



Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Workshop Internacional de Aplicaciones de SIG en Hidrología
8 y 9 de Octubre de 2008
Santa Fe, Argentina

Estimación de la distribución espacial del Número de Curva en cuencas piedemontanas del Gran Mendoza aplicando técnicas SIG

Victor Hugo Burgos

Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino
Belgrano (O) 210. Mendoza – vburgos@ina.gov.ar

RESUMEN

En este trabajo se utiliza un Sistema de Información Geográfica (SIG) como herramienta en la modelización hidrológica de cuencas pedemontanas del Gran Mendoza. La generación de mapas a nivel regional se realiza mediante la aplicación de tablas de asignación y reclasificación y operaciones de superposición de las distintas capas de información de las que depende.

La automatización del proceso permite la rápida ejecución y actualización, ofreciendo una objetivación en el tratamiento de los datos, a la vez que introduce la posibilidad de calibrar el modelo generado y realizar escenarios de análisis.

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar y aplicar una metodología mediante un modelo cartográfico que estime la distribución espacial del Número de Curva (CN) en cuencas no aforadas del piedemonte al Oeste de la Ciudad de Mendoza.

El modelo cartográfico presentado, se desarrolla en función de la combinación de las distribuciones espaciales de los usos de suelo, grupo hidrológico del suelo, cobertura vegetal, condición hidrológica y pendiente del terreno. Se presentan tablas de reclasificación para la confección y/o complementación de cada uno de ellos, además de las tablas con asignación de CN para la tipología vegetal natural existente en zonas no antropizadas de Mendoza. Por último, debido a que se trata de cuencas aluvionales, se resolvió corregir el mapa de CN en función de las pendientes del Modelo Digital de Elevaciones.

La metodología propuesta se ha aplicado en cuencas aluvionales al oeste de la ciudad de Mendoza, en una extensión aproximada de 350 km².

Este trabajo se desarrolló en el Instituto Nacional del Agua – Centro Regional Andino, en el marco del proyecto “Estudios de actualización hidrológica del proyecto: Complejo de Obras Presa Chacras de Coria para atenuación de crecidas y demás obras complementarias”

PALABRAS CLAVE: CN, SIG, Hidrología Aluvional

INTRODUCCION

Dentro del proyecto “Estudios de actualización hidrológica del proyecto: Complejo de Obras Presa Chacras de Coria para atenuación de crecidas y demás obras complementarias”, cuyo objetivo principal fue verificar hidrológicamente el complejo de presas proyectado, fue necesario la realización de mapas de CN para obtener la distribución espacial de la variable y analizar mejor así, la incidencia de la misma en los hidrogramas finales.

El presente trabajo presenta la metodología empleada y los resultados obtenidos.

METODOLOGÍA

La determinación del potencial de escurrimiento se realizó en función del número de curva (CN; metodología del U.S. Soil Conservation Service, hoy NRCS) y se llevó a cabo de forma distribuida utilizando el SIG ArcView 3.2a y tablas de clasificación.

Existen diversas tablas de clasificación cruzada de doble entrada para asignar a una cuenca un valor de CN . El problema radica en que la clasificación hidrológica de suelos se realiza de forma cualitativa y en función de la experiencia del proyectista.

Es por ello que se aborda el problema de tratar de confeccionar en primera instancia un mapa de clasificación hidrológica de suelos en función de variables tales como la geomorfología, tipo de suelo y vegetación, pendientes, etc (todas variables disponibles como mapas temáticos dentro de un SIG) para que mediante una tabulación cruzada espacial con el mapa de uso de suelo (obtenido por procesamiento de imágenes satelitales) se obtenga de forma automática y distribuida espacialmente un valor de CN para cada celda de análisis (pixel).

El cruzamiento espacial de los mapas de uso de suelos y el del tipo hidrológico de suelos se realizó por medio de un procesamiento de álgebra de mapas y se obtuvo para cada cuenca el CN ponderado por área, debido a que el modelo hidrológico utilizado es del tipo concentrado.

Para que en la operación de superposición necesaria para realización del mapa del número de curva no haya números iguales, cada clase de las variables usos y tipos de suelos se reclasificó previamente asignando a cada identificador un número primo (Ferrer et al., 1995). El mapa resultante se volvió a clasificar asignando el correspondiente número de curva a su biunívoco producto de números primos.

Al tratarse de una zona aluvional, con grandes diferencias de niveles, se corrigió el mapa de CN en función de la pendiente.

Una forma de resumir la metodología empleada es mediante la representación por flujograma de las operaciones realizadas.

