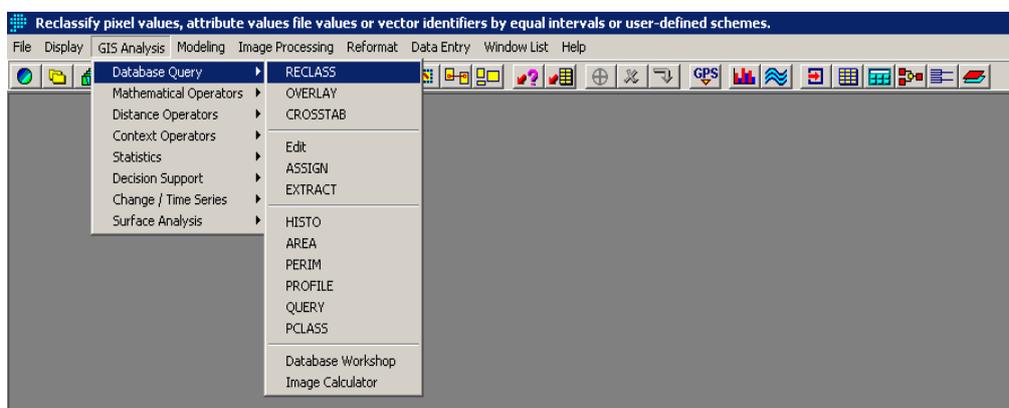


Figura 91.

En la ventana emergente (Figura 92) se debe ingresar el tipo de archivo que se desea reclasificar y su nombre, e indicar el tipo de reclasificación: definidos por el usuario (**User-Defined Reclass**) o con magnitud del intervalo uniforme (**Equal Interval Reclass**).

Al elegir la primera opción se debe ingresar el atributo del nuevo rango y los valores máximos y mínimos del mapa original que estarán comprendidos este nuevo rango.

Los rangos establecidos pueden guardarse generando un nuevo archivo (*.rcl), de modo de aplicar la misma clasificación a otros archivos. El mapa obtenido se presenta en la Figura 93.

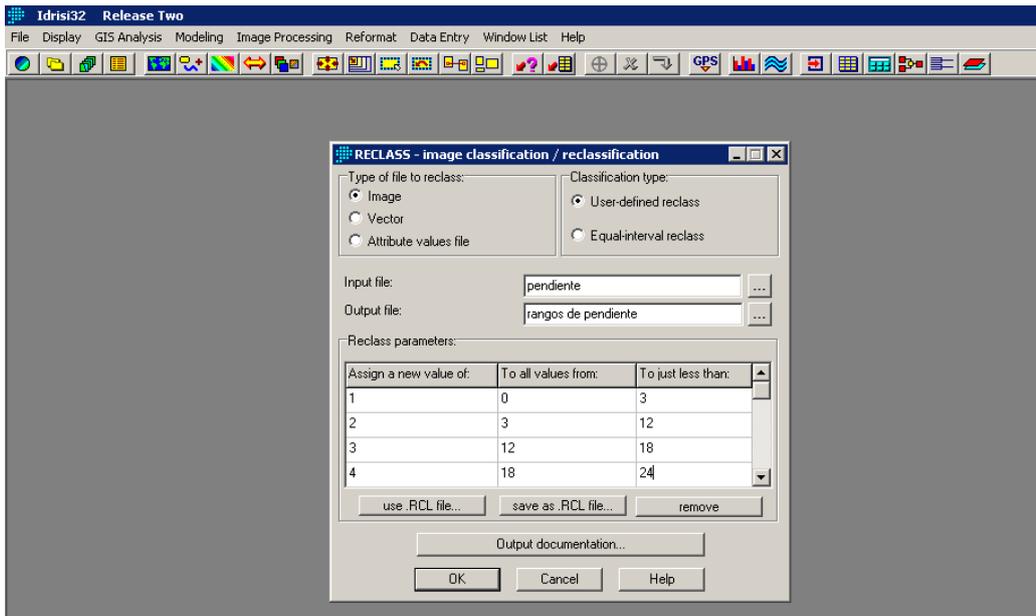


Figura 92.

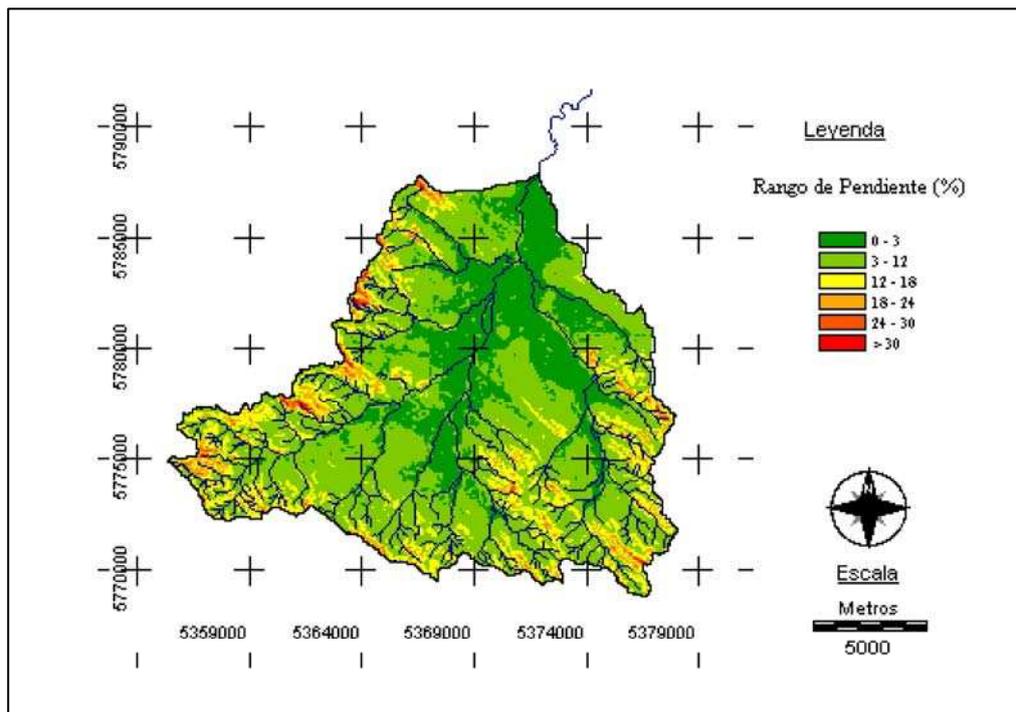


Figura 93. Mapa de Rangos de Pendiente en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Para poder caracterizar la orientación e iluminación de las laderas que se corresponde a la cuenca, se puede utilizar el comando dentro de **<TOPOGRAPHIC VARIABLES>**, considerando que para el mapa de orientación de laderas aplicar (**<ASPECT>**), y el de iluminación de laderas aplicar (**<HILLSHADE>**).

Elaboración de un mapa de Riesgo de erosión

La zonificación del riesgo de erosión se obtendrá mediante el cruzamiento de los mapas de rangos de NC y de rangos de pendientes, previamente elaborados, por medio de la herramienta < CROSSTAB >.

Una vez obtenido el mapa de cruzamiento, se identificarán las diferentes clases de riesgo de erosión aplicando la Tabla 27, por medio de la utilización de < EDIT >.

		Rangos de NC		
		<60	60-80	>80
Pendiente (%)	0-3	MB	MB	B
	3-12	MB	B	M
	12-18	B	M	M
	18-24	M	A	MA
	24-30	A	A	MA
	>30	MA	MA	MA

Tabla 27. Riesgo de Erosión en clases según rangos de NC y rangos de pendiente.

Siendo **MB: Muy Bajo**, **B: Bajo**, **M: Medio**, **A: Alto**, **MA: Muy Alto**. Se recomiendan estos colores para la definición de la paleta de color, ya que indican un grado cualitativo de riesgo.

Luego de obtener el mapa de Riesgo de erosión, clasificado en 5 categorías, se debe adecuar la leyenda (desde <METADATA>), según la correspondencia cualitativa de la Tabla 27, según las clases: 1) Muy Bajo; 2) Bajo; 3) Medio; 4) Alto y 5) Muy Alto, generando como resultado la Figura 94.

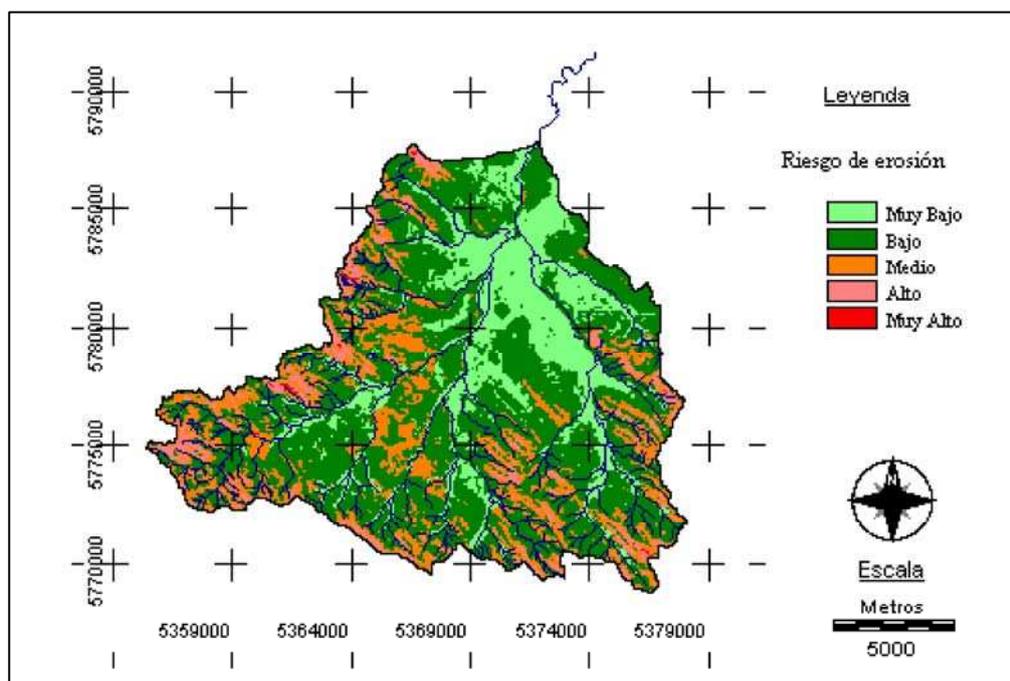


Figura 94. Mapa de Riesgo de Erosión en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Para una mejor comprensión visual del mapa, se recomienda tomar los colores de la leyenda como los expresados en la Figura 94 y en la Tabla 27.

Presentación de mapas

La presentación final de cada uno de los mapas elaborados debe contener como información básica, los siguientes requerimientos:

- √ Leyenda descriptiva,
- √ Grilla con la georreferenciación,
- √ Escala de trabajo,
- √ Norte,
- √ Límite de cuenca y sistema de drenaje.

Para cumplir con estos requisitos se debe acceder a <**MAP PROPERTIES**>, dentro de <**COMPOSER**>, una vez que se haya desplegado el mapa correspondiente.

Dentro de <**MAP PROPERTIES**> se despliegan las siguientes solapas:

- Leyenda:**Legend**
- Georreferenciación:**GeoReferencing**
- Grilla:**MapGrid**
- Norte:**North Arrow**
- Escala:**Scale Bar**.

Elabore la información según corresponda a cada mapa.

Guardar la presentación

Para guardar la presentación (denominado *Mapa de Composición*), se debe acceder a <**Save**>, dentro de <**COMPOSER**> correspondiente a cada mapa abierto.

Se podrá guardar el mapa de composición de diferentes maneras. Por ejemplo, a través de la opción <**Save Composition To Map File**>, originando un nuevo archivo con la extensión ***.map**, que permitirá abrir esta composición en el SIG cuando se lo necesite.

Otra de las opciones de guardado es accediendo a la opción <**Copy To Clipboard**>, o <**Save To Windows Bitmap (*.bmp)**> o <**Save To Windows Metafile (*.wmf)**>

Para acceder a dicha composición se utiliza el comando <**DISPLAY LAUNCHER**>.

DETERMINACIÓN CUANTITATIVA DE LA PÉRDIDA DE SUELO SUPERFICIAL POR ACCIÓN HÍDRICA.

El desgaste de la superficie terrestre por la acción de agentes externos como son el agua o el viento, es lo que se conoce como erosión.

La erosión hídrica es el proceso de disgregación y transporte de las partículas de suelo por la acción del agua. Se establece cuando las gotas de lluvia caen sobre un suelo y tienen la suficiente energía para remover sus partículas, las que son liberadas y transportadas por el escurrimiento superficial hacia los cursos de agua. El ciclo completo culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación, cuando la capacidad de arrastre de las aguas se reduce hasta el punto de no permitir el flujo de las partículas de sedimentos previamente incorporadas al mismo.

La agresión del agua al suelo se puede producir superficialmente (partículas de suelo arrastradas aisladamente), o en profundidad del perfil (partículas de suelo arrastradas masivamente).

Los factores físicos que determinan la erosión hídrica son:

Factores climáticos: La **lluvia**, con sus variaciones locales en cuanto a cantidad, intensidad y distribución, y la **temperatura** con su acción directa sobre las formas de vida. Altas temperaturas descomponen rápidamente la materia orgánica, haciendo que el suelo pierda la capacidad de absorción de agua, repercutiendo finalmente en un mayor escurrimiento con fuerza degradativa.

Factor de cobertura vegetal: La **parte aérea** de la cubierta vegetal y su arquitectura foliar y caulinar interceptan la lluvia, amortiguando su fuerza de impacto de las gotas sobre el suelo, contribuyendo a disminuir su energía cinética inicial. La hojarasca caída y las raíces de las plantas protegen el suelo y mejoran su estructura, la infiltración y la capacidad de retención de agua, además de retardar el escurrimiento. La vegetación también influye en los efectos del sol y el viento sobre la superficie del suelo. En cuanto a las masas forestales, existen distintos antecedentes en relación a su influencia sobre los recursos hídricos. Se ha evaluado positivamente el impacto de las plantaciones forestales en regiones montañosas, sobre la reducción de la erosión de los suelos y en la consolidación de cauces.

Factores edáficos: En el **suelo**, la textura, la agregación del suelo, la distribución de las partículas, la permeabilidad del perfil, la humedad inicial del suelo y la pedregosidad superficial son los principales factores determinantes de la erosión de los mismos. Los suelos con estructuras bien desarrolladas, estables y migajosas resisten por más tiempo la separación de partículas, absorbiendo las lluvias más rápidamente, reduciendo la magnitud del escurrimiento destructivo.

Factores topográficos: El grado de **inclinación** del terreno incide debido a que las pérdidas de suelo son mucho mayores en los terrenos de pendiente abrupta e irregular. En relación a la **longitud de la pendiente** toma notable importancia, en lo referido a los efectos de la pérdida de suelo en una ladera.

La **orientación de las laderas** se relaciona con las condiciones climáticas para el desarrollo de la cobertura vegetal. Las laderas con orientación al sur, en el hemisferio sur, están expuestas a menor radiación solar, como consecuencia de ello el suelo posee un mayor contenido de humedad, por la falta de evaporación edáfica, generando un

suelo más saturado con una tendencia a provocar más escurrimiento que una ladera con exposición norte.

MODELOS EMPÍRICOS DE EVALUACIÓN DE PÉRDIDA DE SUELO

A lo largo del tiempo se utilizaron diferentes métodos de determinación de caudales sólidos. Su comienzo fue con la utilización de fórmulas empíricas como la generada por Zing, en el período 1940 hasta 1955. A partir de esa fecha comienza la implementación de modelos paramétricos complejos y en la década del 1970 se traslada la utilización de estos métodos a las cuencas hidrográficas.

A continuación se describe una metodología para la cuantificación de la pérdida de suelo superficial por erosión hídrica aplicada a cuencas hidrográficas.

Modelo USLE.

El modelo USLE (Universal Soil Loss Equation) o Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, es un modelo paramétrico creado para estimar la pérdida promedio anual de suelo en tierras agrícolas. Fue formulado por Wischmeier y Smith, en el año 1965. Es un modelo matemático empírico, que utiliza información sobre precipitación, suelo, pendiente del terreno, y de uso y manejo del suelo y combina la información proveniente de la investigación relacionada con la erosión hídrica, para proporcionar datos de diseño en los planes de conservación (Wischmeier y Smith, 1978).

Este modelo es una función de la erosividad de las precipitaciones y de la erodabilidad del suelo, y de las consecuencias antrópicas de uso, como se observa en la Figura 95.

MODELO DE EROSION (USLE)

(Ecuación Universal de Pérdida de Suelo)

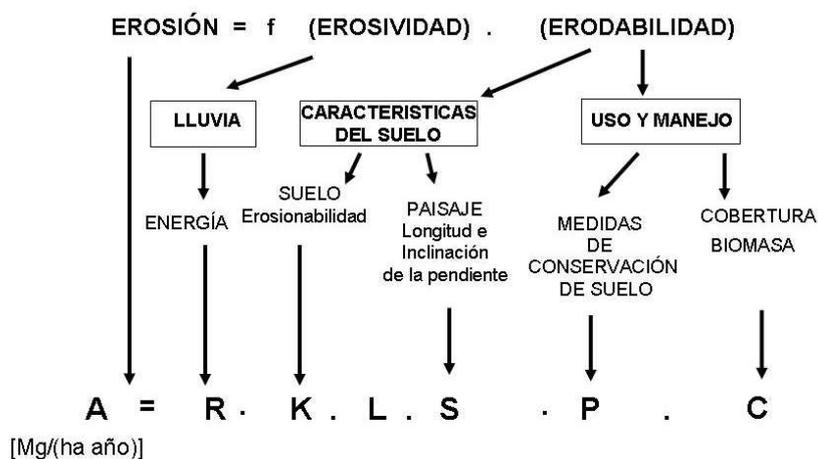


Figura 95. Modelo USLE

Este modelo permite determinar las tasas de erosión para diferentes sistemas de uso y manejo de suelos. Al comparar estas tasas con la tolerancia, se pueden seleccionar las combinaciones de cultivo y manejo apropiadas para el control adecuado de la erosión.