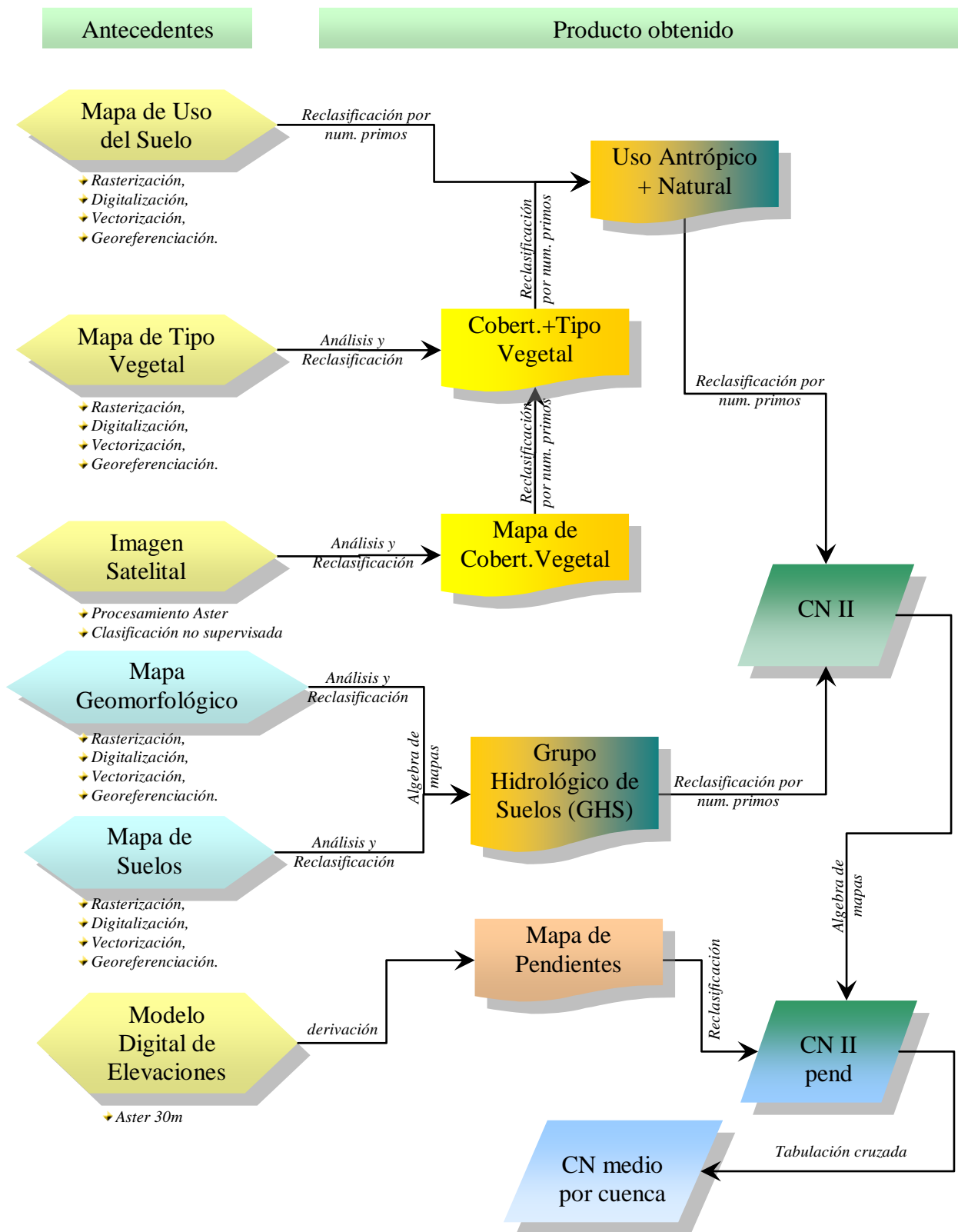


Figura N° 1: Flujograma cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN

USO DEL SUELO

El mapa de uso de suelo fue obtenido del SIPH (Sistema de Información para la Planificación Hídrica, FAO y DGI, 2004)

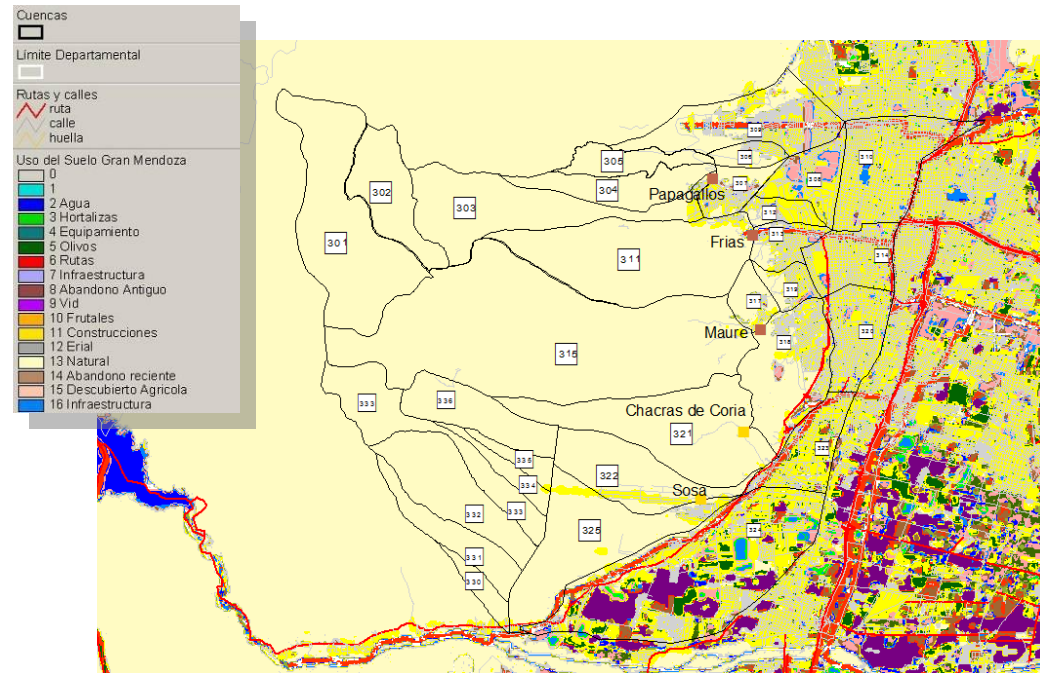


Figura Nº 2: Mapa de Uso de suelos. (FAO – DGI , SIPH)

Como se observa, en la zona de interés el uso existente de mayor importancia es el natural, no existiendo categorización por cobertura vegetal. Es por ello que se completó el mapa de uso de suelo incorporando la tipología vegetal existente y el porcentaje de cobertura vegetal.

TIPO DE VEGETACIÓN

Se identifican en la zona de estudio tres grandes grupos de vegetación: la denominada vegetación de montañas, la vegetación de bolsones y huayquerías y la zona de cultivos agrícolas. El primer grupo se ubica en las cuencas altas como la 301, 450, 453 y las partes altas de las cuencas 451, 452, 336, 333, 332 y 331; y predominan los pastizales (coironales) de *Stipa tenuissima*, o matorrales de *Junellia scoparia*. En las cuencas centrales (305, 309, 454, 317, 320, 325, 412, 410, 405, 403) predominan los jarillales.

En el segundo grupo se encuentran el resto de las cuencas aguas arriba de las presas proyectadas y se presentan como pedemontes con jarillales y bajadas arbustivas de hasta 3m de altura con presencias de *Larrea divaricata*, *Stipa tenuis* y *Larrea cuneifolia*.

El último grupo estaría aguas debajo de los cierres de cuenca, en la zona comprendida entre el río Mendoza y el corredor del Oeste (Panamericana), sin vegetación natural con presencia de cultivos de gran valor (vides) coexistiendo con zonas urbanizadas.