La USLE se puede aplicar cuando la erosión es laminar y en surcos, cuando la producción de sedimentos se origina en terrenos con pendiente conocida y en canales simples y canales de terraza. No se puede utilizar para cuantificar erosión en barranco inciso efímero o permanente, para erosión del cauce o pérdida de masa de sedimentos en profundidad.

La ecuación para el cálculo de la pérdida de suelo superficial basado en Wischmeier y Smith (1978), se expresa según Gaspari et al (2009), con la Ecuación 17.

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad \text{Ecuación 17.}$$

Donde

A: Pérdida de suelo por erosión pluvial ($Mg.ha^{-1}.año^{-1}$).

R: Factor índice de erosión pluvial o erosionabilidad del aguacero ($J.cm.m^{-2}.h^{-1}$).

K: Factor de erodabilidad del suelo ($Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^{-1}.cm^{-1}$).

LS: Factor topográfico, *L*: Factor longitud de pendiente; *S*: Factor gradiente de pendiente.

C: Factor ordenación de cultivos.

P: Factor de control de erosión mediante prácticas de cultivo.

Factor índice de erosión pluvial o erosionabilidad del aguacero (R)

Este factor representa la potencia del aguacero para erosionar superficialmente el suelo. Se lo considera un índice que expresa la torrencialidad de las precipitaciones. Fue establecido por Wischmeier en 1959, tras analizar datos de la distribución del tamaño de las gotas de lluvia, y la velocidad de la gota de lluvia, provenientes de una serie de investigaciones.

El factor de erosión pluvial (R) se define como el producto de la energía cinética (EC) de un aguacero por su máxima intensidad en 30 minutos, dividido 100. La Ecuación 18 permite calcular su valor.

$$R = \frac{EC \cdot I_{30}}{100} \quad \text{Ecuación 18.}$$

Donde:

EC: Energía cinética

I₃₀: Máxima intensidad en 30 minutos

La energía cinética del aguacero, en $J.m^{-2}$, está expresada por la Ecuación 19.

$$EC = \sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log I) \cdot (I \cdot T) \quad \text{Ecuación 19.}$$

Donde:

$(210,2 + 89 \log_{10} I)$: representa la energía cinética del aguacero de intensidad por cm de lluvia y m² de superficie ($J \cdot cm^{-1} \cdot m^{-2}$)

T: Período de tiempo, en horas, para intervalos homogéneos de lluvia durante el aguacero.

I: Intensidad del aguacero en los intervalos citados, en $cm \cdot h^{-1}$.

Entonces, reemplazando en la Ecuación 19 la EC, el factor R se puede calcular según la Ecuación 20.

$$R = \frac{\sum_{j=1}^n (210,2 + 89 \log I) \cdot (I \cdot T) \cdot I_{30}}{100} \quad \text{Ecuación 20.}$$

El factor R toma diferentes valores según las regiones climáticas del planeta, alcanzando valores cercanos a 100 (en áreas con baja precipitación) y hasta 2.500 $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ (en zonas de alta intensidad y cantidad de precipitación).

A nivel nacional, Rojas y Conde (1985) publicaron “Estimación del Factor “R” de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos para el centro-este de la República Argentina”, indicando valores de 786 $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ para Mercedes (Corrientes) y para Bahía Blanca (Buenos Aires), el valor es de 246 $J \cdot cm \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$.

Este trabajo también expone un mapa de de isoerodentas para la República Argentina, que son líneas que unen puntos de igual erosividad de las precipitaciones.

Factor de erodabilidad del suelo (K)

La erodabilidad del suelo está representada por el factor K que expresa la susceptibilidad de un suelo a ser erosionado y está relacionado con la estabilidad estructural del mismo. Se calcula a partir del porcentaje de las distintas fracciones granulométricas, porcentaje de materia orgánica, permeabilidad y estructura, siendo sus unidades de medida expresadas en $Mg \cdot m^2 \cdot h \cdot ha^{-1} \cdot J^{-1} \cdot cm^{-1}$. (Ecuación 21).

$$100 \cdot K = 10^{-4} \cdot 2,71 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a) + 4,20 \cdot (b - 2) + 3,23 \cdot (c - 3) \quad \text{Ecuación 21.}$$

Siendo:

$M = (\% \text{ limo} + \% \text{ arena muy fina}) \cdot (100 - \% \text{ arcilla})$, expresándose también como:
 $(\% \text{ partículas entre } 0,002 \text{ y } 0,1 \text{ mm}) \cdot (\% \text{ partículas entre } 0,002 - 2,0 \text{ mm})$

$a = \text{Porcentaje de materia orgánica} = \text{Porcentaje de Carbono Orgánico} \times 1,724$.

b = Indica la estructura del suelo.

1. Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
2. Gránulo fino y grumo medio (1 - 2 mm)
3. Gránulo medio, grumo medio (2 - 5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
4. Gránulo liso, prismático columnar y muy grueso (> 10 mm).

c = Clase de permeabilidad del perfil del suelo según Soil Survey Manual del U.S.D.A

1. Rápida o muy rápida
2. Moderadamente rápida
3. Moderada
4. Moderadamente lenta
5. Lenta
6. Muy lenta

Este factor c se puede estimar a partir de las curvas de conductividad hidráulica del suelo.

Se puede utilizar la Ecuación 22, con el fin de simplificar la ecuación, prescindiendo de los términos donde aparecen los factores b y c, obteniendo un K simplificado.

$$\mathbf{K_{simplificado} = 10^{-6} \cdot 2,71 \cdot M^{1,14} \cdot (12 - a)} \quad \mathbf{Ecuación 22.}$$

El Factor K se puede determinar a partir de datos provenientes de análisis de suelo, principalmente los referidos a la granulometría y al contenido de materia orgánica, y en función de las características propias de cada suelo.

Por ejemplo, el factor K en un suelo del tipo Hapludol tapto-árgico ubicado en la llanura continental presenta un valor de $0,08 \text{ Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$, mientras que un Argiudol típico situado también en la llanura continental, tiene un valor de $0,46 \text{ Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$; en cambio para un Natralbol típico de la llanura continental se estimó el valor de $0,86 \text{ Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$ (Iruña et al, 2007; Gaspari et. al., 2009).

Factor topográfico (LS)

El efecto de la pendiente sobre la pérdida de suelo por escorrentía fue comprobado experimentalmente en lotes de igual área, con suelos coluviales, con una precipitación media anual de 2701 mm, resultando aumentos progresivos en cantidad de suelo erodado a medida que aumenta el grado y longitud de pendiente, como se representa en la Figura 96 (Henaó, 1988).

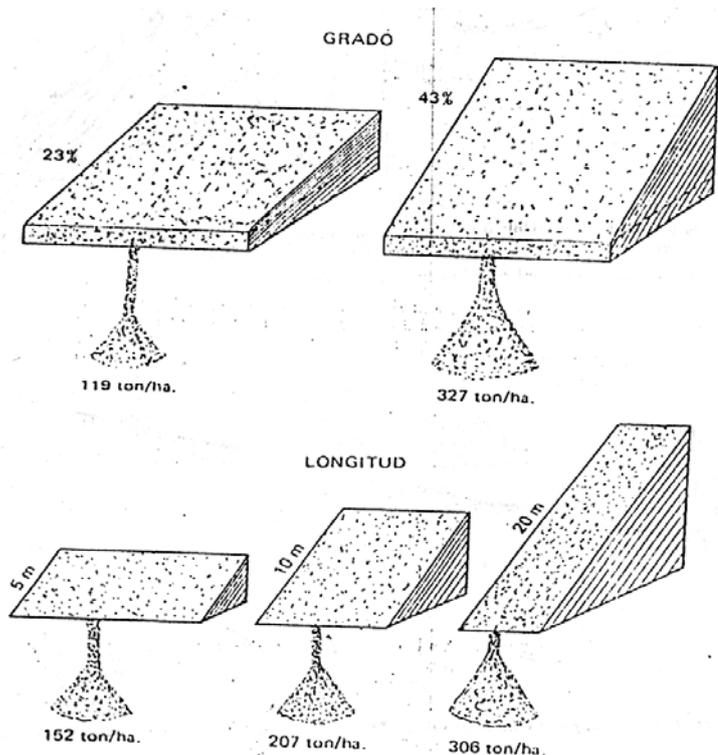


Figura 96. Efectos de la pendiente (gradiente o longitud) sobre las pérdidas de suelo por escurrimiento, en lotes de igual superficie, con suelos coluviales, con una precipitación promedio de 2.701 mm (Tomado de Cenicafé, 1975)

La longitud de pendiente y el gradiente de la pendiente son los dos elementos que conforman el factor topográfico (LS).

En la práctica, la longitud de la pendiente (L) es la distancia entre el punto más alto de caída de la gota de lluvia y el punto donde la pendiente disminuye hasta dar comienzo a la deposición de los sedimentos. El Factor gradiente (S), es la relación entre la pérdida de suelo con un determinado gradiente. Para lograr el factor LS Wischmeier y Smith (1976) definieron parcelas con dimensiones con L de 22,1 m y 9 %, a igualdad de los demás factores de la ecuación USLE.

El factor LS integra longitud y gradiente, y se calcula mediante las Ecuaciones 23 y 24., dependiendo del valor de la pendiente del terreno, en áreas con pendientes menores al 9 % y en áreas con pendientes mayores al 9 %, respectivamente.

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{0,43 + 0,3 \cdot s + 0,043 \cdot s^2}{6,613} \right) \quad \text{Ecuación 23.}$$

$$LS = \left(\frac{\lambda}{22,1} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{s}{9} \right)^{1,3} \quad \text{Ecuación 24.}$$

La longitud de la ladera (λ) se calcula con la Ecuación 25.

$$\lambda = \frac{0,5 \cdot DA}{LCH}$$

Ecuación 25

Siendo

DA: Área del sector delimitado

LCH: Longitud total de los cursos que drenan por la misma

Factor de ordenación de cultivos (C)

La relación entre el valor medio de pérdida de suelo en un campo cultivado o con vegetación y la pérdida en una parcela, en idénticas condiciones de lluvia, suelo y topografía, pero sometida a barbecho continuo está representado por el factor de ordenación de cultivos (C). Este factor considera la protección que la vegetación proporciona al suelo, el efecto beneficioso que se produce contra la erosión y los efectos que los residuos de la vegetación tienen en la protección del suelo.

Se determina experimentalmente para cada clase de cobertura vegetal. A continuación se presenta una serie de tablas con valores medios anuales de Factor C (Tablas 28 y 29 tomadas de Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Cubierta vegetal	Valor de Factor C
Arbolado forestal denso	0,01
Arbolado forestal claro	0,03
Matorral con buena cobertura	0,08
Matorral ralo y eriales	0,2
Cultivos arbóreos y viñedos	0,4
Cultivos anuales y herbáceos	0,25
Cultivos en regadío	0,04

Tabla 28. Valores de Factor C.

Cubierta vegetal		Cubierta en contacto con el suelo						
Tipo y altura de cubierta	% recubrimiento	Tipo	Porcentaje de cobertura del suelo					
			0	20	40	60	80	95-100
Cubierta inapreciable y matorros ($\leq 0,5$ cm)		G	450	200	100	042	013	003
		W	450	240	150	090	043	011
Plantas herbáceas y matorros ($\leq 0,5$ cm)	25	G	360	170	090	038	012	003
		W	360	200	130	082	041	011
	50	G	260	130	070	035	012	003
		W	260	160	110	075	039	011
Matorral (≤ 2 m)	75	G	170	100	060	031	011	003
		W	170	120	090	067	038	011
	25	G	400	130	090	040	013	003
		W	400	220	140	085	042	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable (≤ 4 m)	50	G	340	160	085	038	012	003
		W	340	190	130	081	041	011
	75	G	280	140	080	036	012	003
		W	280	170	120	077	040	011
Arbolado joven, sin matorral apreciable (≤ 4 m)	25	G	420	190	100	041	013	003
		W	420	230	140	087	042	011
	50	G	390	180	090	040	013	003
		W	390	210	140	083	042	011
75	G	360	170	090	039	012	003	
	W	360	200	130	083	041	011	

Tabla 29. Factor C (Elaborada por Wischmeier (Valores de Factor C $\times 10^{-3}$ para pastizales, matorrales y arbustos).

Siendo:

G: cubierta vegetal en contacto con el suelo, formada por pastizal de al menos 5 cm de humus.

W: cubierta vegetal en contacto con el suelo compuesta por plantas herbáceas con restos vegetales sin descomponer.

Factor prácticas de cultivo (P).

Expresa la relación que existe entre el valor medio de las pérdidas de suelo producidas en un campo donde se realizan prácticas de conservación de suelo, y las que se originarían en el mismo campo si se hicieran las labores a favor de la pendiente.

Los valores de P se determinaron en forma experimental para distintos tipos de prácticas de conservación, empleándose para los ensayos parcelas de 22,1 m de longitud de pendiente y 9 % de pendiente.

Las prácticas de conservación utilizadas en tierras arables son la labranza en curvas de nivel, las franjas en contorno y los cultivos en terrazas. Por otra parte los drenajes estabilizados para la eliminación de los excesos de agua son parte necesaria de cada una de estas prácticas. Según las medidas de conservación de suelos que se aplican, los valores de P se asignan utilizando tablas elaboradas por el Soil Conservation Service de Estados Unidos (Tabla 30).

Pendiente (%)	Cultivo a nivel	Cultivo en fajas	Cultivo en terrazas	
			Terrazas de desagüe	Terrazas de infiltración
2 – 7	0,50	0,25	0,10	0,05
8 – 12	0,60	0,30	0,12	0,05
13 – 18	0,80	0,40	0,16	0,05
19 – 24	0,90	0,45	0,18	0,06

Tabla 30. Factor P (Tomada de Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Clasificación de Pérdidas de suelo

En el año 1981 FAO, PNUMA y UNESCO presentaron una clasificación de la pérdida de suelo en un trabajo denominado “Clasificación Provisional para la evaluación de la Degradación de los Suelos”, confeccionando una tabla con rangos según pérdida de suelo por aplicación de la USLE (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990) (Tabla 31).

Pérdida de suelo (Mg.ha ⁻¹ .año ⁻¹)	Pérdida de suelo (mm.ha ⁻¹ . año ⁻¹)	Grado de erosión hídrica
< 10	< 0,6	Nulo o leve
10 – 50	0,6 – 3,3	Moderado
50 – 200	3,3 – 13,3	Alto
> 200	> 13,3	Muy alto

Tabla 31. Clasificación en grado de erosión hídrica superficial, según FAO, PNUMA y UNESCO.

Esta clasificación (Tabla 31) define cada rango de la siguiente manera:

- Ausente: cuando no hay presencia de erosión hídrica superficial.
- Leve: Solo se adelgaza el horizonte A o capa arable, observándose casi en su totalidad (menos del 25% del espesor). Aparecen pequeñas áreas desnudas (sin vegetación natural), formación de "patas de vaca" y acumulación de sedimentos en la base de las pendientes o en las depresiones.
- Moderado: Poca formación de surquillos. El horizonte A o capa arable ha sido arrastrado en parte (entre 25% y 75%). Aparece mayor proporción de áreas desnudas y la formación de "patas de vaca". Algunas áreas pueden tener patrones intrincados que varían de manchas pequeñas a sitios erodados, donde el horizonte original A ha sido removido. En algunos lugares se puede encontrar mezcla del horizonte original A con el material del horizonte subyacente.
- Alto: El arrastre del horizonte A o capa arable es severo, casi total (más del 75%). Frecuentemente ocurre formación de surcos y en ocasiones se presentan cárcavas aisladas. En áreas cultivadas el material que se encuentra debajo del horizonte A está expuesto en la superficie.
- Muy alto: Pérdida completa del horizonte A, en forma muy severa. Se presenta formación de cárcavas en una red densa. Los suelos han sido destruidos casi totalmente, excepto en las pequeñas áreas que quedan entre cárcava y cárcava.

La pérdida de suelo superficial tolerable de suelo se define como la tasa máxima de erosión permisible para que la fertilidad del suelo pueda mantenerse durante 20 o 25 años (Morgan, 1997).

La evaluación de tolerancia de pérdidas de suelo en un terreno, es un estudio básico para la implementación de un modelo de ordenación territorial. Depende de diversos factores, tales como la profundidad del suelo, sus propiedades físicas, el desarrollo del sistema radical de la vegetación, el contenido de materia orgánica, pérdida de nutrientes, características de la topografía, entre otros (López Cadenas del Llano, 1998).

Según Wischmeier y Smith. (1978) las pérdidas de $12,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ son admisibles como máximo en un suelo profundo, de textura media, permeabilidad moderada y con un subsuelo favorable para la vida de las plantas.