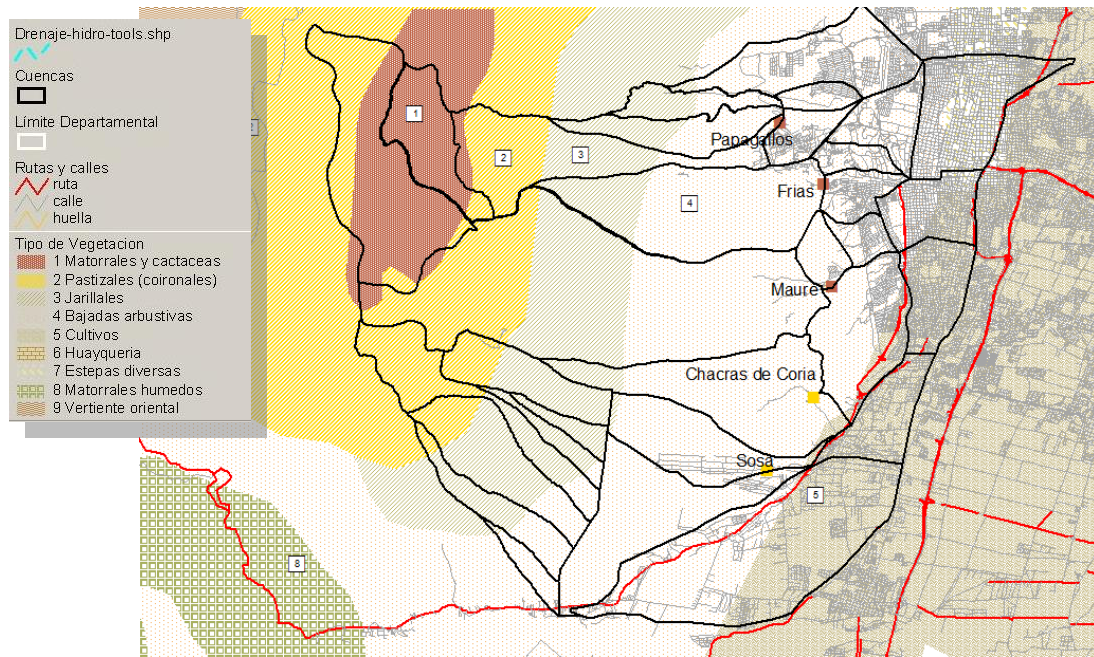


Figura Nº 3 : Mapa de tipo de vegetación

Tabla 1: Clasificación de vegetación

Tipo	Clase Vegetación	Grupos	Predominio	Capacidad de retención
De montaña	1	Matorrales y cactáceas	Schinus fasciculatus, Junellia scoparia	Buena
	2	Pastizales	Stipa tenuissima (coironales)	Muy buena
	3	Jarillales	Larrea divaricata	Buena
De bolsones y hayquerías	4	Bajadas arbustivas	Larrea cuneifolia y Stipa tenuis	Buena
Cultivos	5	Cultivos	Vides y frutales	Regular a mala

COBERTURA VEGETAL

Por medio de una clasificación no supervisada de una imagen satelital Aster de fecha Abril de 2005 (VNIR231) , con resolución de 15m, se confeccionó el mapa de cobertura vegetal

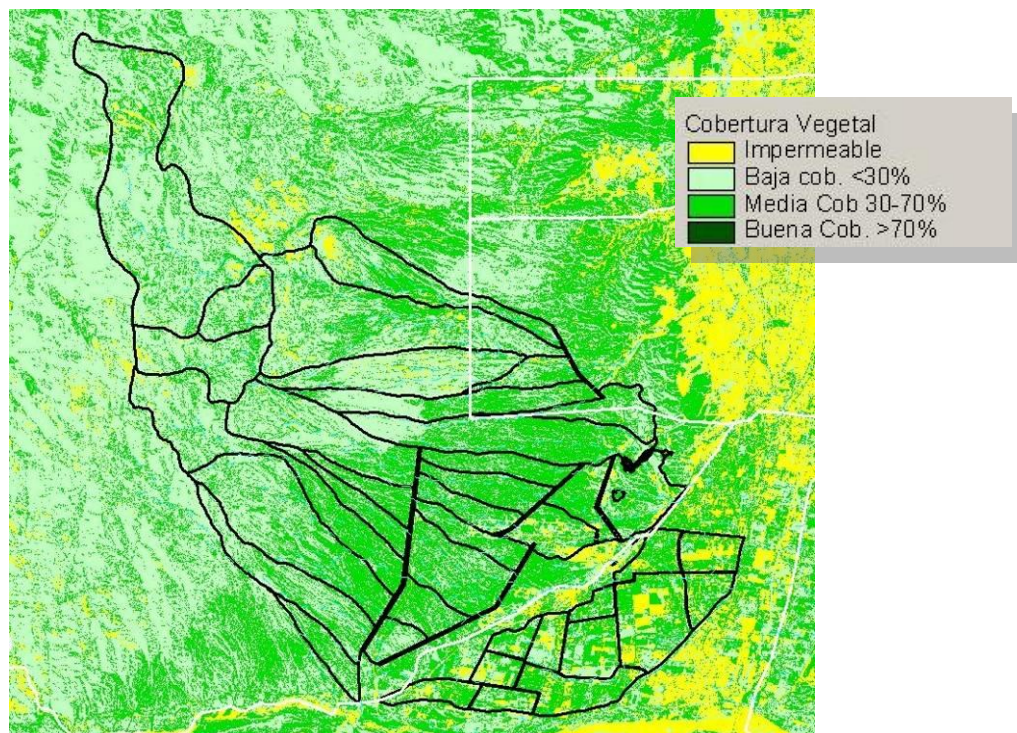


Figura Nº 4 : Mapa de cobertura vegetal

MAPA DE COBERTURA Y TIPOLOGÍA VEGETAL

Para realizar el cruzamiento espacial de los mapas de cobertura y tipología vegetal se procedió en primer lugar a reclasificar las clases de ambos mapas con números primos de forma de obtener resultados que garanticen unicidad en la relación de doble entrada.

Tabla 2: Agrupamiento de Tipo de Vegetación y Cobertura vegetal

Clase original	Tipo Vegetación	Nº Primo asignado	Cobertura Vegetal			
			Impermeable	Baja <30%	Media 30-70%	Buena >70%
			31	37	41	43
1	Matorrales	2	62	74	82	86
2	Pastizales	3	93	111	123	129
3	Jarillales	5	155	185	205	215
4	Jarillales	7	217	259	287	301
5	Cultivos	11	341	407	451	473
6	Huayquerias	13	403	481	533	559
7	Estepas	17	527	629	697	731
8	Matorrales húmedos	19	589	703	779	817
9	Vert oriental	23	713	851	943	989

Los valores en grises no están presentes en el área de estudio, por lo que no fueron tenidos en cuenta en las reclasificaciones.