Según Hudson, citado por López Cadenas del Llano (1998), para suelos arenosos profundos son admisibles pérdidas de entre 4 a $6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ y en suelos francos se admite en un rango entre 13 y $15 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. En general, para suelos agrícolas, se dan valores de 4 a $6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en suelos arenosos poco profundos; de 6 a $8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en suelos areno – arcillosos, más de $12,5 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ para suelos francos, profundos y fértiles.

En la actualidad sigue siendo universalmente aceptada la clasificación elaborada por FAO en el año 1981. Considerando que la tolerancia en pérdida de suelo varía según las características peculiares de cada región bajo estudio, se recomienda generar tablas de clasificación en rangos de pérdida de suelo, particulares para cada región.

Para conocer la lámina de suelo perdida, se debe realizar la integración de la cantidad de suelo perdido y la densidad del mismo. Se debe considerar que $0,1 \text{ mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ es igual a $1 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

Por ejemplo: En una cuenca A se pierden $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de suelo por erosión hídrica superficial, la densidad del suelo es de $2,0 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Entonces $5 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1} = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Este valor se compara con la clasificación de FAO (Tabla 31), siendo, en este caso, la pérdida de suelo por erosión hídrica superficial leve.

MODELO MUSLE

La Ecuación Modificada de Pérdida de Suelo (MUSLE permite calcular el valor de pérdida de suelo para una determinada cuenca o unidad hidrológica en estudio, expresado en megagramos o toneladas, para una precipitación (Ecuación 26).

El Factor R utilizado en la USLE se reemplaza por el efecto del flujo de escurrimiento en el proceso erosivo de una tormenta específica / modal, a través del Volumen Total Escurrido (Q), en m^3 , y de Caudal pico (q), en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

$$Y = 11,8 \cdot (Q \cdot q)^{0,56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

Ecuación 26

Donde Y son los sedimentos emitidos por una tormenta aislada, en Mg en la cuenca; Q es el volumen de escurrimiento en m^3 y q el caudal máximo instantáneo (Caudal pico) en $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE SUELO MEDIANTE EL USO DE SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

El Sistema de Información geográfico (SIG), como conjunto de herramientas informáticas que permite procesar información digital georreferenciada y permite desarrollar, almacenar, desplegar, consultar, analizar y modelar datos geoespaciales, se puede utilizar para generar la información base para la toma de decisiones forestales, agrícolas, sociales y territoriales. Además, es una herramienta lógica para aplicar un modelo USLE, debido a que todos los factores que forman la ecuación tienen una clara representación geográfica sobre el territorio.

La cartografía a utilizar debe ser en detalle según el objeto en estudio. En la Figura 97 se presenta el modelo cartográfico básico para la aplicación de la USLE a nivel geoespacial.

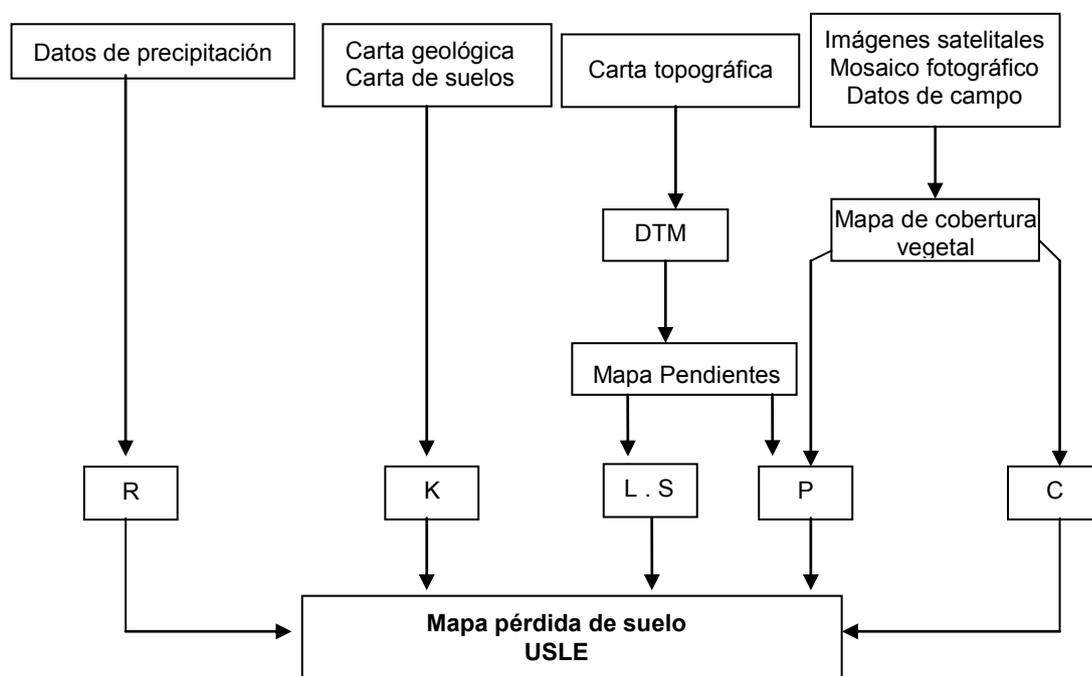


Figura 97. Secuencia de actividades para la determinación de la pérdida de suelo.

La generación de mapas de pérdidas de suelo por erosión se logra a partir de la obtención de mapas de cada uno de los factores de la USLE. Posteriormente, mediante el procesamiento de capas temáticas se genera información cuantitativa para realizar diagnósticos en cuencas hidrográficas, que permitan determinar dónde y por qué se está produciendo el fenómeno erosivo.

Ejemplo de aplicación.

Como caso de estudio se aplicarán las ecuaciones USLE y MUSLE para la determinación de la pérdida de suelo superficial por erosión hídrica en la Cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande con uso de SIG, según la secuencia de la Figura 97.

Aplicación de la USLE

- La zonificación espacial de la erosividad de las precipitaciones se expresa por un mapa de isoerodentas, las cuales representan líneas que unen puntos de igual R. En este caso el R en la localidad más cercana, presenta un valor de $289,65 \text{ J}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$.

El mapa de R tomará un valor uniforme para toda la cuenca debido a que hay una sola estación pluviográfica, a nivel regional (Rojas y Conde, 1985). Este valor se establece por medio del SIG Idrisi 32 © con una edición del mapa de la cuenca, asignándole el valor mencionado de R, como número real.

- El mapa del factor K se confecciona a partir del mapa de suelos asignándole a cada serie de suelo el valor de K, calculado con la ecuación, con los datos de Tabla 32.

Serie de Suelos	Arcilla	Limo	Arena MF	M.O	Permeabilidad	Estructura
Arroyo Pillahuinco	26,5	35,1	33,4	5,2	Moderada	BS, medios, moderados
Claudio Molina	33,6	44,9	19,6	6,93	Moderadamente lenta	BS gruesos, moderados a fuertes que rompen a BS
El Gavilán	37,4	47,6	12,9	4,27	Lenta	Estructura en BS gruesos y medios, moderados que
La Loma	25	32,7	38,8	3,78	Moderada	BS, medios, moderados
Laprida	25,1	41,5	30,2	4,48	Moderada	BS medios, moderados
Pillahuincó	40	31,1	22,6	4,33	Lenta	BS moderados a finos, que rompen a bloques
Rancho Grande	29,6	28,4	32	4,39	Moderadamente lenta	BS, medios, moderados a finos que rompe a bloques
San Gabriel	20,6	44	32,6	3,22	Lenta	BS gruesos irregulares, fuertes que rompen a bloques
Semillero Buck	25,7	31,5	38,8	4,58	Moderada	BS medios, moderados, que rompen en BS finos y granular
Tres Arroyos	25,9	26,9	37,2	3,87	Moderadamente lenta	BS, medios, moderados a fuertes que rompe en BS finos

Tabla 32. Datos de análisis de las diferentes series de suelos en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Donde **BS** = Bloques subangulares

En la Tabla 33 se expresan los valores calculados de K ($\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) para cada complejo de suelo presente en la cuenca en estudio.

Complejo suelo	Serie de Suelo	Área relativa	K	K complejo
AoPoG	Arroyo Pillahuincó Grande	1	0,35	0,350
	Semillero Buck	0,5	0,35	
EG2	Claudio Molina	0,3	0,26	0,325
	El Gavilán.	0,2	0,36	
	Pillahuincó.	0,4	0,27	
PH5	San Gabriel	0,3	0,55	0,278
	San Gabriel	0,15	0,55	
	Tres Arroyos	0,15	0,37	
PH2	Pillahuincó.	1	0,27	0,270
RG	Afloramiento de tosca.	0,4	0	0,186
	Rancho Grande.	0,6	0,31	
	Tres Arroyos.	0,8	0,37	
TA10	Semillero Buck.	0,1	0,35	0,358
	Pillahuincó.	0,1	0,27	
TA12	Tres Arroyos.	0,8	0,37	0,378
	Laprida	0,2	0,41	
	Tres Arroyos	0,5	0,37	
TA59	La Loma.	0,2	0,44	0,396
	Laprida	0,3	0,41	
TA6	Tres Arroyos.	0,9	0,37	0,360
	Pillahuincó.	0,1	0,27	

Tabla 33. Factor K ($\text{Mg.m}^2.\text{h.ha}^{-1}.\text{J}^{-1}.\text{cm}^{-1}$) para los diferentes complejos de suelos de la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

El mapa resultante (Figura 98) se logró por la edición de los polígonos del mapa de suelos, asignándoles valores de K como números reales para su procesamiento.

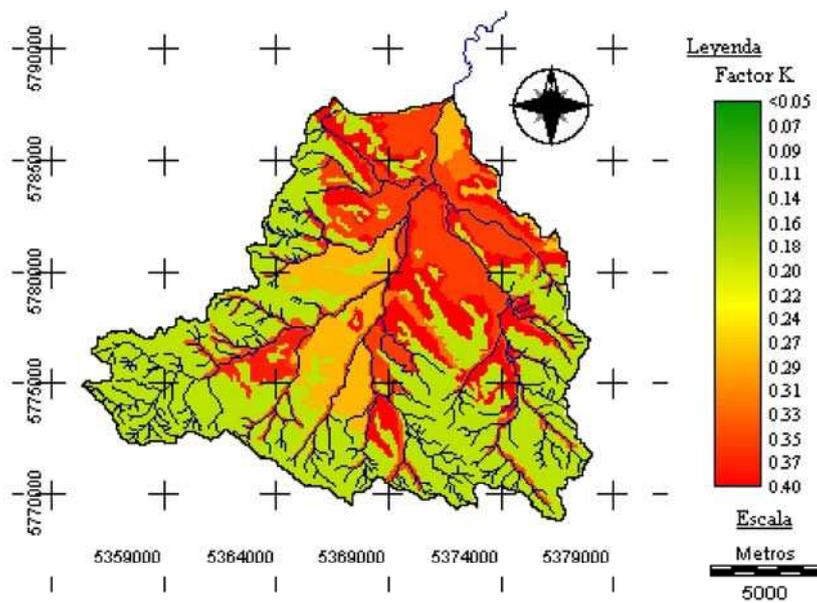


Figura 98. Zonificación del Factor K ($Mg.m^2.h.ha^{-1}.J^1.cm^{-1}$) en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

- El factor LS se puede determinar partiendo de un modelo digital del terreno o por medio de un mapa topográfico con el cual se obtiene un mapa de pendientes.

En la Tabla 34 se observa una forma simplificada para la determinación del LS, según rangos de pendiente porcentuales, desarrollada por Mintegui Aguirre (1988). A partir de esta reclasificación de las pendientes se le asigna a cada rango el valor correspondiente al LS con una edición con valores reales.

Pendiente (%)	LS
0-3	0,3
3-12	1,5
12-18	3,4
18-24	5,6
24-30	8,7
> 30	> 14,6

Tabla 34. Valores de LS según rangos de pendiente.

En la Figura 99 se visualiza el mapa de LS obtenido para la cuenca aplicando la Tabla 34.

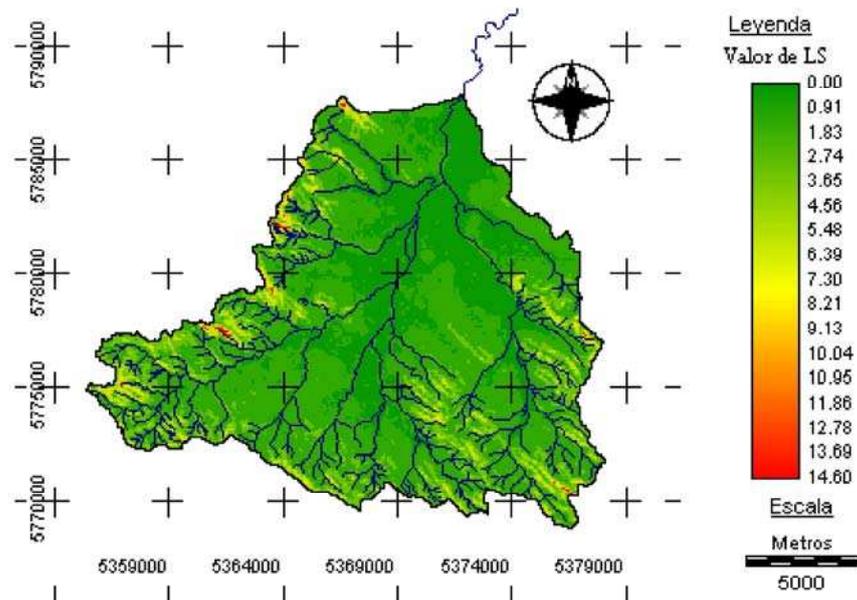


Figura 99. Mapa de LS en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

- Para determinar el valor de Factor C en un sitio, es conveniente el uso de cartografía en detalle, manteniendo la escala de trabajo que se está utilizando en el modelo cartográfico. La zonificación de la vegetación y uso del suelo se puede realizar por medio de la interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas, siendo siempre fundamental el apoyo del trabajo de campo.

A cada tipo de cobertura vegetal identificada se le asigna el valor correspondiente de las Tablas 28 y 29, por medio de la edición con números reales. El mapa obtenido se observa en la Figura 100.

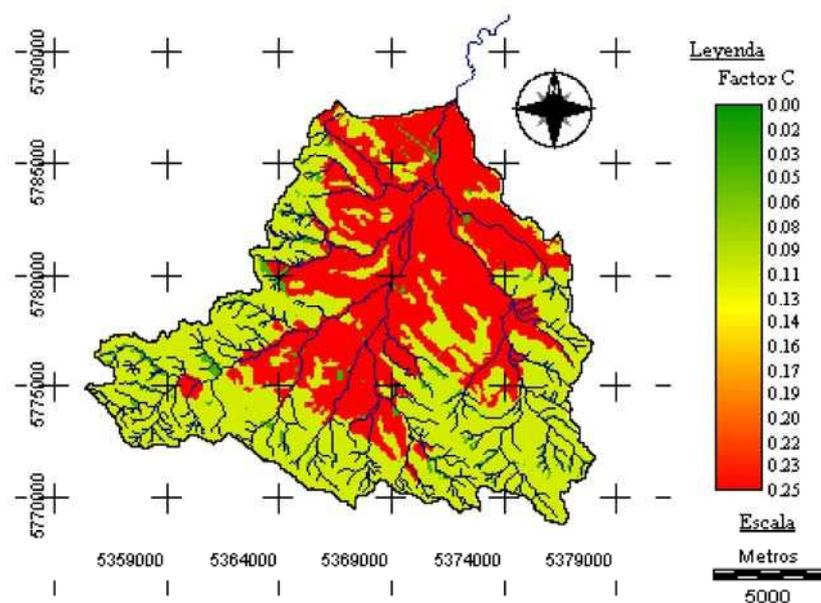


Figura 100. Mapa de Factor C en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

- El factor P se establece en las áreas donde se aplican sistemas de cultivo y de prácticas de conservación para suelos en pendientes específicas. Su valor se determina por la Tabla 30. Esta cartografía se confecciona al integrar áreas de C con medidas conservacionistas y los rangos de pendiente.

Para la zonificación del factor P se recomienda el siguiente procesamiento digital:

1- Extraer polígonos de uso del suelo que contienen prácticas de conservación según el mapa de C. Para ello puede utilizar los comandos, **<EDIT>**, **<RECLASS>** o **<BREAKOUT>**. El mapa resultante es el presentado en la Figura 101. Se recomienda que la clase sin prácticas de cultivo tenga valor cero (0).

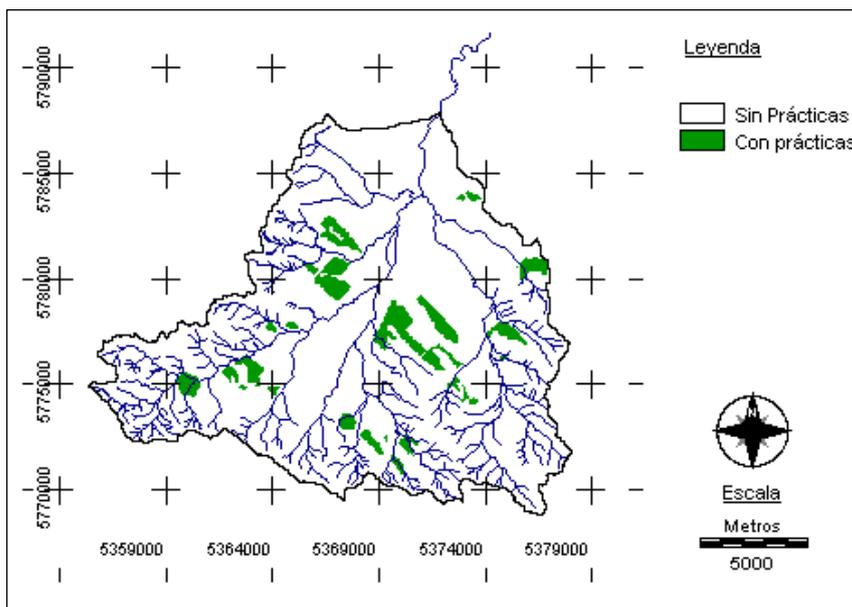


Figura 101. Mapa de áreas con y sin prácticas de cultivo en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

2- Se multiplica el mapa obtenido en el punto 1 por el mapa puro de pendientes en porcentaje elaborado en el práctico de NC. La multiplicación se realiza con la herramienta **<OVERLAY>** o **<IMAGE CALCULATOR >** obteniendo el mapa de la Figura 102. Este mapa indica las zonas con prácticas conservacionistas según pendiente en %, ya que al multiplicar las zonas sin prácticas con valor cero estas se anulan.

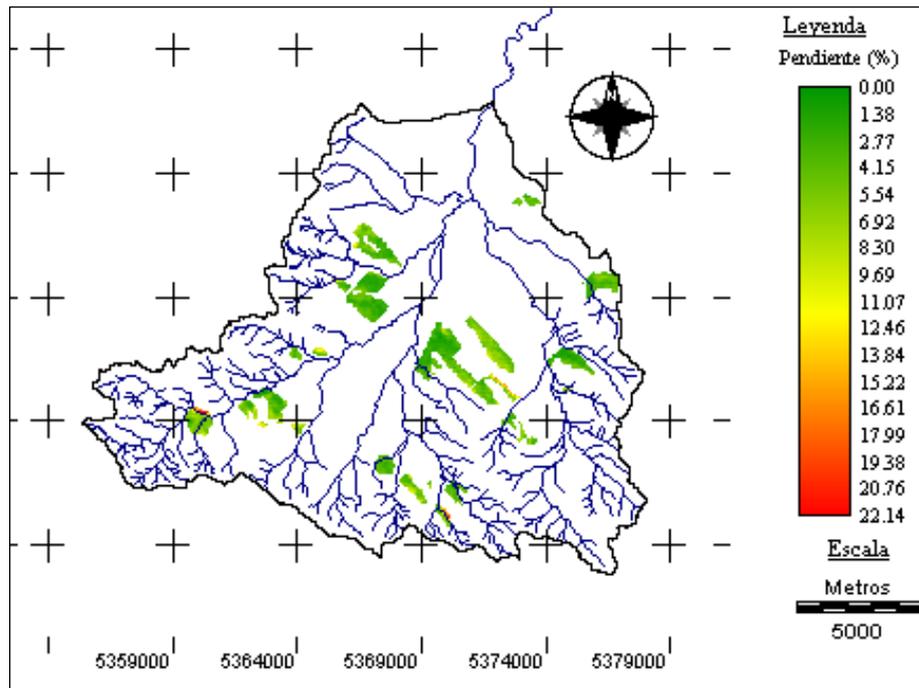


Figura 102. Mapa obtenido por multiplicación del mapa de prácticas con el de pendiente.

3- Reclassificar pendiente en rangos según P de la Tabla 30, utilizando la herramienta <RECLASS>.

Las zonas con pendiente menor que 2% ó mayor que 24% asumirán valor 1, ya que en pendientes bajas o muy altas las curvas de nivel no tienen eficiencia.

Para ello, se reclassifica el mapa obtenido en el punto 2 (Figura 103) de la siguiente manera, guardándolo con valores reales.

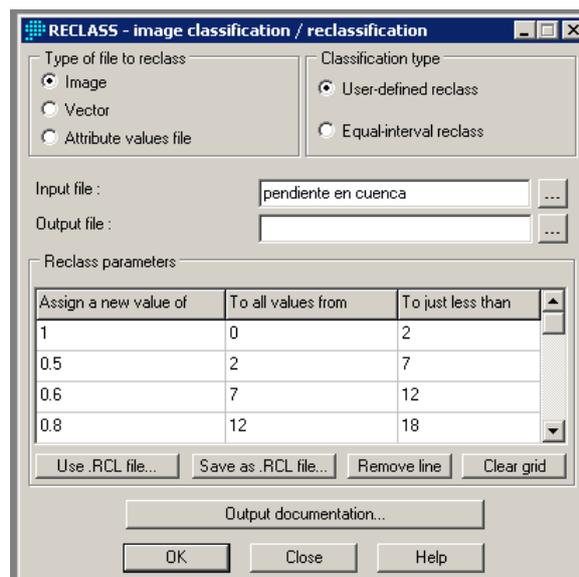


Figura 103. Comando <RECLASS>.

El resultado final es el mapa de valores del factor Prácticas conservacionistas (P) (Figura 104), visualizando valor de 1 en zonas sin prácticas de conservación de suelo y el P correspondiente según pendiente en el resto de la cuenca.

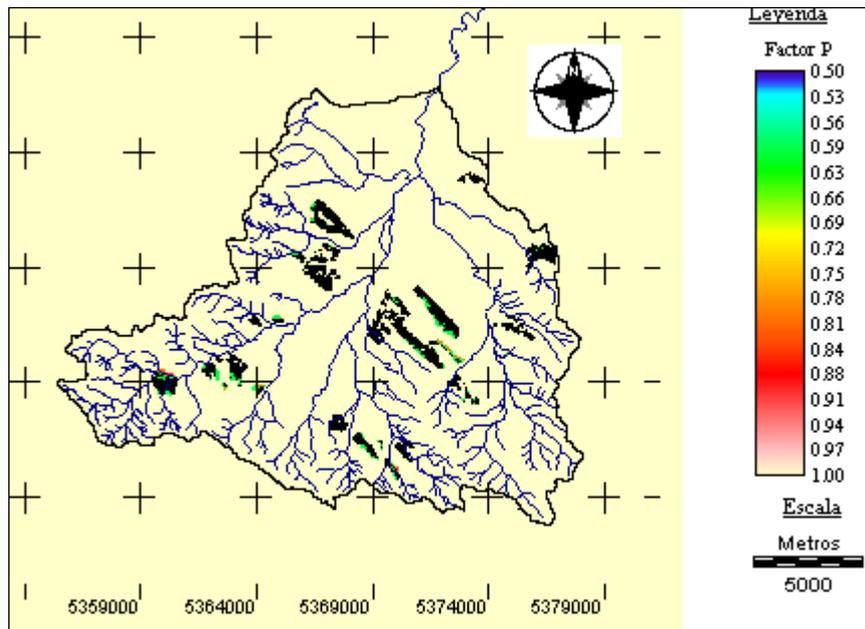


Figura 104. Mapa de Factor P en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Una vez confeccionados los mapas de cada uno de los factores que integran la USLE, se multiplican con el comando **<IMAGE CALCULATOR>** para obtener el mapa de erosión (A) donde se visualiza la zonificación de pérdida de suelo (Figura 105) a nivel de píxel.

Este procedimiento es automático debido a que se realizó la multiplicación de números reales a nivel de píxel. Cada píxel que se toque del mapa va a corresponderse con su pérdida de suelo.

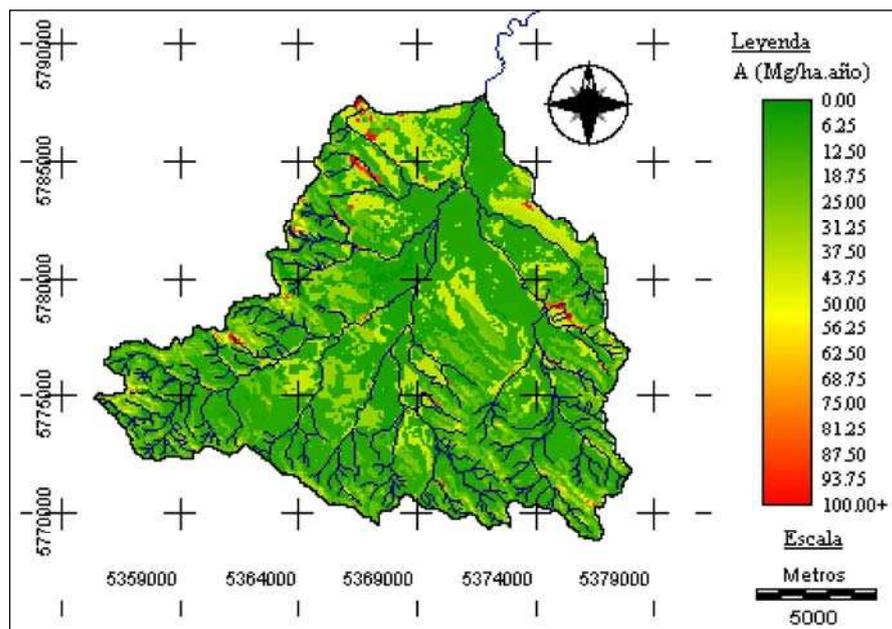


Figura 105. Zonificación de pérdida de suelo según USLE en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

La pérdida de suelo se puede expresar según rangos establecidos por FAO (Tabla 31). Para ello se reclasifica el mapa de la Figura 105 y se obtiene el mapa de Riesgo de Erosión en la cuenca (Figura 106).

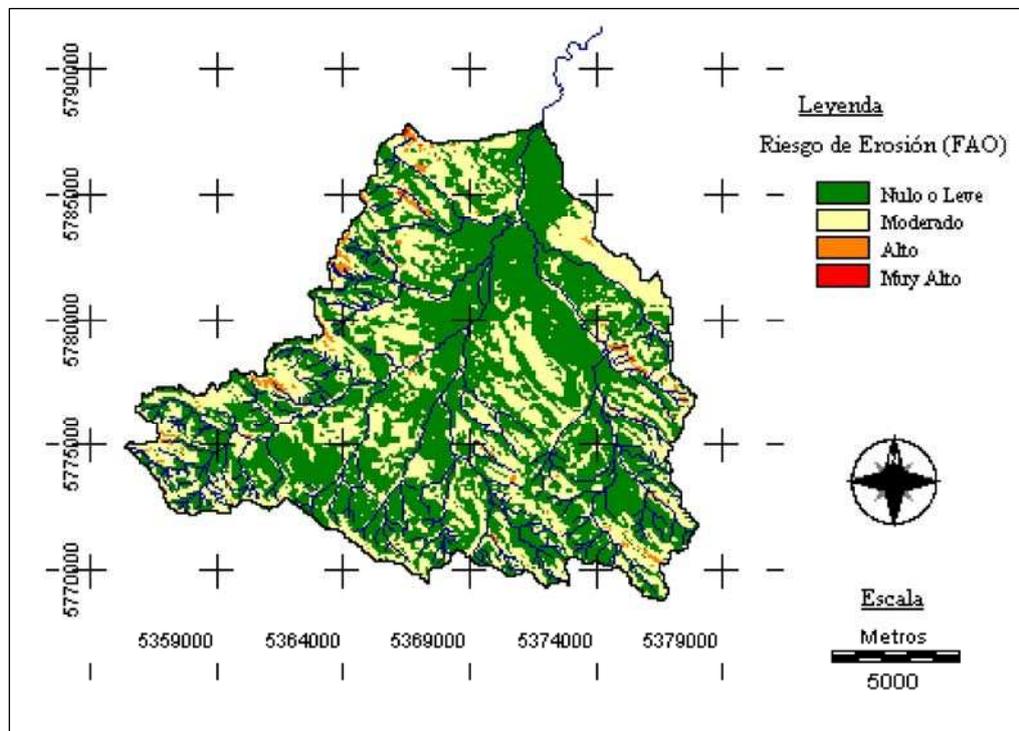


Figura 106. Zonificación del riesgo de erosión según FAO, PNUMA y UNESCO en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

Aplicación de la MUSLE

Para calcular la pérdida de suelo provocado por una tormenta, a nivel de subcuenca se utilizará el modelo MUSLE.

El modelo USLE establece como parámetro de disgregación del suelo por impacto de la lluvia a partir de la erosividad media anual, con el factor R. En cambio en el modelo MUSLE se reemplaza dicho factor R por otro que combina el volumen de escorrentía (Q) y el caudal máximo instantáneo (q) para un aguacero determinado.

A partir de los caudales obtenidos mediante la aplicación de la modelización hidrológica con el HEC-HMS y los factores del paisaje (K, L, S, C, P), se obtiene el valor de pérdida de suelo para una tormenta (Y), expresado en Mg por subcuenca, aplicando la Ecuación 26.

Para ello se debe ponderar cada uno de estos factores de la USLE a nivel de subcuenca, generando un valor de emisión de sedimentos para una tormenta a la salida de la cuenca. Por este motivo el resultado de la MUSLE no se expresa cartográficamente.

Este procesamiento se realiza con una planilla de cálculo, conociendo la superficie de ocupación de cada factor que ocupa en cada subcuenca. La Tabla 35 presenta los resultados de la aplicación de la MUSLE.

Subcuenca	Superficie (has)	Qp (m ³ /s)	q (1000 m ³)	K	LS	C	P	Y (Mg)
1	7276	112,2	2430,9	0,398	1,932	0,117	0,981	55279
2	5666	124	1989,4	0,408	1,812	0,123	0,970	52082
3	6137	36,9	666,2	0,415	2,390	0,078	0,978	12238
4	4584	33,1	414,6	0,396	1,776	0,161	0,982	13016
5	1460	37,8	487,5	0,383	0,950	0,223	0,991	11116

Tabla 35. Valores emisión de sedimentos para una tormenta en la cuenca alta del Arroyo Pillahuinco Grande.

RESTAURACIÓN HIDROLÓGICA

La alteración del régimen hidrológico de cuencas con grandes picos de crecidas debe ser observada para poder establecer las características del fenómeno torrencial. La identificación de áreas prioritarias torrenciales y el establecimiento de actividades de tratamiento de prevención mediante técnicas de corrección de torrentes es una manera de controlar, advertir, aconsejar e informar de la actividad del fenómeno.

Los recursos que dispone el hombre para atenuar la degradación ambiental se encuentran en la ingeniería agro-hidrológica y medioambiental a través de los proyectos de restauración agro-hidrológica de las cuencas. El término agro-hidrológico puede interpretarse como un vocablo aglutinador de todas las acciones a realizar, ya que abordar tanto las actuaciones de carácter forestal como las prácticas agrícolas habituales en las superficies vertientes de la cuenca, así como las medidas adecuadas en los cauces de evacuación de los flujos de avenida y las obras auxiliares (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

La restauración agro-hidrológica trata de englobar en un plan unificado de acción, la problemática común a suelos, agua y vegetación de las cuencas conduciendo a un auténtico proceso de ordenación.

Los objetivos generales de la ordenación agro-hidrológica de una cuenca hidrográfica y de su posterior restauración hidrológico-forestal se centran en el uso racional de los recursos que dispone, fundamentalmente el suelo y el agua. De todos modos, es frecuente desglosarlos en los siguientes (Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez, 1994):

- La retención del suelo mediante el control de la erosión, tratando al mismo tiempo de aprovechar este recurso.
- La regulación de las avenidas y del transporte de materiales provocado por las mismas, así como la sedimentación de estos últimos en las áreas dominadas.
- La provisión hídrica.

Estos objetivos se dividen para su estudio en dos grandes grupos: por un lado, los relacionados con los problemas generados por los eventos torrenciales en la cuenca; por otro, los referentes a la utilización agronómica de la misma y el aprovechamiento racional de los recursos hídricos y las potencialidades vegetativas en las diferentes zonas de la cuenca (Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez, 1994).

Las actuaciones en la cuenca hidrográfica pueden sintetizarse en dos líneas, totalmente compatibles y en cierta medida, complementarias. Estas son, la utilización racional de las áreas de cultivo, que cubren las zonas de menores pendientes y suelos más fértiles, y el establecimiento de una cubierta vegetal protectora adecuada en el resto del territorio. Ésta puede adquirir distintas formas tales como praderas, landas, áreas de matorral o monte bajo y finalmente zonas de bosque, bien sean de repoblación o naturales (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990).

Las medidas a implementar pueden ser de tipo activas, para reducir procesos torrenciales (inundaciones, erosión, sedimentos, etc.), y/o pasivas, para reducir y/o controlar en el área las actividades socio-económicas degradativas. Estas medidas se diseñan y proyectan por medio de técnicas para control de erosión en la cuenca y/o en el cauce.

A continuación se presenta la Tabla 36 que define los diferentes propósitos de un sistema corrector de una cuenca torrencial, según López Cadenas del Llano (1998) y Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez (2008), caracterizando según la localización del sitio de implementación de la obra, las diferentes acciones recomendadas.

Área geográfica afectada	Problemas que se pueden presentar	Acciones destinadas a combatirlos	
		Clasificación	Descripción
Cuenca de recepción	Erosión laminar y en regueros / Erosión en cárcavas / Problemas de infiltración y contenido de humedad del suelo / Avenidas originadas por los aguaceros torrenciales / Erosión en profundidad, movimientos en masa	Biológicas	Reforestación Mejora de las coberturas vegetales
		Prácticas mecánicas	Terrazas Bancales Drenajes
Cauces de drenaje (torrentes y ríos torrenciales)	Perfiles no equilibrados en los torrentes / Lechos no consolidados, por lo tanto inestables / Laderas inestables / Importante transporte de materiales por la corriente (sedimentos y acarreos), que amenazan con aterrar las obras de infraestructura / Márgenes inestables con cauces divagantes e inundaciones por avenidas	Pequeñas obras hidráulicas	Albarradas Palizadas Fajinas
		Obras transversales	Diques de consolidación Diques de retención total o selectivo
		Obras longitudinales	Espigones Muros de defensa de márgenes (malecones, escolleras)
		Obras mixtas	Umbrales de fondo Perfiles escalonados con tramos erosionables
		Biológicas	Cubiertas vegetales a lo largo de los márgenes de los cauces

Tabla 36. Clasificación de obras de corrección de torrentes, propósitos y áreas geográficas afectadas.