Posteriormente se vuelven a reclasificar los resultados obtenidos para dar lugar a 5 nuevas clases producto de la combinación de ambos mapas.

Tabla 3: Reclasificación de los resultados

Clase	Resultado operación	Primo asignado
Impermeable	62	43
	93	43
	217	43
	155	43
Matorral baja cob.	74	47
Matorral media cob.	82	53
Pastizal baja cob.	111	59
Pastizal media cob.	123	61
Jarillal baja cob.	185	67
	259	67
Jarillal media cob.	205	71
	287	71

MAPA DE USO DEL SUELO CON COBERTURA Y TIPOLOGÍA VEGETAL

Obtenido el mapa combinado de cobertura y tipología vegetal por un lado, y por otro el mapa de uso de suelo (realizado por FAO-DGI), se fusionaron de manera de obtener mayor detalle de clases en la zona no antrópica o natural.

El procedimiento realizado siguió la misma metodología, es decir, la aplicación de procesamiento espacial y reclasificación por números primos, tal como lo indica la siguiente tabla de agrupamiento y reclasificación.

A la clase natural del mapa de uso de suelo, se le asignó un valor unitario, al igual que a las zonas externas al mapa de cobertura y tipología vegetal, de forma de mantener la clase original al multiplicarlas. La reclasificación final respetó la misma tabla, operando de la siguiente manera: todos los valores obtenidos del cruzamiento espacial de ambos mapas se reclasifican respetando la clase original de la columna de números primos (2 a 41), exceptuando los indicados en negrita que son resultado de superposiciones espaciales de ambas clases, a las cuales se les asignó el valor del número primo de la columna (primos del 43 al 71).

Tabla 4: Agrupamiento y reclasificación de Uso del suelo antrópico + Cob vegetal y tipo

			Cob vegetal y tipo						
			Impermeable	Matorral baja cob.	Matorral media cob.	Pastizal baja cob.	Pastizal media cob.	Jarillal baja cob.	Jarillal media cob.
Uso Suelo	Clase primo	1	43	47	53	59	61	67	71
No Antropizado									
	Natural	1	43	47	53	59	61	67	71
Antropizado	Frutales	2	86	94	106	118	122	134	142
	Hortalizas	3	129	141	159	177	183	201	213
	Olivos	5	215	235	265	295	305	335	355
	Vid	7	301	329	371	413	427	469	497
	Descubierto agrícola	11	473	517	583	649	671	737	781
	Infraestructura (calles y caminos)	13	559	611	689	767	793	871	923
	Construcciones	17	731	799	901	1003	1037	1139	1207

(areas urbanas, densidad <75%)									
Abandono reciente	19	19	817	893	1007	1121	1159	1273	1349
Abandono antiguo	23	23	989	1081	1219	1357	1403	1541	1633
Erial (suelo desnudo)	29	29	1247	1363	1537	1711	1769	1943	2059
Equipamiento (industrial y comercial)	31	31	1333	1457	1643	1829	1891	2077	2201
Rutas (pavimento duro)	37	37	1591	1739	1961	2183	2257	2479	2627
Embalse	41	41	1763	1927	2173	2419	2501	2747	2911

El resultado obtenido se muestra en la siguiente figura; que si se compara con la N° 1, se observa la misma clasificación en las zonas antrópicas con el agregado de la distribución espacial del tipo y cobertura vegetal en las zonas naturales.

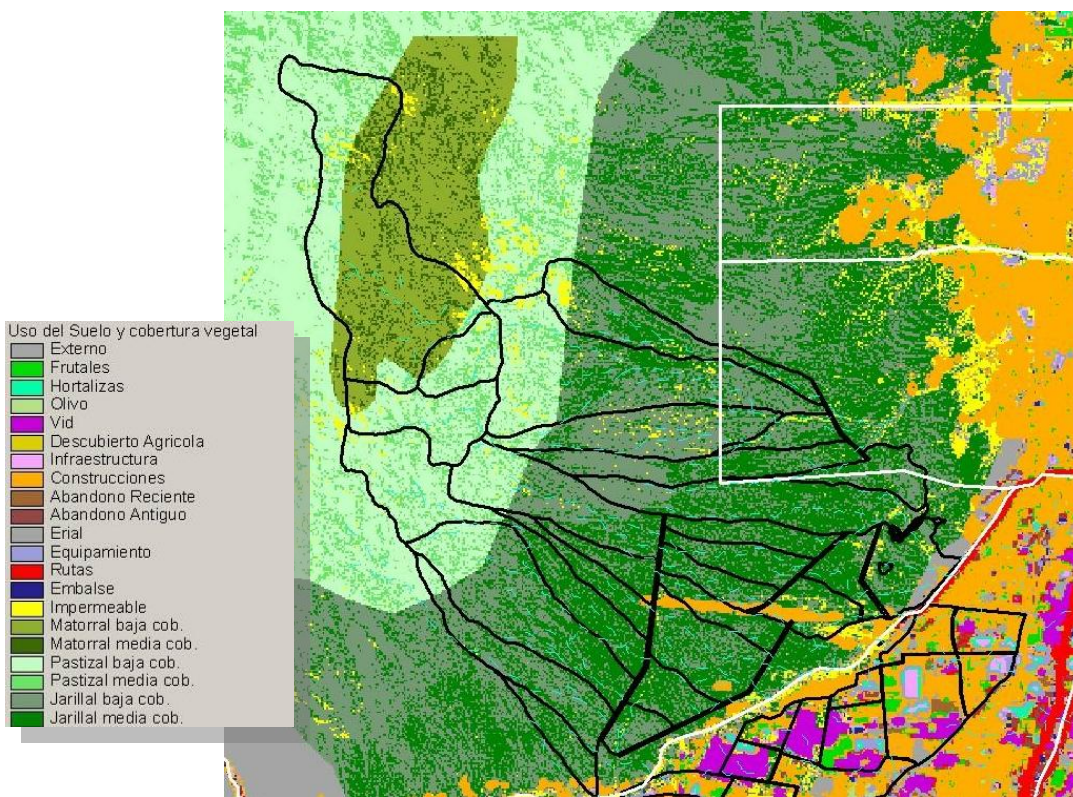


Figura N° 5 : Mapa de Uso del Suelo con cobertura y tipología vegetal

CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA DE SUELOS

La metodología del USDA SCS, clasifica el potencial de escurrimiento en cuatro grupos (A, B, C y D) en función de la capacidad de retención o drenaje de los suelos. En nuestra región no existe cartografía del tipo hidrológico de suelo, por lo que para determinar el CN es necesario contar con dicho mapa. Para la determinación del mapa de clasificación hidrológica de suelos se interpretaron, confeccionaron y/o digitalizaron los mapas temáticos de geomorfología y tipo de suelo. Se entiende que el grupo hidrológico es función de estas variables, es decir:

$$GH = f(s, g)$$

Siendo: GH: Grupo Hidrológico de suelo ; s: Parámetro debido al tipo de suelo; g: parámetro debido a la geomorfología

GEOMORFOLOGÍA

En toda la región que involucra el proyecto se diferencian cuatro grandes unidades: la zona montañosa, el pedemonte, la planicie aluvional y la llanura loessica. La primera con altitudes que oscilan entre los 2500 y 3000m y condiciones de aridez, presenta un paisaje que evoluciona por erosión encauzada bajo régimen de precipitación pluvial. La segunda zona (pedemonte) está conformado por una superficie de erosión en plano inclinado, con material no consolidado, discontinuo, en tránsito. Esta área recibe el máximo aporte de precipitaciones y da origen a torrentes que atraviesan la tercera zona con presencia de conos o abanicos aluvionales con flujos divergentes con erosión mantiforme, presencia de cárcavas, disminución de pendientes y canteras de extracción de áridos. La última zona se encuentra con oasis de cultivos y áreas urbanas.

En las cuencas altas, como la 301 (La Canterita) y 453 se identifican conglomerados con arenas y sedimentitas. En la parte superior de las cuencas 302, 450, 451 y 452 (todas subcuencas del trasvase Maure – Chacras) se identifican suelos de cerrillada pedemontana con sedimentitas paleozoicas. El resto de las cuencas se clasifica como bajada agradacional con presencia de conos y abanicos aluvionales.

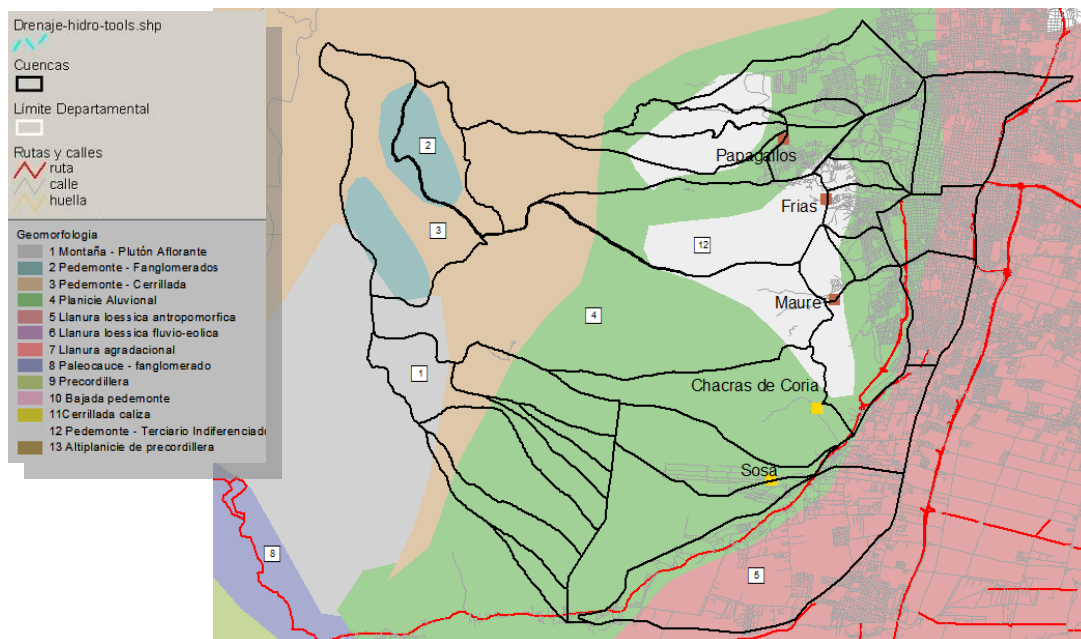


Figura N° 6 : Mapa de geomorfología

Tabla 5: Clasificación del mapa de geomorfología

Clase	Unidad	Tipo de geoforma	Erosión	Pen-dientes	Permea-bilidad
1	Montaña	Plutón aflorante. Grupo Choyoi, vulcanitas.		Fuertes	Baja
2	Pedemonte	Conglomerados con arenas y gravas. Fanglomerados. Terciario indiferenciado.	Erosión encauzada	Altas a medias	Muy Buena
3		Cerrillada pedemontana con sedimentitas paleozoicas.	Superficie de erosión en plano inclinado	Altas a medias	Muy Buena
4	Planicie aluvial	Bajada agradacional con conos y abanicos aluvionales	Erosión mantiforme con flujo divergente	Medias a bajas	Buena
5	Llanura loessica	Planicie aluvial, con antropomorfismo. Oasis cultivados y áreas urbanas		Bajas	Regular a buena

SUELOS

Los suelos han sido clasificados en tres clases también, el primer grupo se encuentra la roca en las zonas altas, y en las terrazas aluviales y conos de deyección se encuentran las dos clases de suelos restantes compuestas por el grupo de Entisoles con Subgrupos de torrifluventes típicos, torriortentes típicos, y T. líticos.

Los suelos, desarrollados en condiciones áridas, han formado perfiles del tipo AC con ausencia de horizontes, evolucionando débilmente a partir de materiales poco meteorizados. En el sector de montaña predominan los materiales derivados de rocas del lugar, en cambio en área de pedemonte los suelos derivan de materiales secundarios.

El material originario es producto meteorizado de esquistos, grauvacas, areniscas, tobas, andesitas, y porfiritas. La regolita se dispone como manto somero y de distribución irregular y en la región alta, es profundo de varios metros de espesor.

La primera clase de suelo posee fuertes pendientes del orden del 10% al 40% en laderas. Son rocas poco meteorizadas. La clase de suelo 2 es de altas pendientes, corresponden a suelos torriortentes, con fase muy pedregosa, algo excesivamente drenado, con textura arenoso gruesa. En el último grupo se encuentran los torrifluventes, dentro de la llanura aluvial, de fase moderadamente salina, con un drenaje imperfecto, de textura franca y de bajas pendientes del orden del 0,5 a 1%.