Se establece que las medidas de tipo no estructurales se pueden desarrollar en toda la cuenca por medio de acciones biológicas, prácticas mecánicas y pequeñas obras transversales, en cambio cuando la actividad erosiva es principalmente identificada en el cauce, se puede corregir por medio de obras estructurales

Reforestación

La cubierta vegetal, fundamentalmente el bosque de montaña, representa un factor estabilizador de la cuenca ante los mecanismos torrenciales; pues contribuye tanto incrementar la infiltración, ya que la vegetación aumenta la porosidad del suelo; como a disminuir la velocidad de la lámina de escurrido superficial, pues incrementa la rugosidad de la superficie por la que circula y, por último, favorece el flujo subsuperficial del agua en los períodos de precipitaciones abundantes. En síntesis, el tapiz vegetal es un regulador natural de los recursos hídricos. La componente selvícola, base central de la restauración de la cuenca, exige analizar los parámetros climáticos, edáficos y fisiológicos. Por otro lado, se relaciona tanto a nivel de los objetivos como de las meras tecnologías operativas (maquinarias a utilizar en el terreno para la preparación de las repoblaciones), con la morfología y relieve de las diferentes zonas de la cuenca. (Mintegui Aguirre y Robredo Sánchez, 1994).

En la Figura 107 se presenta un ejemplo de restauración de una cuenca hidrográfica con una forestación, donde se presenta el inicio del proyecto de RTM (Restauración terreno montañoso, 1877) y el mismo un siglo después de la reforestación (1995) (fotos de D. Vallauri). Este trabajo fue publicado en Restoration Actions to Combat Desertification in the Northern Mediterranean. Review Meeting on Desertification Research in the European Union, en el año 2004 (Brussels, Bélgica). Disponible en <http://www.ceam.es/reaction/>



Figura 107. Cuenca antes del inicio del proyecto de RTM (Restauración terreno montañoso, 1877) y más de un siglo después de la reforestación (1995)

Mejora de las coberturas vegetales

La vegetación actúa como una capa protectora o amortiguadora entre la atmósfera y el suelo. Los componentes aéreos, como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de modo que su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo, mientras que los componentes subterráneos, como los sistemas radicales, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1997).

La mejora de la cobertura vegetal puede lograrse a través del enriquecimiento de pastizales. Según Díaz (2007) puede definirse como la diseminación de semillas, sin laboreos, de especies nativas o exóticas con el fin de conseguir la germinación e instalación de las mismas para aumentar los recursos forrajeros.

La Figura 108 muestra una mejora en la cobertura a través del enriquecimiento del pastizal natural.



Figura 108: Enriquecimiento de Pastizal natural con gramíneas exóticas.
Fuente: Disponible en <http://es.paperblog.com/experiencia-prv-grupo-varber-781544/>

Terrazas

La terraza puede ser definida como una estructura física compuesta por un camellón y un canal de tierra, construida en sentido perpendicular a la pendiente y de forma sistemática en el terreno, en él, el agua que escurre sobre el suelo es interceptada permitiendo su infiltración, y en caso de precipitaciones intensas, conduciéndola la hacia vaguadas, con una velocidad controlada tal que no ocasione erosión en el canal. En síntesis, las terrazas generan una disminución tanto en velocidad como en volumen de la escorrentía, aumentan el contenido de humedad en el suelo debido a la infiltración de agua en las mismas reduciendo el pico de descarga de los cursos de agua (Figura 109).

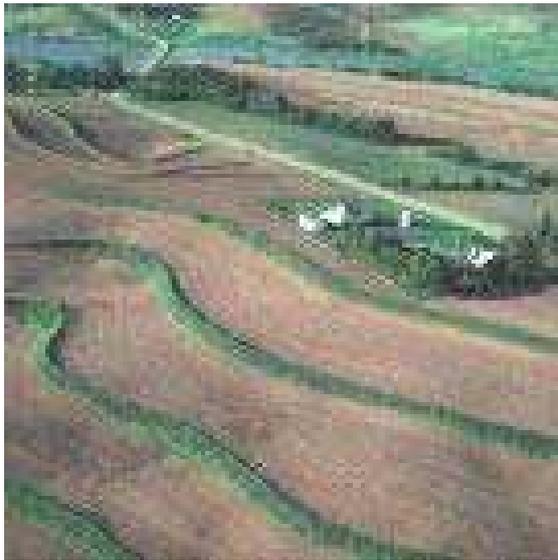


Figura 109. Terrazas. Preparación de suelo para la siembra de especies agrícolas bajo sistemas de terrazas. Fuente: Disponible en: <http://www.agrosustentable.com.ar/>

Bancales

Los bancales o terrazas de banco consisten en plataformas o escalones construidos en serie a través de la pendiente y separados por paredes casi verticales protegidas con vegetación (Suárez de Castro, 1956) (Figura 110)



Figura 110. Bancales. Fuente: Hudson (1982).

Drenajes

Se trata de dispositivos o estructuras, naturales o artificiales, que tienen por objetivo recoger las aguas sobrantes de una determinada zona y encauzarla fuera de la misma, sin que se produzcan problemas erosivos en dicho proceso (Mintegui Aguirre y López Unzú, 1990). La construcción de los sistemas de drenaje puede realizarse de manera manual o mecanizada. En la Figura 111 se observa el zanjeo mecanizado para la evacuación de excedentes hídricos.



Figura 111: Retroexcavadora realizando una zanja de drenaje y zanja de drenaje finalizada. Fuente: Disponible en <http://es.paperblog.com/experiencia-prv-grupo-varber-781544> <http://eias.utralca.cl/Html/zanjas2.html>

Palizadas

Consiste en colocar estacas de aproximadamente 1,00 a 1,20 ml. que servirán de base, en hileras horizontales consecutivas o en forma diagonal, debidamente ancladas en el terreno y espaciadas a 5,00 ml (Figura 112). También es posible colocar estacas pequeñas cada 30 a 50 cm., entrelazándose con ramas vivas de fácil enraizamiento, empalmándose entre si para darle continuidad; teniendo cuidado en que los extremos de las rama cortadas puedan enraizar fácilmente (INDECI, 2011).



Figura 112: Sistema de palizadas en una ladera de alta pendiente. Fuente: Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/ad081s/AD081s03.htm>

Fajinas

En concreto, las fajinadas son manojos de ramas y tallos atados que se colocan en el fondo de zanjas poco profundas, excavadas transversalmente siguiendo el contorno del talud o de la ladera, que se recubre parcialmente de tierra después.

Para fijarlas se utilizan estacas vivas o muertas (madera o acero) de 60 centímetros de longitud como mínimo (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España., 2008) (Figura 113).

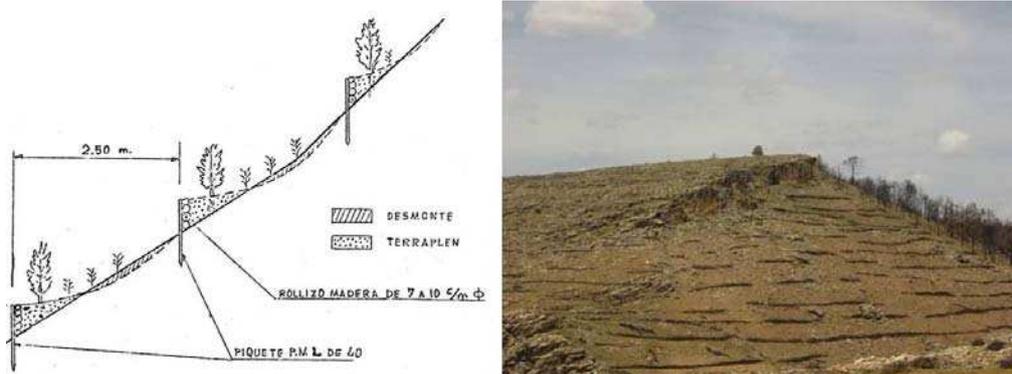


Figura 113: Fajinadas para la protección de laderas frente a la erosión
Fuente: Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/lucha-contra-la-desertificacion/0904712280144d76_tcm7-19569.pdf

Diques de consolidación

Evitan los fenómenos directos de erosión en los cauces y en las laderas marginales afectadas de inestabilidad por la acción erosiva. El objetivo de estas obras es la fijación del perfil longitudinal del lecho, evitando su descenso erosivo. Esta fijación se consigue con la construcción de varios diques consecutivos que dotan al cauce de una pendiente no erosionable, estabilizando todos los tramos del cauce que presentan mayor erosión lineal. La cuña de sedimentación que se origina influye también directamente en la estabilización de las laderas marginales (Romero Díaz, 2007) (Figura 114).



Figura 114: Diques de consolidación consecutivos y cuña de sedimentación estabilizada. Fuente: Disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5388s/x5388s00.htm>.
<http://geotecnia-sor.blogspot.com.ar/2010/11/gsi-1-quebrada-el-perro-5-dinamica.html>

Diques de retención total o selectivo

Diques de retención: Destinados a detener la mayor cantidad posible de materiales, sólidos o líquidos. Se emplazan aguas arriba de la zona en que se producen los daños por acarreo o caudales líquidos, aprovechando la existencia de buenas cerradas y de ensanchamientos que definan importantes volúmenes de embalse. En el caso de retención de materiales sólidos, los de retención total suelen colocarse como cierre de garganta de torrentes y los de retención selectiva se suelen emplear en torrentes de tipo alpino que presentan una mayor granulometría en los materiales que transportan como los que se muestran en la Figura 115. En cuanto a los diques de retención de caudales líquidos destacan los de recarga de acuíferos cuya función es la de embalsar agua, de tal forma que esta pueda infiltrarse y pasar a aumentar el volumen del material del acuífero subyacente (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España., 2008).

Diques de laminación: su función principal es la de disminuir la punta de los caudales líquidos de avenida mediante el embalse temporal del caudal de avenida cuando el caudal que llega al dique sea superior al que sea capaz de evacuar por las troneras. Se sitúan en ensanchamientos del cauce que permitan elevados volúmenes de embalse (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, 2008).



Figura 115: Diques de retención de materiales gruesos. Fuente: Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/restauracion-hidrologico-forestal/correccion_cauces.aspx

Espigones

Los espigones son estructuras apoyadas o empotradas en la orilla que están dentro de la corriente. Desvían las líneas de corriente alejándolas de la orilla. A demás, favorecen que entre ellas se depositen los materiales que arrastra el río (López Cadenas de Llano, 1988). En la Figura 116 se observa una secuencia de espigones para la protección contra la erosión del margen del río.



Figura 116: Espigones. Disponibles en http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/restauracion-hidrologico-forestal/correccion_cauces.aspx

Muros de defensa de márgenes (malecones, escolleras)

Son estructuras apoyadas directamente en el margen de un río a fin de evitar que la corriente de agua esté en contacto con el material para evitar totalmente o reducir la erosión lateral que se presenta en las márgenes de los ríos. Un muro de defensa construido con gaviones se muestra en la Figura 117.



Figura 117. Muro de defensa con estructura gavionada.
Fuente Disponible en <http://www.solucionesespeciales.com/2011/05/la-versatilidad-de-los-gaviones-en-el.html>

Umbrales de fondo

Son obras transversales, auxiliares de obras longitudinales, en cauces de pendientes no exageradas para controlar la erosión del lecho, se localizan en los tramos erosionables en que no es posible el uso de diques de corrección (López Cadenas de Llano, 1988). En la Figura 118 se observa la combinación de defensa de márgenes y umbrales de fondo.



Figura 118: *Combinación de defensa de márgenes y umbrales de fondo.*
Fuente: Disponible en <http://geotecnia-sor.blogspot.com.ar/2010/11/gsi-1-quebrada-el-perro-5-dinamica.html>

Cubiertas vegetales a lo largo de los márgenes de los cauces

La vegetación puede utilizarse como instrumento para la protección de las márgenes en los cursos de agua, con la ventaja, frente a las otras estructuras citadas anteriormente, de tratarse de un medio natural, que se adapta al ecosistema y contribuye a crear el paisaje (Mintegui Aguirre y López Unzú. 1990).

Para la instalación de la vegetación pueden definirse cuatro zonas, cada una de ellas con características y acciones protectoras particulares, estas son: de plantas acuáticas, de cañaveral, de vegetación ripícola y de monte bajo. Dado el curso sinuoso de las aguas, las características del perfil transversal varían por lo que pueden no existir algunas zonas (López Cadenas de Llano, 1988). La Figura 119 muestra la protección de márgenes principalmente con estratos arbóreos.



Figura 119: *Protección de márgenes con vegetación arbórea.*
Fuente: Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2010/08/20/136813>

EL FENÓMENO TORRENCIAL

El fenómeno torrencial representa la dinámica de un sistema hidrográfico en cuencas de montaña, que expresa el movimiento generado por los torrentes. De esta manera, es posible definir al Torrente como una corriente natural de agua temporal que en general, se presenta en cuencas reducidas, altamente erosionables, de pendientes fuertes e irregulares, en las que al ocurrir una tormenta, se originan súbitas y repentinas crecidas de corta duración capaces de arrastrar grandes cantidades de material, que son depositados tanto en el lecho del río como en las zonas ribereñas de inundación. Estos materiales conforman el caudal sólido, representado por dos fracciones, la primera corresponde a las suspensiones y está constituida principalmente por materiales provenientes de erosión hídrica superficial (laminar y en regueros); la segunda es formada por los acarreos y su constitución se debe a la incorporación de los materiales del lecho y márgenes del cauce a la corriente.

La identificación de las partes constituyentes de una cuenca torrencial permite definir las medidas de protección (cuenca de recepción) o corrección (garganta), para regular el caudal pico del torrente y consolidar el lecho del cauce, considerando además que la cuenca de recepción genera la alimentación del torrente, la garganta establece la concentración de caudales y el cono de deyección y canal de desagüe son los que evacuan el flujo.

Vistos los orígenes del caudal sólido en una corriente torrencial se deduce que el control de dicha actividad debe estar centrado en forma conjunta, tanto en el origen del material en suspensión, a través de técnicas de control de la erosión hídrica superficial, como en el origen de los acarreos, generalmente, a través de obras de infraestructura hidráulica como son los diques de contención.

Pendiente de compensación

García Nájera (1962) considera a la pendiente de compensación como un concepto de capital importancia en la corrección de torrentes, y la define como aquella pendiente en la cual una corriente saturada, pasa sobre un lecho formado por acarreos de igual naturaleza y composición granulométrica que los que constituyen el caudal sólido de la corriente.

Se trata de un estado de equilibrio dinámico, donde el volumen de material que deja una sección del cauce aguas abajo, es similar al que llega desde aguas arriba (Della Lucia et al., 1980).

La instalación de diques transversales, para la corrección de torrentes, provoca que los materiales acarreados por las aguas sean retenidos, formándose depósitos o aterramientos que elevan el perfil natural del cauce aguas arriba de las estructuras, lográndose una nueva pendiente (pendiente de compensación), menor que la pendiente original del cauce y ligada a la geometría del lecho torrencial, a la granulometría de los materiales y a las características hidráulicas de la corriente (Iroume y Gayoso, 1991).

Según López Cadenas del Llano (1988) las obras a modo de presa tienen los siguientes efectos:

- √ Establecen un punto fijo en el lecho del cauce, controlando su descenso progresivo.

√ Mientras el vaso de embalse que originan se encuentra sin aterrizar, el efecto de presa hacen que las aguas embalsadas frenen la velocidad de llegada de los sedimentos, se depositen los más gruesos y disminuya en su caudal de vertido la proporción sólida.

√ Los depósitos que se producen van formando un aterramiento que eleva el cauce hasta alcanzar la pendiente de compensación, menor que la del cauce principal.

√ La elevación del cauce, en el entorno que comprende el aterramiento, da lugar a que el nuevo lecho, elevado y asentado sobre los acarrees retenidos, tenga secciones de mayor anchura, que posibilitan la circulación de caudales por perfiles de amplia base, con disminución del radio hidráulico igual, sensiblemente, a la del calado del agua.

Determinación de la pendiente de compensación

Si suponemos que una corriente saturada tiene una velocidad tal que cuando pasa sobre un lecho formado por acarrees de igual naturaleza y composición granulométrica que los que constituyen el caudal sólido de la corriente, y algunos de estos materiales se depositan y otros se incorporan a la misma, quedando la proporción de acarrees prácticamente constante, entonces se dice que este lecho adoptó la pendiente de compensación.

El método para su cálculo, implica una secuencia de iteraciones sucesivas que permite determinar la velocidad que tendrán las aguas desprovistas de acarrees (**u**), es decir, la velocidad de la suspensión en cuyo seno se mueven todos los materiales considerados como acarrees, suponiendo que éstos no existan. Conocida esta velocidad se puede deducir la pendiente que le corresponde, es decir, la pendiente de compensación (**j**) (Ecuación 35).

Para su determinación, se aplica un procedimiento basado en la ley de transporte máximo propuesto por García Nájera (1962), y detallado en “La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación” de Mintegui Aguirre y López Unzú (1990).

Para los ajustes finales de las ecuaciones, se recomienda que las iteraciones se realicen con la ayuda de una planilla de cálculo.

1) La metodología se inicia con la determinación del caudal característico (**q**) (Ecuación 27).

$$q = g \cdot Q \cdot (2 \cdot b)^{-1}$$

Ecuación 27.

Donde: **q** es caudal característico ($m^3 \cdot s^{-3}$), **g** representa la aceleración de la gravedad (m/s^2); **Q**, el caudal (m^3/s) y **b** el ancho medio del cauce (m).

En la Figura 120 se presenta un corte topográfico donde se expresa las curvas de nivel de un área montañosa y el diagrama de la triangulación del aterramiento de un posible dique. La línea que corta en dos al triángulo expresa el sitio donde se establecería el ancho medio del aterramiento que representa el potencial ancho medio del cauce (**b**).

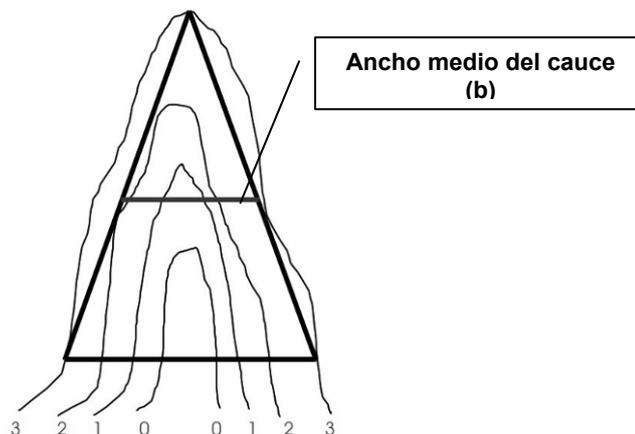


Figura 120. Diagrama de triangulación del aterramiento de un posible dique.

2) El siguiente paso consiste en asignar un valor inicial de coeficiente de rugosidad de Bazin (C), para comenzar el cálculo con iteraciones sucesiva, debido a que la velocidad límite del movimiento de una corriente con arrastres (u) es una incógnita. El coeficiente de rugosidad de Bazin se determina a través de la Ecuación 28.

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\beta}{\sqrt{h}}}$$

Ecuación 28.

Donde C es el coeficiente de rugosidad de Bazin, β representa la rugosidad del lecho que toma el valor de 2 cuando el lecho posee gran rugosidad, y h representa la profundidad (m) y sustituye al radio hidráulico en cauces anchos.

3) El valor de h depende también de la velocidad del movimiento de una corriente con arrastres (u), por lo tanto, formará parte de la iteración del cálculo utilizando la Ecuación 29.

$$h = \frac{Q}{(b \cdot u)}$$

Ecuación 29.

4) El Peso específico del agua con arrastres se determina a partir de la Ecuación 30.

$$\omega = \omega_0 + \chi \cdot (\delta - \omega_0)$$

Ecuación 30.

Donde ω representa el peso específico del agua con arrastres ($Mg.m^{-3}$), ω_0 el peso específico del agua ($tn.m^{-3}$); χ la proporción de arrastres, y δ el peso específico de los materiales de arrastre ($tn.m^{-3}$).

- 5) Coeficiente de Bazin para una suspensión (C_s), se establece con la Ecuación 31.

$$C_s = C \cdot \sqrt{\frac{\omega_0^3}{(1 + \chi) \cdot (\omega_0 + \chi \cdot \delta)^3}}$$

Ecuación 31.

El valor de χ puede tomarse como 0,10, ya que no es corriente en una suspensión verdadera una mayor proporción de elementos sólidos, y por otra parte, en un régimen muy turbulento de las crecidas de los torrentes hay muchos materiales que, sin estar en verdadera suspensión, marchan como si lo estuvieran.

- 6) Luego, se determina la fuerza límite de arrastre (Ecuación 32)

$$Y = \frac{\sqrt{0,385 \cdot \delta \cdot (\delta - \omega) \cdot \lambda \cdot V}}{\omega \left[1 + \sqrt[4]{10,5 \cdot \left(\frac{V}{V_m} - 1 \right)} \right]}$$

Ecuación 32.

Donde g es la fuerza límite de arrastre (m), λ representa el coeficiente de forma de los acarreos; V , el volumen máximo de material de arrastre en m^3 , y V_m , el volumen medio del material de arrastre en m^3 .

- 7) Con la determinación de los valores de C_s e Y , es posible obtener un primer valor de ζ ($m^2 \cdot s^{-2}$) a través de la Ecuación 33:

$$\zeta = C_s^2 \cdot Y$$

Ecuación 33.

- 8) A continuación, se recurrirá a las iteraciones sucesivas con el objetivo de encontrar el valor de la velocidad que tendrán las aguas desprovistas de acarreos (u) ($m \cdot s^{-1}$) que tienda a anularla la Ecuación 34:

$$u^7 + q \cdot u^4 - 3 \cdot \zeta^2 \cdot q = 0$$

Ecuación 34.

- 9) Obtenido el valor de u , se puede redefinir h . Luego, el valor de h es reemplazado en la ecuación del Coeficiente de Bazin (C) y se obtiene el valor final de C . A partir de estos datos se puede calcular nuevamente C_s y ζ con las. Nótese que los valores de q y de Y no varían.

10) Realizadas las iteraciones y obtenidos los coeficientes, es posible el cálculo de la pendiente de compensación (j), que puede ser expresada en forma porcentual y/o decimal, a través de la Ecuación 35:

$$j = \frac{g \cdot u^3}{2 \cdot C_s^2 \cdot q}$$

Ecuación 35.

11) Finalmente, la longitud que alcanzaría la pendiente de compensación se determina con la Ecuación 36:

$$L = \frac{H}{Q - j}$$

Ecuación 36.

Donde L , representa la longitud del aterramiento; H , la altura del aterramiento; J , la pendiente natural del terreno, y j la pendiente de compensación.

Ejemplo de aplicación.

Dadas las características del cauce y los materiales que circulan, determinar la pendiente de compensación por medio de la metodología de García Nájera (1962).

Los datos se presentan en la Tabla 37

Denominación	Valor
Aceleración de la gravedad (g)	9,8 m.s ⁻²
Caudal (Q)	10 m ³ .s ⁻¹
Ancho medio del cauce (b)	3 m
Rugosidad del lecho (β)	1,85
Peso específico del agua (ω_0)	1 tn.m ⁻³
Peso específico de los materiales de arrastre (δ)	2,2 tn.m ⁻³
Proporción de arrastres (χ)	0,05
Coficiente de forma de los acarreo (λ)	2,1
Volumen máximo del material de arrastre (V)	0,2 m ³
Volumen medio del material de arrastre (V_m)	0,00001 m ³

Tabla 37. Datos de base para el cálculo de la pendiente de compensación.

Los resultados obtenidos para cada una de las variables que componen la metodología de García Nájera se exponen en la Tabla 38.

Denominación	Valor
Caudal característico (p)	16,33 m ³ .s ⁻³
Coefficiente de Bazin (C)	29,46
Profundidad (h)	0,897 m
Coefficiente de Bazin para una suspensión (Cs)	24,58
Fuerza límite de arrastre (g)	0,027 m
ζ	16,21 m ² .s ⁻²
Velocidad de las aguas desprovistas de acarreo (u)	3,71 m.s ⁻¹
Pendiente de compensación (j)	2,54 %
Longitud de la pendiente de compensación (L)	162,87 m

Tabla 38. Resultados para la pendiente de compensación.

DISEÑO DE PEQUEÑOS DIQUES PARA EL CONTROL DE TORRENTES

La corrección de cauces torrenciales tiene, como objetivo principal, la regulación y control total o parcial de los efectos motivados por la dinámica del agua, tanto en la cuenca como en los propios álveos (o cauces) y terrenos marginales de las corrientes que drenan por la misma. De esta manera, la adopción de medidas correctoras en los cauces, persigue, por una parte, evitar la formación del caudal sólido y, por otra, si éste ya se ha producido, controlarlo, reduciendo al mínimo la tasa de depósito y sedimentación de los materiales que lo componen (Pizarro Tapia et al., 2004).

Un dique es una obra que se construye en sentido perpendicular al eje del cauce de la quebrada, cuya función es regular la pendiente de cauce disminuyendo la velocidad de los flujos de lodo y piedra, reteniendo el material sólido transportado.

La efectividad de estas obras varía sustancialmente, ya que están condicionadas a múltiples factores: dimensionamiento hidráulico de la estructura en función del área vertiente, condiciones de ubicación, conocimiento de las características ambientales de la cuenca y de las variables geomorfológicas del curso (pendiente de equilibrio del cauce, granulometría del lecho), índice de estabilidad de la corriente, diseño del dique en relación con el tipo de utilidad deseada, normativa de cálculo según el dimensionado estático de la obra, entre otros (Conesa., 2004).

Consideraciones iniciales para el diseño de diques

Al momento de diseñar una obra transversal, se pueden utilizar diversos tipos de estructuras y materiales, sin que pueda establecerse ninguna regla fija, pues el buen juicio del ingeniero determinará en cada caso el tipo y los materiales más convenientes y económicos para su construcción.

Debe considerarse, sin embargo, que se trata normalmente de obras de pequeña envergadura (< 15 m de altura), que se construyen en zonas abruptas y mal comunicadas, de forma que no puede disponerse, en general, de grandes medios para su ejecución (López Cadenas de Llano, 1988).

El primer paso en la construcción de una obra es definir su objetivo, que puede ser:

1. Resistir el desgaste del fondo de las cárcavas o quebradas por efecto del arrastre ejercido por el agua.
2. Estabilizar las pendientes del lecho en las cárcavas o quebradas.
3. Preparar las condiciones para la plantación y la siembra en cárcavas o quebradas.
4. Otros.

Para iniciar las actividades de diseño se necesita evaluar el lugar de emplazamiento por medio de la definición de las pendientes del terreno, de valles y cauce, lo cual puede realizarse topográficamente. Esto se logra a partir de la construcción de perfiles transversales y longitudinales a campo, en el sitio de ubicación tentativa de la obra.

Además se debe contar con datos del caudal líquido, que se pueden obtener mediante modelización hidrológica (Hymo, HEC-HMS, entre otros) y/o por toma de datos con limnógrafo y estaciones de aforo.

En relación al caudal sólido emitido se necesitan datos de volumetría de sedimentos transportados, rugosidad del cauce y de la planicie de inundación y proporción de acarreo de sedimentos, entre otros.

También se debe conocer el material que se utilizará para la construcción de la obra según su objetivo (Tabla 39)

Los materiales más utilizados para la construcción de diques son:

1. Hormigón sin piedras o muy chicas
2. Piedra y hormigón
3. Mampostería (con mortero de cemento) construido con piedras brutas o poco labradas unidas con cemento.
4. Gaviones formados por piedras dentro de jaulas de alambre en forma de paralelepípedo rectangular, alambre galvanizado o acerado.
5. Mampostería en seco que son sólo con piedras ordenadas, sin cemento, piedras grandes y paredes de asiento plano.

Funcionalidad	Morfología	Tipo de dique	Materiales de construcción	
De consolidación	Cerrados	Rectos	De gravedad En vigas o tirantes En ménsula, autoestables sobre pilotes	h., m., d.m. h., h.ar., a. h.ar., a.
		En arco		h., h.ar., m.
	Abiertos o con troneras	Verticales	Con rendija filtrante Con peine	h.ar., m. h.ar., m.
		Horizontales	Dispositivo Rosic Dispositivo Clauzel modificado (Puglisi)	h. d.m.
De retención	Permanentes (de capacidad ilimitada)	Rectos, en arco y verticales	h., a., h.ar., d.m.	
	Temporales (de liberación)	Sin rendijas	De retención mecánica Con dissipador de energía	h., h.ar. h., h.ar.
		Con rendijas	Con rendijas fijas con rendijas móviles	h., h.ar., d.m. d.m.
		Otros		d.m.
	Continua (de capacidad ilimitada)	Dispositivo Clauzel	d.m.	

Tabla 39. Clasificación de diques de corrección de torrentes (López Cadenas de Llano, 1988).

Donde: **a.** = acero; **h.** = hormigón; **h.ar.** = hormigón armado; **m.** = madera; **d.m.** = diferentes materiales combinados.

Con estos datos básicos se recomienda la aplicación de la metodología de cálculo propuesta por García Nájera (1962) para definir la pendiente de compensación, las dimensiones estructurales del dique y comprobar las fuerzas de estabilización - resistencia a las sollicitaciones de la obra.

Partes constitutivas de un dique

La vista transversal de un dique expresa diferentes partes según su distribución en el cauce. La obra se forma de dos partes principales: el cuerpo y las dos alas laterales. Dentro del cuerpo de obra se establece el vertedero o cubeta y los mechinales (Figura 121).

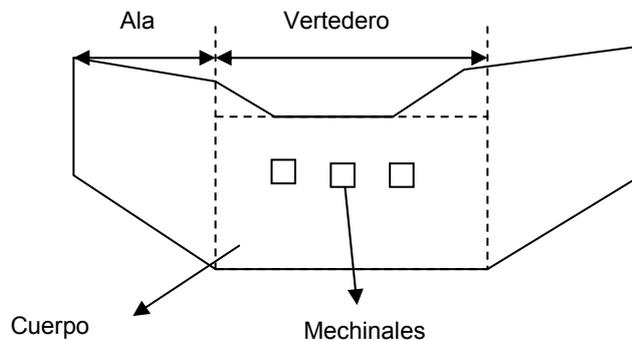


Figura 121: Partes principales de la obra en vista transversal.

El vertedero está ubicado en la parte superior del cuerpo de obra y centrado, principalmente, sobre el área de mayor profundidad de obra, debido a que su función es permitir la circulación del agua de mayor velocidad y conducir el agua una vez estabilizado el torrente. Éste presenta, comúnmente, forma rectangular o trapezoidal, siendo este último el más usado, y debe poseer un ancho y profundidad dependiente de la forma del terreno, para reducir la erosión aguas abajo.

Aparte del vertedero, los elementos más comunes y sencillos de evacuación del agua en los diques de corrección de torrentes son los mechinales. Los mismos son orificios o conductos sobre el cuerpo o paramento, que atraviesan la masa del dique a diferentes alturas, con cierta pendiente aguas abajo, por donde pasa el agua y el sedimento más fino. Cumplen diferentes funciones a lo largo de la vida útil del dique, según progresa la colmatación por sedimentos. Mientras el mechinal no es alcanzado por el aterramiento, contribuye a la capacidad de desagüe, con lo cual ayuda a evitar el desbordamiento. Luego del aterramiento, el mechinal drena la cuña de sedimentos aguas arriba, para disminuir el volumen de agua en la cuña, aumentando la coherencia de la misma. Al finalizar este período la función de los mechinales es casi nula. Su tamaño depende del tamaño del sedimento a retener y se ubican debajo del vertedero, no sobre el ala. Generalmente presentan forma circular (10-20 cm Ø) o cuadrada (20-40 cm).

Las alas deben poseer una pendiente sobre el terreno entre 5-20 % para seguridad cuando el nivel de agua supera el vertedero.

En la Figura 122 se presentan las vistas para el dimensionamiento transversal y lateral más detallado de las partes principales de la obra, donde se definen los componentes estructurales para su cálculo.

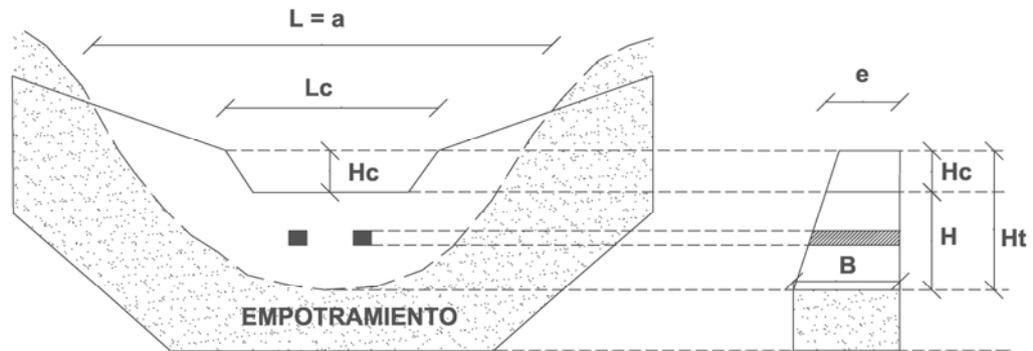


Figura 122: Corte transversal y lateral para el dimensionamiento de las partes principales de la obra.

Siendo:

$L = a$ Ancho del corte transversal.

L_c : Longitud de la cubeta o Ancho vertedero ($D \leq d$).

H_t : Altura total del dique.

H : Altura útil del dique.

H_c : Profundidad del vertedero o altura de la cubeta.

e : Espesor del dique = Coronación.

B : Base del dique.

Etapas de funcionamiento del dique de corrección de torrentes.

Las obras de corrección torrencial cumplen diferentes funciones durante su vida útil, las cuales se pueden definir en forma temporal desde su instalación hasta la colmatación, de la siguiente manera:

1. Al terminar la construcción y antes de la colmatación, el dique ejerce un control prácticamente total del transporte de sólidos y una mitigación apreciable de los picos de las crecientes, debido a su capacidad de almacenamiento.
2. Una vez colmatado, ejerce un efecto regulador del transporte sólido y la atenuación de los picos de las crecientes, aunque en menor grado que antes de la colmatación.
3. En esta etapa, se produce la consolidación del fondo del cauce fijando el perfil longitudinal del mismo, evitando en muchos casos su degradación y la erosión regresiva.
4. Alcanzada la colmatación, se alcanza la pendiente de compensación. Como producto de la formación de la cuña de aterramiento y el centrado del flujo, disminuye la erosión lateral en las márgenes y propicia el crecimiento de vegetación sobre los sedimentos acumulados. Ambos efectos se traducen en una reducción de los aportes sólidos a la corriente.