Tabla 6: Clasificación de suelos

Clase Suelo	Grupo	Subgrupo	Drenaje
1	Roca	-	Malo
2	Entisol	Torriortente	Bueno
3		Fluvente	Regular

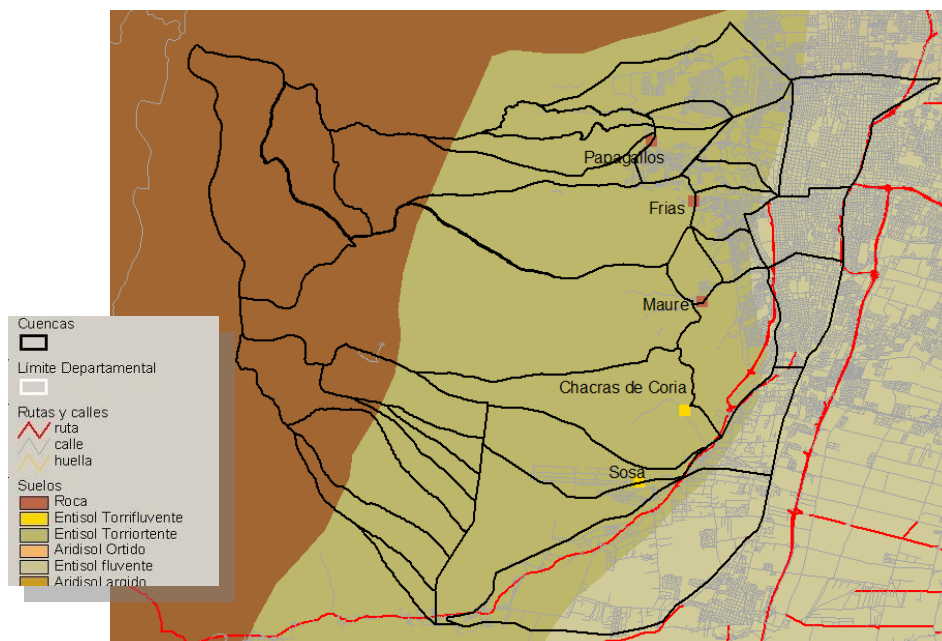


Figura N° 7 : Mapa de suelos

Finalmente el mapa de clasificación hidrológica de suelos se llevó a cabo por medio de un cruzamiento espacial entre los mapas de geomorfología y suelos, asignando a cada clase un factor en correspondencia con la capacidad de drenaje de la misma.

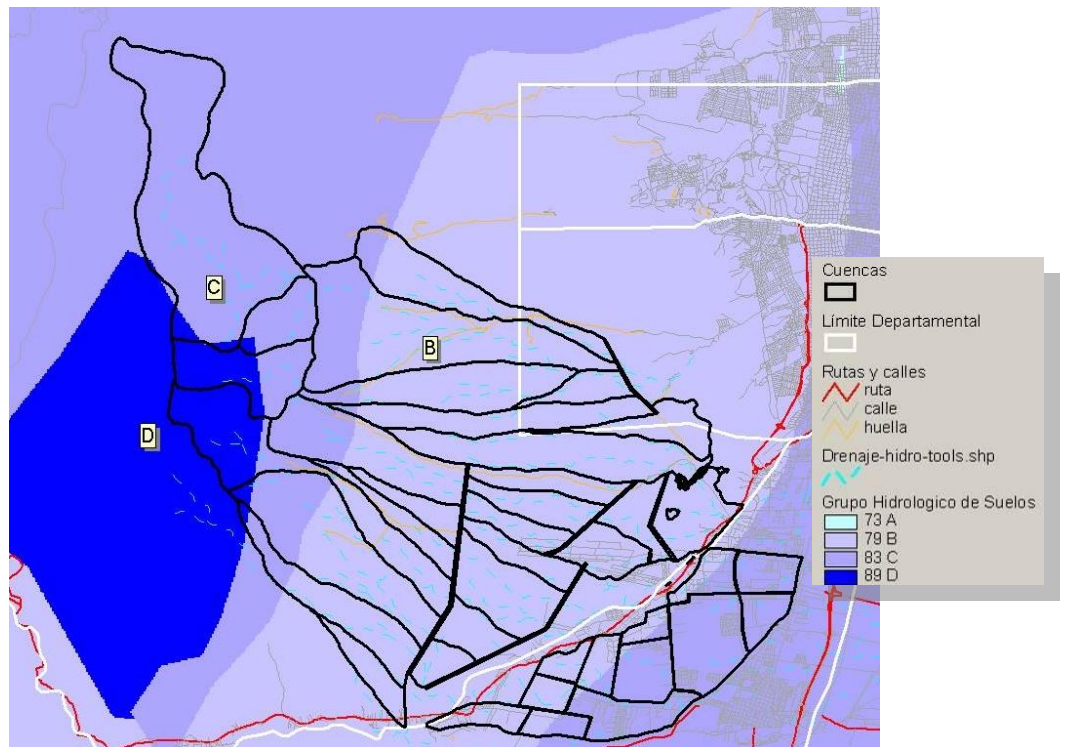


Figura N° 8: Mapa de Clasificación hidrológica de suelos.

Obtenidos el mapa de Uso y el mapa de Grupo Hidrológico de Suelos (GHS) se procedió a la asignación de valores de CN por medio de reclasificación en números primos y algebra de mapas.

La tabulación cruzada para la obtención del CN se llevó a cabo con respetando la siguiente tabla de doble entrada:

Tabla 7. Tabla de CN para Usos Antrópicos y no Antrópicos en condición media de humedad antecedente

Clase	Uso o Tipo de Cobertura vegetal	Grupo Hidrológico de Suelos			
		A	B	C	D
ANTROPIZADO					
AGRICOLA					
1	Frutales	41	55	69	71
2	Hortalizas	46	57	68	74
3	Olivos	65	72	79	88
4	Vid	70	80	86	90
5	Descubierto agrícola	75	83	89	91
NO AGRICOLA					
6	Infraestructura (calles y caminos)	72	82	87	89
7	Construcciones (areas urbanas, densidad <75%)	74	81	87	90
8	Abandono reciente	71	80	87	89
9	Abandono antiguo	74	82	87	90
10	Erial (suelo desnudo)	77	85	91	93
11	Equipamiento (industrial y comercial)	85	90	92	94