5. La colmatación contribuye a evitar deslizamientos en laderas inestables, al inducir la sedimentación y como consecuencia la formación de una masa estabilizante (cuña de aterramiento) en la base, reduciendo así los aportes sólidos al torrente.

6. Además, cumple la función de detener las avalanchas de lodo o lavas torrenciales, bien sea mediante el impacto directo de las mismas contra las presas, antes de su colmatación, o por el efecto de frenado que produce el aumento del ancho del cauce y la disminución de la pendiente, una vez colmatadas.

Metodología de cálculo para el dimensionamiento de un dique de características torrenciales.

García Nájera (1962) propuso una metodología de cálculo para el dimensionamiento de un dique de características torrenciales, según los Principios de Hidráulica Torrencial, la cual se sustenta en los datos de campo determinados con el corte transversal y longitudinal del curso de agua, la pendiente longitudinal del cauce y la pendiente de compensación, anteriormente calculada.

El modelo de cálculo para el dimensionamiento de un dique de control de torrentes de hormigón, se basa en determinar las diferentes características estructurales del mismo y los empujes que se generan sobre el cuerpo, por medio de la aplicación de la conservación de la energía a una corriente con arrastres (García Nájera, 1962).

El procedimiento se resume en las siguientes etapas de cálculo:

1. Dimensionamiento de la cubeta.
2. Determinación del espesor de coronación (e).
3. Cálculo del ancho de la base (B).
4. Condiciones de estabilidad del dique.
5. Comprobaciones de estabilidad
6. Determinación de la defensa al pie.
7. Definición de mechinales.

A continuación se presenta el desarrollo del cálculo de las diferentes etapas.

Dimensionamiento de la cubeta

Las dimensiones de la cubeta permiten establecer el futuro direccionamiento del dique. Se inicia el cálculo con la determinación de su longitud (**Lc**) (m) determinada a partir de la longitud o ancho del perfil (L) (Ecuación 37)

$$Lc \cong \frac{1}{3} \cdot L$$

Ecuación 37.

La altura de la cubeta o vertedero (**Hc**) (m) se puede establecer con la Fórmula de Kozeny (Ecuación 38), la cual se recomienda igual o mayor (5 % como revancha de seguridad) a la altura de la lámina vertiente.

$$H_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g \cdot Lc^2}} \quad \text{Ecuación 38.}$$

Donde: Q es el caudal total de desagüe ($m^3 \cdot s^{-1}$) y g , la aceleración de la gravedad ($9,8 m \cdot s^{-2}$).

A partir de la altura total del dique (H_t), que se establece topográficamente, y la altura de la cubeta (H_c) se puede determinar la altura útil del dique (H) necesaria en el cálculo del largo de la pendiente de compensación (Ecuación 39).

$$H = H_t - H_c \quad \text{Ecuación 39.}$$

De esta manera se obtienen las características de la cubeta y se define su forma (trapezoidal – rectangular), considerando que su ubicación debe estar centrada con la mayor profundidad del perfil. Se puede considerar que ambos laterales presenten una inclinación con el fin de encauzar el caudal de avenida.

Espesor de coronación (e)

Su determinación se realiza a partir de un análisis empírico (Ecuación 40)(m).

$$e = c \cdot \left(\frac{\omega \cdot hc}{f \cdot \delta h^a} \right) \quad \text{Ecuación 40.}$$

Donde: ω es el peso específico del agua con arrastres ($tn \cdot m^{-3}$); f el coeficiente de rozamiento, y δh^a , la densidad del hormigón ($tn \cdot m^{-3}$).

Ancho de la base (B)

Para el cálculo del ancho de la base, se utiliza la Ecuación 41 expresada en metros.

$$B = \sqrt{\left(\left(\frac{5}{4} \cdot e^2 \right) + \left(\frac{\omega}{\delta h^a} \cdot H^2 \right) \right)} - \frac{e}{2} \quad \text{Ecuación 41.}$$

Donde: e es la coronación, ω es el peso específico del agua con arrastre; δh^a , la densidad del hormigón y H es la altura útil de la obra.

Condiciones de estabilidad del dique

La estabilidad del dique está dada por la resultante R de las fuerzas de peso propio de la obra (G) y el empuje del agua y/o sedimentos (E) acumulados aguas arriba de la obra.

Los esfuerzos de empuje hidrostático que condicionan la estabilidad de una obra se presentan sobre el cuerpo, siendo estos el corte por desplazamiento sobre su base y el esfuerzo de vuelco. Estos esfuerzos son generados primero por el agua y posteriormente por los sedimentos acumulados desde la base hasta la coronación, sucesivamente en el tiempo, se vaya formando la pendiente de compensación.

El empuje del agua, cuando todavía no está colmatado el dique, es muy importante, ya que el dique deberá soportar diferentes esfuerzos según el tipo de caudal líquido emitido por cada tormenta producida.

A continuación se presenta la forma de cálculo de cada una de las fuerzas intervinientes en la estabilidad del dique.

a- Fuerza desfavorable:

El empuje hidrostático es una fuerza desfavorable. Se puede considerar en forma puntual (**E_p**) (Mg.m⁻¹) o sobre toda la estructura en forma homogénea (**E**).

Se calcula a partir de datos del Pe del agua con arrastres (**w**) (tn/m³) y de la altura útil del dique (**H**) (m) (Ecuación 42).

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H^2 \quad \text{Ecuación 42.}$$

El empuje de toda la estructura (**E**) (Mg.m⁻¹) se determina incorporándole valor del ancho del corte transversal (**a**) (m) (Ecuación 43).

$$E = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot H^2 \cdot a \quad \text{Ecuación 43.}$$

b- Fuerza favorable:

Esta fuerza vertical se debe al peso propio de la obra (**G**).

El dique presenta en corte una geometría trapezoidal. Debido a ello, el peso puede ser calculado a partir de las dos partes que lo conforman, una debida al peso de los materiales generados por el rectángulo (Ecuación 44), y la otra formada por el peso del triángulo restante (Ecuación 45). De esta manera, el peso total del dique se calculará como la suma de ambos pesos parciales (Ecuación 46). Esta geometría se puede visualizar en la Figura 123.

Los datos necesarios para su cálculo son: la densidad del material de la obra (**δh°**), que en este caso es hormigón armado, el espesor de la coronación (**e**), el ancho de la base (**B**) y la altura útil del dique (**H**).

$$G1 = \delta h^\circ \cdot e \cdot H \quad \text{Ecuación 44.}$$

$$G2 = \frac{1}{2} \cdot (B - e) \cdot \delta h^\circ \cdot H \quad \text{Ecuación 45.}$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{G1} + \mathbf{G2}$$

Ecuación 46

Además, en el análisis integrado de las fuerza (**E** y **G**), para que el dique sea estable es condición que la fuerza resultante (**R**) debe pasar por el tercio central de la base del dique, generando una tensión de valor cero. En este caso **R** se transmite al suelo (Figura 123).

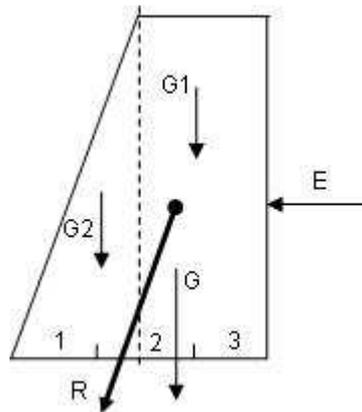


Figura 123: Fuerza ejercidas sobre un dique de gravedad con pared recta aguas arriba y talud aguas abajo.

La condición ideal de estabilidad se representa en el caso en que el **E** (fuerza de empuje) de los sedimentos acumulados aguas arriba del dique, dada en forma lateral a la obra y la presión ejercida por el agua, es menor que el momento de estabilidad dado por el peso **G**, en este caso la obra no se vuelca ni se desplaza ($\mathbf{E} \leq \mathbf{G}$).

Comprobaciones de estabilidad

Para determinar la estabilidad de un dique se deben cumplir tres condiciones, las cuales se describen a continuación:

1. Estabilidad al vuelco.

La estabilidad al vuelco se determina como el cociente entre momento estabilizante (**Me**) (Mg.m.m^{-1}) (Ecuación 47) con el momento de vuelco (**Mv**) (Mg.m.m^{-1}) (Ecuación 48), considerando que si esta relación es $(\mathbf{Me} / \mathbf{Mv}) \geq 1,5$ la obra cumple condición de **estabilidad al vuelco**.

$$\mathbf{Me} = \mathbf{G} \cdot (\mathbf{X}) \qquad \mathbf{X} = \left(\frac{11}{9} \right) \cdot \mathbf{e} \qquad \mathbf{Ecuación\ 47.}$$

$$Mv = Ep \cdot \frac{1}{3} \cdot H \quad \text{Ecuación 48.}$$

2. Estabilidad al deslizamiento.

La estabilidad al deslizamiento se determina a partir del peso del dique (**G**) y el coeficiente rozamiento de obra (**f**) que puede tomar diversos valores según el estrato donde está implantada la obra, como por ejemplo: 0,55 (arena) y 0,70 (hormigón sobre roca) (Ecuación 49).

$$Fr = G \cdot f \quad \text{Ecuación 49.}$$

Donde: **Fr** es la fuerza de roce ($Mg \cdot m^{-1}$).

La condición de **estabilidad al deslizamiento** se cumple con las ecuaciones 50 y 51:

$$Fr / Ep \geq 1,1 \quad \text{Ecuación 50}$$

$$Ep / G < 0,7 \quad \text{Ecuación 51}$$

Donde: **Fr** es la fuerza de roce, **Ep** es el empuje puntual y **G** el peso del dique.

3. Condición de las tensiones.

Para la determinación de las tensiones máxima y media admisibles de la obra, se debe determinar el momento resultante (Ecuación 52) y la excentricidad (Ecuación 53) que depende de los momentos de estabilidad y vuelco, del tamaño de la base y el peso de la propia obra.

$$MR = Me - Mv \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde: **MR** es el momento resultante ($Mg \cdot m^{-1}$), momento estabilizante (**Me**) y el momento de vuelco (**Mv**).

$$e^* = \left(\frac{MR}{G} \right) - \left(\frac{B}{2} \right) = m - \left(\frac{B}{2} \right) \quad \text{Ecuación 53}$$

Siendo: **e*** (excentricidad de la obra), **MR** es el momento resultante, **G** el peso del dique y **B** la base de la obra.

Para cumplir con la condición de excentricidad, $e^* \leq B / 6$

La determinación de **tensión extrema máxima**, aguas abajo (σ_1) se realiza aplicando con la Ecuación 54 y **tensión extrema mínima**, aguas arriba (σ_2) con la Ecuación 55.

$$\sigma_1 = \frac{G}{B} \cdot \left[1 + \left(6 \cdot \frac{e^*}{B} \right) \right] \quad \text{Ecuación 54}$$

$$\sigma_2 = \frac{G}{B} \cdot \left[1 - \left(6 \cdot \frac{e^*}{B} \right) \right] \quad \text{Ecuación 55}$$

La cuantificación de la **tensión media** de la obra (σ_m) se establece según los resultados alcanzados en la ecuación 55.

Por ello, cuando la σ_2 es mayor que cero la σ_m se calcula con la Ecuación 56, y en el caso que σ_2 es menos o igual a cero la σ_m se determina con la Ecuación 57.

$$\sigma_2 > 0 \rightarrow \sigma_m = \frac{1}{4} \cdot (3 \cdot \sigma_1 + \sigma_2) \quad \text{Ecuación 56}$$

$$\sigma_2 \leq 0 \rightarrow \sigma_m = \frac{3}{4} \cdot \sigma_1 \quad \text{Ecuación 57}$$

A partir de los resultados alcanzados con la tensión media (σ_m), se establece que la obra cumple con la condición de las tensiones cuando esta (σ_m) se encuentra dentro de los siguientes rangos, según corresponda el sitio de emplazamiento de la obra:

-Suelos de grava	entre 5 y 10 Mg.m ⁻² (= kg.cm ⁻²)
-Suelos de arenas gruesas	entre 3 y 5 Mg.m ⁻²
-Suelos de arenas medias	entre 1,5 y 3 Mg.m ⁻²
-Suelos granulados	mayor de 2 Mg.m ⁻²
-Suelos cohesivos	mayor de 3 Mg.m ⁻²

Defensa al pie

Los diques presentan una infraestructura aguas abajo del mismo, necesaria para impedir el descalce de las fundaciones por causa de la erosión que produce la caída de la lámina vertiente. Esta construida con el mismo o con diferentes materiales con respecto al dique y se denomina defensa al pie o zampeado.

Se considera que debe ser mayor o igual a dos veces la altura total de la obra. La longitud de la defensa al pie (**d**) se calcula por la Fórmula de Angherholzer (Ecuación 58).

$$d = \left(u + \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2 \cdot H}}{g} \right) \quad \text{Ecuación 58}$$

En el caso de la realización de un zampeado, se debe cumplir que la longitud debe ser mayor que la longitud de la lámina vertiente (lv), que se determina con la Ecuación 59.

$$lv = \sqrt{2 \cdot H \cdot hc + hc^2} \quad \text{Ecuación 59}$$

Mechinales

Para aliviar el empuje que debe soportar la obra se dejan ventanas sobre la estructura que sirven para drenar el aterramiento. Pueden tener forma circular o rectangular y presentar una distribución a tresbolillo.

La cantidad óptima de mechinales en un dique, se estima que es uno cada 5 a 8 m² de paramento.

Ejemplo de elaboración del Plano de dimensionamiento de un dique.

A partir del dimensionamiento del dique se realiza el planteo a escala en papel para esquematizar las partes constituyentes de la obra.

Para ello se presentan cuatro vistas características acotadas que reflejan dicho planteo. Las mismas son:

- Frente: donde se expone el corte transversal del curso y la obra. Se indican: el cuerpo con la longitud de las alas y de la cubeta. También se indica la ubicación del /los mechinales y el empotramiento.
- Planta: es la vista desde arriba de la obra, donde se indican la coronación, la base, las alas, la cubeta y además la defensa al pie y el zampeado.
- Perfil: se muestra el espesor de la coronación y de la base, los mechinales, la defensa al pie y zampeado. Además se apuntan las alturas: total, útil y de la cubeta.

Todo el esquema debe ser realizado a escala horizontal y vertical constante. Además debe presentar una breve carátula con el nombre del/los autores.

En relación al Perfil del aterramiento, sugiere la dimensión de la pendiente del terreno y la de compensación una vez construido el dique. Este dibujo debe presentar las dimensiones reales en texto y no necesariamente una escala.

En la Figura 124 se presenta un ejemplo de un Plano de dimensionamiento de un dique con sus tres perfiles de diseño: frente, planta y perfil, indicando también el perfil del aterramiento y pendiente de compensación.

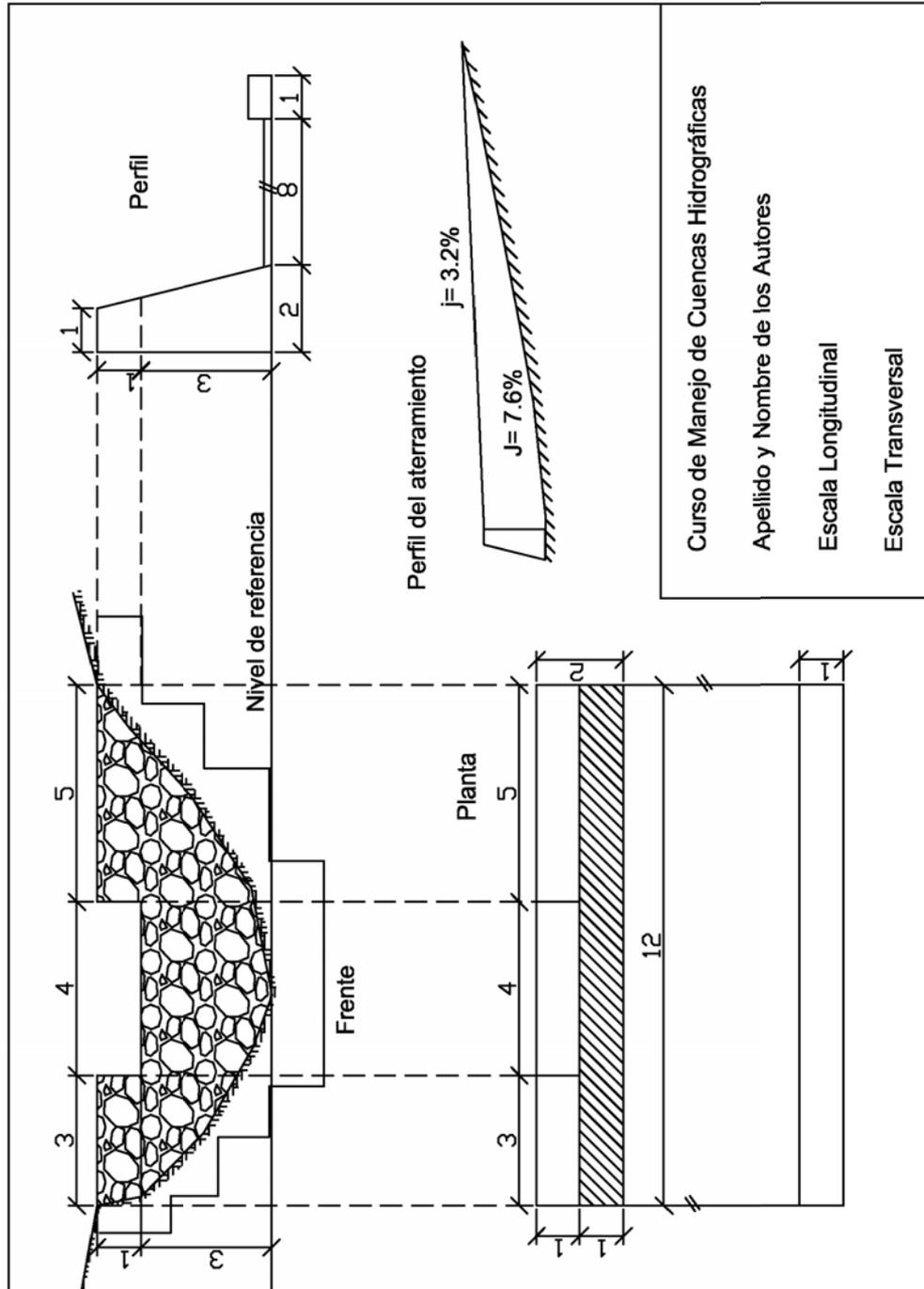


Figura 124. Plano de dimensionamiento de un dique con sus perfiles.

Ejemplo de aplicación.

A partir de los siguientes datos de la Tabla 40 y de la metodología de García Nájera, dimensionar un dique de consolidación y determinar las condiciones de estabilidad.

Dato	Valor
Caudal de cálculo (Q)	10 m ³ .s ⁻¹
Longitud del dique (L = a)	6 m
Pendiente longitudinal del cauce (J)	5 %
Aceleración de la gravedad (g)	9,8 m.s ⁻²
Altura total del dique (Ht)	4 m
Peso específico de los materiales (δ)	2,200 tn.m ⁻³
Densidad del hormigón (δh□)	2,4 tn.m ⁻³
Peso específico del agua con arrastres (ω)	1,06 tn.m ⁻³
Velocidad de las aguas desprovistas de acarrees (u)	3,7147 m.s ⁻¹
Coefficiente de seguridad (c)	1,5
Coefficiente de rozamiento del hormigón sobre roca (f)	0,7

Tabla 40. Datos de base para el dimensionamiento de un dique.

Los resultados obtenidos para cada una de las variables que componen la metodología de García Nájera, se exponen en la Tabla 41.

Variable	Valor
Longitud de la cubeta (Lc)	2,4 m
Altura de la cubeta (Hc)	1,2 m
Altura de la cubeta + 5 % de revancha para alas	1,3 m
Altura útil del dique (H)	2,8 m
Espesor de la cubeta o coronación (e)	1,2 m
Ancho de la base (B)	1,657 m

Tabla 41. Resultados de base para el dimensionamiento de un dique.

En la Tabla 42 se presentan los resultados alcanzados por las comprobaciones de estabilidad de la obra.

Variable	Valor
Empuje hidrostático puntual (Ep)	3,95 tn.m ⁻¹
Empuje hidrostático de total (E)	23,69 tn.m ⁻¹
Peso de la obra (G)	9,36 tn.m ⁻¹
Momento estabilizante (Me)	13,76 Mg.m.m ⁻¹
Momento de vuelco (Mv)	3,59 Mg.m.m ⁻¹
Me.Mv⁻¹	3,83 Mg.m.m ⁻¹
Fuerza de roce (Fr)	6,555 tn.m ⁻¹
Fr.Ep⁻¹	1,660
Ep.G⁻¹	0,422
Momento resultante (MR)	10,17 tn.m.m ⁻¹
Excentricidad de la obra (e*)	0,2576964
Tensión extrema máxima (σ1)	10,929 tn.m ⁻²
Tensión extrema mínima (σ2)	0,377 tn.m ⁻²
Tensión media (σm)	8,19659 tn.m ⁻²

Tabla 42. Resultados de estabilidad para el dimensionamiento de un dique.

A partir de los resultados expresados en la tabla 42 se demuestra que cumple con las condiciones de estabilidad al vuelco, al deslizamiento y a las tensiones admisibles.

Una vez cumplidos los requisitos del dimensionamiento se puede calcular la defensa al pie y requerimientos de mechinales, como se presenta en la Tabla 43.

Variable	Valor
Defensa al pie (d)	5,46 m
Superficie del cuerpo y alas	11,46 m ²
Mechinales	2

Tabla 43. Dimensionamiento de la defensa al pie y mechinales de un dique.

BIBLIOGRAFÍA

Bonell, M. & D.A. Gilmour. 1978. The development of overland flow in a tropical rainforest catchment. *Journal of Hydrology* 39. pp. 365-382.

Bonell, M. & J. Balek. 1993. Recent scientific developments and research needs in hydrological processes of the humid tropics. In: Bonell, M., Hufschmidt, M.M. and Gladwell, J.S. ed. *Hydrology and Water Management In the Humid Tropics*. 4: 167-260 pp.

Bustamante, E.. 1984. Hidrología. Conceptos de hidrología de superficie. Modelos matemáticos deterministas. Centro de investigaciones hídricas de la región semiárida (CIHRSA), Argentina. 336 pp.

Cenicafé. 1975. Manual de Conservación de suelos de ladera. 1a. ed. Centro Nacional de Investigaciones del Café (Cenicafé), Chinchiná, Colombia. 267 p.

Chow, V.T., Maidment D.R. & L.W. Mays. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, New York.

Chow, V. T., Maidment, D.R. & L. Mays. 1994. Hidrología Aplicada. Ediciones McGraw-Hill. Colombia. 583 pp.

Chuvieco, E. 2000. Fundamentos de teledetección espacial. Ediciones RIALP, S. A. Madrid. 568 pp.

Código de Aguas. Ley 12.257. <http://www.ada.gba.gov.ar>

Comisión de Desarrollo Sustentable y Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. 1991. Nuestra propia agenda sobre el desarrollo y medio ambiente, BID/PNUD, Fondo de Cultura Económica, México, D.F. Disponible en: <http://www.iadb.org/es/banco-interamericano-de-desarrollo,2837.html>.

Conesa G., C. 2004. Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. NIMBUS, N° 13-14, ISSN 1139-7136, pp. 125-142

Díaz, R.O. 2007. Utilización de pastizales naturales. Editorial Brujas. 456 P. Disponible en: <http://books.google.com.ar/books?id=jpZ5RHrGYmgC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>.

Dourojeanni, A. 1990. Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable (Aplicado a microrregiones y cuencas). Documento 89/05/Rev.1. Serie de ensayos. 452 pp.

Dourojeanni, A. 1993. Procedimientos de gestión para el desarrollo sustentable. Contribución para mejorar la toma de decisiones conducentes al desarrollo sostenible en la región. Dir.Div.Rec. Naturales e Infraestructura, Santiago de Chile. Versión revisada y actualizada del trabajo publicado bajo el nombre "Guía para orientar procesos de gestión para el desarrollo en cuencas y microrregiones de alta montaña" por el Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES) como Documento 89/05/Rev.1, Serie Ensayos. Disponible en CD.

Dourojeanni, A & A Jouravlev. 1999. Gestión de cuencas y ríos vinculados con centros urbanos. CEPAL, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. 176 pp. <http://www.eclac.cl/publicaciones/xml/8/5668/LCR1948-E.pdf>

Dunne, L. 1978. Field studies of hillslope flow processes. In: Kirkby, M.J. cci. Hillslope Hydrology. J. Wiley, New York.. pp. 227-293.

- Eastman, J. R.** 1997. Idrisi for Windows Users's Guide version 2.0. Tutorial Exercises. Worcester-. MA, Graduate School of Geography, Clark University. 192 pp.
- Eastman, J. R.** 2000. Introducción del Manual del IDRISI para Windows. Ed.Clark University. Worcester. 130 pp.
- García Nájera, J. M.** 1962. Principios de hidráulica torrencial. Su aplicación a la corrección de torrentes. Ministerio de Agricultura, Dirección General de Montes, Caza y Pesca Fluvial; Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias, Madrid. 349 pp.
- Gaspari F.J.** 2002. Plan de ordenamiento territorial en cuencas serranas degradadas. Aplicación de sistemas de información geográfica. Huelva. España. Ediciones cooperativas. Buenos aires. 179 pp.
- Gaspari F.J., Senisterra G.E., Delgado M.I., Rodríguez Vagaría A.M. & S.I.Besteiro.** 2009. Manual de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas. Editorial Autores, 1 ed, La Plata, Argentina. 321pp.
- GWP.** 2005. Estimulando el cambio: Un manual para el desarrollo de estrategias de gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) y de optimización del agua. Comité Técnico. Ministerio de Asuntos Exteriores de Noruega. 52 pp. Disponible en: www.unwater.org/v2_08/.../Catalyzing_change_Spanish.pdf
- Henaó, J.E.** 1988. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas, Centro de enseñanza desescolarizada. Universidad Santo Tomás. Bogotá. Colombia. 399 pp.
- Hudson, N.** 1982. Conservación del suelo. Editorial Reverté. Barcelona. Impresión en español 1982. ISBN 84-291-1027-5. Disponible en: http://books.google.com.ar/books?id=u137pQPXYGAC&hl=es&source=gbs_navlinks_s.
- INDECI.** 2011. Instituto Nacional de Defensa Civil. Dirección Nacional de Prevención. Guía Instructiva de Recomendaciones Estructurales .Cuaderno técnico N° 6. Lima. Perú. 43 P.
- Iroume A. & J. Ganoso.** 1991. La pendiente de los depósitos en los torrentes del cerro Divisadero, Coyhaique, Chile. BOSQUE 12(1): 37-42.
- Irurtia, C; Cruzate, G. & F.J.Gaspari.** 2007. Aplicación de la USLE en la provincia de Buenos Aires. Guía de divulgación técnica. Buenos Aires. 25pp.
- Kirpich, Z.P.** 1940. Time of concentration of small agricultural watersheds. Civil Engineering. 10(6): 362 pp.
- Linsley, R., Kohler, M. & J. Pahulus.** 1993. Hidrología para Ingenieros. Mc Graw Hill. México. 385 pp.
- Llamas, J.** 1993. Hidrología general: principios y aplicaciones. Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco. España: 635 pp.
- López Cadenas de Llano, F.** 1988. Corrección de torrentes y estabilización de cauces. Colección FAO: Fomento de tierras y aguas Nro. 9. 184 pp. Disponible en: <http://books.google.com.ar/books?id=LYSz9cvPvXwC&lpg=PA4&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=true>.
- López Cadenas de Llano F.** 1998. Restauración Hidrológica Forestal de cuencas y Control de la Erosión. Ingeniería Medioambiental, TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente. Editorial Mundi Prensa. España. 945 pp.
- López Cadenas de Llano F. & J.A.Mintegui Aguirre.** 1987. Hidrología de superficie. Editorial Salazar. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid: 222 pp.

Magnani, C. 2001. Derecho de Aguas. Instrumentos normativos y regulatorios de la gestión de los recursos hídricos. Curso Internacional de Postgrado sobre Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Buenos Aires, Secretaría de Ciencia y Técnica e Instituto Argentino de Recursos Hídricos, Buenos Aires, Argentina. 27 pp.

Mármol, L. A. 2006. Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas y Corrección de Torrentes. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Naturales. Ingeniería en Recursos Naturales y Medio Ambiente. 287 pp.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. 2008. Utilización de fajinadas para el control de la erosión en laderas y taludes. Ficha de la tecnología. 6 p. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/lucha-contra-la-desertificacion/0904712280144d76_tcm7-19569.pdf.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. 2008. Obras transversales de corrección de cauces torrenciales. Ficha de la tecnología. 6 p. Disponible en http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/lucha-contra-la-desertificacion/0904712280144d7d_tcm7-19576.pdf.

Mintegui Aguirre, J. A. 1988. Análisis de la influencia del relieve en la erosión hídrica. Hipótesis de estudio para correlacionar la pendiente con la longitud del declive en un terreno. V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Madrid pp. 2229-2245.

Mintegui Aguirre, J. A. & F. López Unzú. 1990. La Ordenación Agrohidrológica en la Planificación. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 306 pp.

Mintegui Aguirre, J. A. & J. C. Robredo Sánchez. 1994. Caracterización de las cuencas hidrográficas, objeto de restauración hidrológico forestal, mediante modelos hidrológicos. Ingeniería del Agua. Vol. 1 Num. 2. pp. 69 a 82.

Mintegui Aguirre, J. A., Robredo Sánchez J., García Viñas, J. I. & C. López Leiva. 2006. Introducción a la Restauración Hidrológico-Forestal de Cuencas Hidrográficas. Ed. Publicaciones del O. A. Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid. Ecología, Nº 20: 389-414.

Mintegui Aguirre, J. A. & J. C. Robredo Sánchez. 2008. Estrategias para el control de los fenómenos torrenciales y la ordenación sustentable de las aguas, suelos y bosques de las cuencas de montaña. Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO para la América Latina y el Caribe. PHI – VII, documento técnico Nro. 13. 178 pp.

Morgan, R.P.C. 1997. Erosión y conservación del suelo. Mundi-Prensa, Madrid, España. 343 pp.

Muñoz Cárpena R. & A. Ritter Rodríguez. 2005. Hidrología agroforestal. Ed. Mundi Prensa, Coeditor Gobierno de Canarias. España. 348 pp.

National Centre of Geographic Information and Analysis (NCGIA). 1990. Disponible en <http://www.ncgia.ucsb.edu/>

Ordoñez C. & R. Martínez Alegría. 2003. Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi 32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales. Ed. Alfa Omega. México. 227 pp.

Palacio P., J. L.; M. T. Sánchez S.; J. M. Casado I.; E. Propin F.; J. Delgado C.; A. Velázquez M.; L. Chias B.; M. I. Ortiz A.; J. González S.; G. Negrete F.; J. Gabriel M., & R. Márquez. 2004. Indicadores para la caracterización y ordenamiento del territorio. Universidad Nacional Autónoma de México, México. 168 pp. http://books.google.com.ar/books?id=_kvT8mQKH_QC&lpg=PA9&ots=OcSxIh

W2Lj&dq=ordenamiento%20territorial&lr&hl=es&pg=PA12#v=onepage&q=ordenamiento%20territorial&f=false

Pizarro Tapia R.; Flores V. J. P.; Sangüesa P.; Martínez A. & J. L. García. 2004. Diseño de obras para la conservación de aguas y suelos. Proyecto marco: 00C7FT-08 “Determinación de estándares de ingeniería en obras de conservación y aprovechamiento de aguas y suelos para la mantención e incremento de la productividad silvícola”. Fondo de Desarrollo e Innovación de la Corporación de Fomento de la Producción, CORFO, Chile. 147 pp.

Pochat, V. 2005. Entidades de gestión del agua a nivel de Cuencas: experiencia de Argentina. Serie Recursos Naturales e Infraestructura. CEPAL. Santiago de Chile. 59 pp. Disponible en: <http://www.cepal.org/> - <http://www.eclac.org>.

Pochat, V. 2008. Principios de gestión integrada de los recursos hídricos. Bases para el desarrollo de planes nacionales. Global Water Partnership Central América y Sud América. Disponible en: <http://www.gwp.org/.../...>

Principios rectores de políticas hídricas de la República Argentina. Acuerdo Federal del Agua. Disponible en: http://www.hidraulica.gov.ar/legales/principios_rectores_de_politica_hidrica.pdf

Rábade Blanco, J. M. 2006. La ordenación agrohidrológica de cuencas como herramienta en la planificación de la lucha contra la desertificación y el desdoblamiento del medio rural. Disponible en: www.sidym2006.com/imagenes/pdf/ponencias/17_se.pdf

Racca, J.M.G. 2007. Análisis hipsométrico, frecuencia altimétrica y pendientes medias a partir de modelos digitales del terreno. Boletín del Instituto de Fisiografía y Geología 77(1-2): 31-38.

Rojas, A. & A.Conde. 1985. Estimación del Factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de suelo para el Centro –Este de la República Argentina. Ciencia del Suelo- Vol. 3 N° 1-2. 23 pp.

Romero Díaz, A.. 2007. Los diques de corrección hidrológica: cuenca del río Quípar (Sureste de España). Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones. ISBN 978-84-8371-685-4. 253 pp. Disponible en: http://books.google.com.ar/books?id=CFKYLfDbG1IC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_vpt_buy#v=onepage&q&f=false.

Sampurno Bruijnzeel, L.A.. 1997. Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests. Editors: E. K. Sadanandan Nambiar and Alan G. Brown. CSIRO Canberra Australia. 571p.

Suárez de Castro, F. 1956. Conservación de suelos. Ed. Salvat S.A. Barcelona. 298 pp.

Urciuolo, A., Iturraspe, R., Rosanigo, B., Parson, A., Moyano, E. & M. Villarreal. 2007 Modelado de simulación hidrológica utilizando un enfoque de desarrollo basado en componentes IX. Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación. - Trelew – Chubut, Argentina. 5 pp.

US Army. 2009. HEC - HMS QuickStart_Guide. http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_QuickStart_Guide_3.4.pdf.

Ward, R.C. & M. Robinson. 1990. Principles of Hydrology. McGraw Hill, London. 365 pp.

Wischmeier, W. H. & D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. Unites States Department of Agriculture (USDA). Agriculture Handbook N°537. Washington. USA. 51 pp.