12	Rutas (pavimento duro)	95	95	95	95
13	Embalse	99	99	99	99

NO ANTROPIZADO

14	Natural:					
0	Impermeable: Paisaje desértico con maleza rastrera leñosa		96	96	96	96
1	Matorral: Mezcla de matorral y maleza, siendo el matorral el prioritario	Baja	48	67	77	83
		Media	35	56	70	77
		Buena	30	48	65	73
2	Herbácea: mezcla de hierba, maleza matorral de bajo crecimiento	Baja		80	87	93
		Media		71	81	89
		Buena		62	74	85
3-4	Mata desértica: incluyen plantas halófitas, crasas y con aceites especiales	Baja	63	77	85	88
		Media	55	72	81	86
		Buena	49	68	79	84

Fuentes: P.Fernández, (2007) en "Diseño Hidrológico" pp. 307-312

Ven Te Chow, (1994) en "Hidrología Aplicada" pp.150-155

Los resultados numéricos del cruzamiento espacial fueron los indicados en la siguiente tabla, y las reclasificaciones se realizaron haciendo corresponder las matrices de asignación del CN (tabla 9) con la de resultados (tabla 10), por ejemplo para la celda con valor 249 (hortalizas con GHS C) le corresponde una reclasificación a valor de 68. Los valores indicados en gris son resultados que no intervienen en el área de estudio ya que no existen áreas con GHS A, ni coberturas vegetales superiores al 70%.

Tabla 8. Tabla de resultados del cruzamiento espacial.

Clase orig.	Uso o Tipo de Cobertura vegetal	Num. primo	Grupo Hidrológico de Suelos			
			A	B	C	D
			73	79	83	89
ANTROPIZADO						
	AGRICOLA					
1	Frutales	2	146	158	166	178
2	Hortalizas	3	219	237	249	267
3	Olivos	5	365	395	415	445
4	Vid	7	511	553	581	623
5	Descubierto agrícola	11	803	869	913	979
	NO AGRICOLA					
6	Infraestructura (calles y caminos)	13	949	1027	1079	1157
7	Construcciones (areas urbanas, densidad <75%)	17	1241	1343	1411	1513
8	Abandono reciente	19	1387	1501	1577	1691
9	Abandono antiguo	23	1679	1817	1909	2047
10	Erial (suelo desnudo)	29	2117	2291	2407	2581
11	Equipamiento (industrial y comercial)	31	2263	2449	2573	2759
12	Rutas (pavimento duro)	37	2701	2923	3071	3293
13	Embalse	41	2993	3239	3403	3649
NO ANTROPIZADO						

14	Natural:						
0	Impermeable: Paisaje desértico con maleza rastrera leñosa		43	3139	3397	3569	3827
1	Matorral: Mezcla de matorral y maleza, siendo el matorral el prioritario	Baja	47	3431	3713	3901	4183
		Media	53	3869	4187	4399	4717
		Buena					
2	Herbácea: mezcla de hierba, maleza matorral de bajo crecimiento	Baja	59	4307	4661	4897	5251
		Media	61	4453	4819	5063	5429
		Buena					
3-4	Mata desértica: incluyen plantas halófitas, crasas y con aceites especiales	Baja	67	4891	5293	5561	5963
		Media	71	5183	5609	5893	6319
		Buena					

El mapa resultado de las operaciones planteadas, con valores distribuidos de CN en condición II, se muestra en figura siguiente.

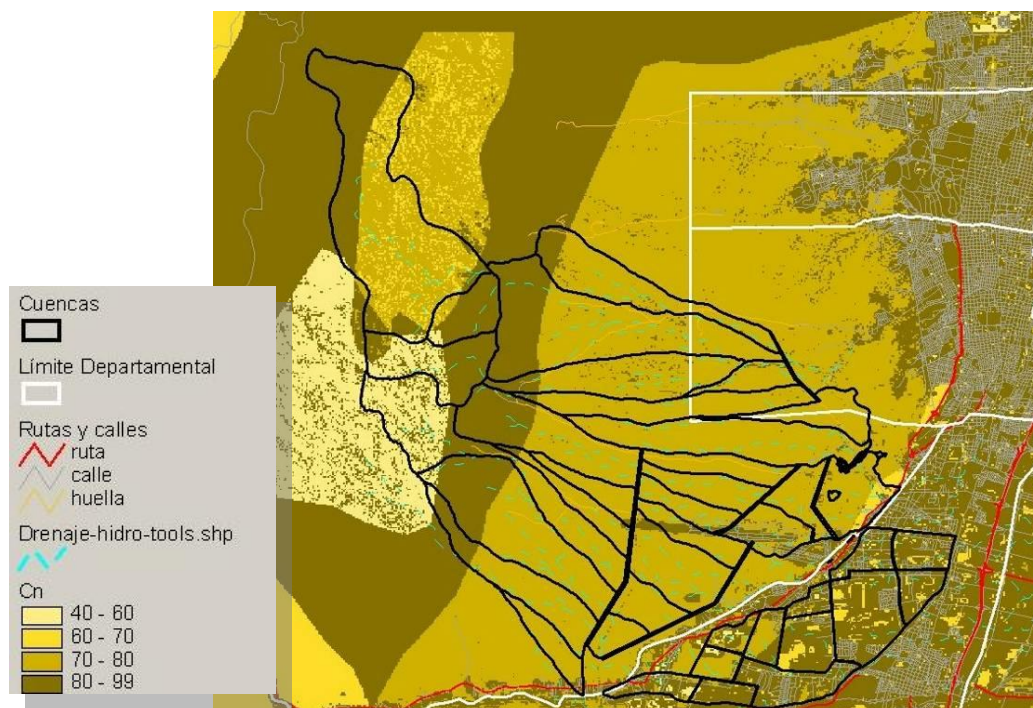


Figura Nº 9: Mapa de CN II

AJUSTE DEL CN POR PENDIENTES

Obtenido el mapa de CN en condición I, II y III, se obtendrá un CN^{II} corregido en función de la pendiente. Por medio de la derivada primera del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se obtuvo el mapa de pendientes expresado en porcentajes. Se clasificó en cinco zonas, la primera ubicada en las cotas altas con laderas de fuerte pendiente del orden del 30 a 40%, la segunda clase ubicada en las cerrilladas del pedemonte con pendientes del 7 al 30%, la tercer zona con pendientes del orden de 3 a 7% predominante en los conos aluvionales, la cuarta clase con pendientes medias de 1 a 3%, y la última clase con pendientes bajas hasta el 1%.

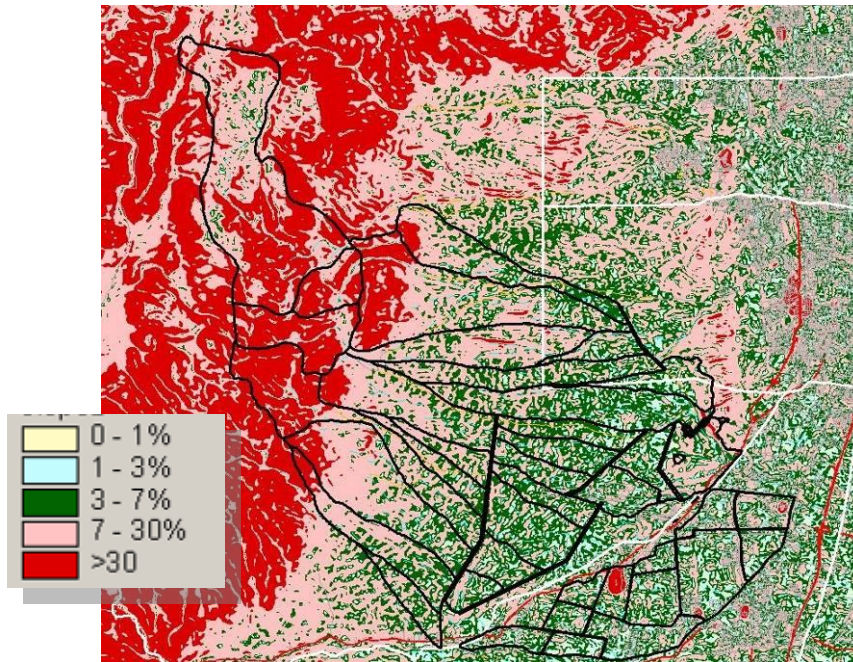


Figura Nº 10: Mapa de pendientes

La pendiente servirá para modificar el CN en función de la siguiente ecuación:

$$CN_{slope}^{II} = \left[\frac{CN^{III} - CN^{II}}{3} \cdot \left(-2 \cdot e^{\left(-13.86 \cdot PEND \right)} \right) \right] + CN^{II}$$

$$CN^{III} = \frac{CN^{II}}{\left(0.427 + 0.00573 \cdot CN^{II} \right)}$$

$$CN^I = \frac{CN^{II}}{\left(0.281 + 0.01281 \cdot CN^{II} \right)}$$

Aplicada la ecuación exponencial en el SIG se obtuvo el mapa final del CN en condición II modificado por el mapa de pendientes, tal como se muestra en la siguiente figura.

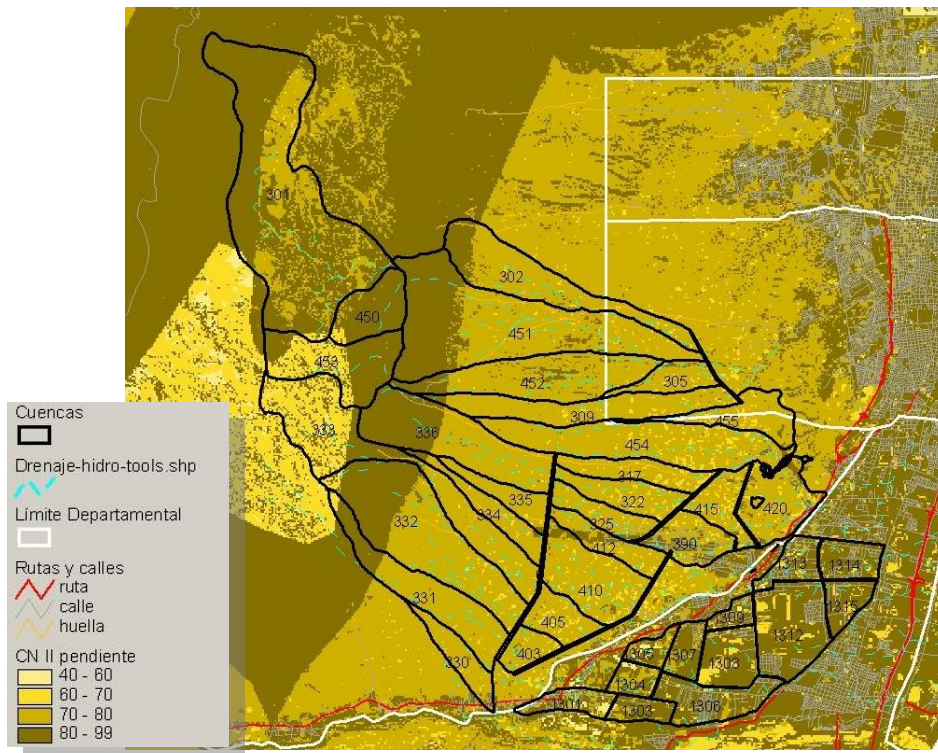


Figura N° 11: Mapa de CN II modificado por pendientes

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una de las metodologías más extendidas y experimentadas para la cuantificación de la escorrentía es el modelo empírico del número de curva, CN, del Servicio de Conservación de Suelos de los EEUU. El parámetro hidrológico de referencia, CN, es función de diversas variables relacionadas con las características físicas de la cuenca. La relación entre dichas variables es tabular, lo que facilita su aplicación espacial mediante los SIG.

Una ventaja que presenta la metodología propuesta es que la actualización de los mapas del número de curva es mucho más rápida y económica, puesto que supone únicamente cambiar los datos de algún mapa de variables (normalmente el de usos del suelo) y generar de nuevo el mapa de CN. Una vez la información forma parte del SIG utilizado, la generación del mapa del número de curva es un proceso rápido, y comparativamente menos pesado y más preciso que la superposición manual de las distintas capas de información, especialmente si se tiene en cuenta que cada vez se podrá adquirir más fácilmente información en formato digital.

BIBLIOGRAFÍA

- Burgos, Victor** (2005) *“Modelación Hidrológica de cuencas piedemontanas. Uso de Sistemas de Información Geográfica en Hidrología Superficial”* Congreso Nacional del Agua, Mendoza.
- Chow, V. T., D. R. Maidment y L. W. Mays** (1994) *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana S.A. Santafé de Bogotá, Colombia.
- Ferrer, M. et al** (1995). *“Generación Automática del Número de Curva con Sistemas de Información Geográfica”*. Ingeniería del Agua. Vol. 2. N° 4. p. 43-58.
- Hämmerly R. et al** (2007) *“Modelación Hidrológica con SIG”* ebook Universidad Nacional del Litoral.
- SCS. Soil Conservation Service.** (1984). Engineering Field. Manual for Conservation Practices. Fourth Printing. Chapter 2. Estimating Runoff.