



IT N° 51-CRA

INFORME TECNICO

<p>SUSTENTABILIDAD HIDROLÓGICA DE URBANIZACIONES EN PEDEMONTES</p>

Autores:

Ing. Jorge A. Maza (*Responsable del proyecto*)
Sr. Víctor Burgos (becario INA)
Inga. Patricia López
Inga. Verónica Benegas (becaria INA)

Publicación Interna

Belgrano (Oeste) 210
5500 Mendoza- Argentina

Mendoza, abril de 2004

Telefax: 54 261 428 8251

Correo Electrónico: cra@ina.gov.ar

SUSTENTABILIDAD HIDROLÓGICA DE URBANIZACIONES EN PEDEMONTE

Jorge A. Maza, Víctor Burgos, Patricia López, Verónica Benegas

Resumen

El Instituto Nacional del Agua a través de su Centro Regional Andino ha ejecutado el proyecto **Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte** en el marco de su Plan Estratégico cumpliendo el Objetivo Institucional de *Innovación tecnológica dirigida a solucionar problemas hídricos urbanos* y la Línea Estratégica-Temática de *Contribuir al tratamiento integrado de problemas hídricos urbanos y ocupación territorial no planificada*.

Con este proyecto se han verificado las implicancias desfavorables que producen las urbanizaciones de tipo convencional en el pedemonte en el escurrimiento pluvial en la zona urbana de aguas abajo ya que generan caudales en un 88% superior a los que produce la cuenca en su estado natural.

También el estudio ha permitido comprobar a través de un diseño urbanístico no convencional que las condiciones hidrológicas así generadas mejoran sustancialmente ya que el porcentaje mencionado baja al 30%.

Luego de una amplia revisión bibliográfica sobre reglamentaciones y códigos de urbanización en pedemonte de la cual se pudo extraer información correspondiente a 34 ciudades de Estados Unidos y Canadá, este diseño urbanístico no convencional fue ajustado en su desarrollo de manera tal que se ajustara a pautas como:

- Desarrollo de calles siguiendo el contorno del terreno
- Cantidad de lotes o viviendas en proporción inversa a la pendiente natural
- Desagüe pluvial de las viviendas dirigido al propio lote para su infiltración
- Aplicación de un índice de fragilidad del territorio en función de parámetros de infiltración, pendiente natural del terreno y distancia a cauces
- Ubicación estratégica de embalses de retención en excavaciones

Estas condiciones permitieron lograr una respuesta hidrológica tal, que el escurrimiento generado por una tormenta con probabilidad de ocurrencia del 20% (TR=5 años), fuera igual al que se generaría en la cuenca natural.

El proyecto para su desarrollo utilizó cartografía digitalizada, fotografía aérea, imagen satelital, sistema de información geográfica, modelo digital de terreno y modelos matemáticos de simulación hidrológica.

El estudio culmina con una propuesta de pautas de sustentabilidad hidrológica para la urbanización del pedemonte del Gran Mendoza.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ALUVIONAL Y DE ESCURRIMIENTOS PLUVIALES EN LAS ÁREAS URBANAS DE AGUAS ABAJO	1
2.1 El clima y las precipitaciones	2
2.2 Problema aluvional	2
2.3 El drenaje urbano de Mendoza	3
2.4 Origen de los problemas de inundación urbana	4
3. PROBLEMÁTICA DE LA URBANIZACIÓN DEL PEDEMONTE	5
3.1 Necesidad de sustentabilidad hidrológica	5
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y REGLAMENTACIONES	7
4.1. Limitaciones sobre área cubierta y densidad de lotes	9
4.2. Limitaciones sobre movimientos de tierra (nivelaciones)	9
4.3. Requerimientos sobre superficies con espacios inalterados (naturales)	10
4.4. Pautas sobre el desarrollo de calles	11
4.5. Pautas sobre el drenaje pluvial	12
4.6. Pautas sobre el diseño arquitectónico	14
5. ESTUDIO EN EL PEDEMONTE DEL GRAN MENDOZA	15
5.1 Introducción	15
5.2 Implementación del S.I.G y M.D.E.	16
5.3 Descripción y estudios en cada escenarios	20
5.3.1 Escenario N° 1	20
5.3.1. 1.Red de drenaje	22
5.3.1.2. Hidrología	25
A) Determinación del CN (metodología del U.S. Soil Conservation Service)	25
B) Tormenta de Diseño	31
C) Modelación con HEC GeoHMS	32
D) Modelación con ARHYMO	33
E) Modelación con método de Clark	34
F) Calibración y Ajuste de Parámetros	41

5.3.2. Escenario N° 2: Loteo No Convencional	44
5.3.2.1. Hidrología	49
5.3.3 Escenario N° 3: Loteo convencional	51
5.3.3.1. Hidrología	53
5.3.4 Fragilidad del territorio	54
5.3.4.1. Sustentabilidad de la Urbanización	54
5.3.4.2. Análisis de lotes vs pendientes	57
5.3.4.3. Movimiento de suelos	59
5.3.5 Escenario N° 4	63
5.3.5.1. Hidrología	67
5.3.6 Escenario N° 5	68
6. CONCLUSIONES	72
7. BIBLIOGRAFÍA ANTECEDENTE Y DE CONSULTA	75
APÉNDICES	77
APÉNDICE I PROPUESTA DE PAUTAS DE SUSTENTABILIDAD HIDROLOGICA PARA LA URBANIZACION DEL PEDEMONTE DEL GRAN MENDOZA	78
APÉNDICE II TORMENTA DE PROYECTO PARA EL AREA DEL GRAN MENDOZA	85

1. INTRODUCCIÓN

El presente informe contiene la descripción de los estudios, resultados, conclusiones y propuestas que se realizaron en el marco del proyecto institucional del INA **Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte**.

Este proyecto ha estado encuadrado en el **Plan Estratégico del INA** a través de:

Objetivo Institucional: *Innovación tecnológica dirigida a solucionar problemas hídricos urbanos.*

Línea Estratégica-Temática 2: *Contribuir al tratamiento integrado de problemas hídricos urbanos y ocupación territorial no planificada.*

Los objetivos a alcanzar con el desarrollo del proyecto enunciados en la Solicitud de Subsidio fueron:

- Adaptar a la región propuestas de urbanización en pedemonte que se encuentran en la bibliografía internacional.
- Verificar la incidencia hidrológica de las alternativas propuestas
- Elaborar normas de urbanización que produzcan bajo impacto hidrológico

Estos objetivos fueron logrados y, además, el ámbito del proyecto permitió implementar nuevas tecnologías vinculadas al acoplamiento de un sistema de información geográfica a modelos matemáticos de simulación hidrológica.

Es de aclarar que, si bien en la metodología de presentación para la selección de proyectos se había propuesto la utilización del modelo de parámetros distribuidos en cuencas urbanas PCSWMM, éste no ha sido implementado, debido a que se ha considerado que la evaluación del impacto hidrológico de la urbanización se debe realizar con un modelo de parámetros concentrados, que admita la simulación en cuencas tanto urbanas como rurales, a efectos de poder realizar comparaciones congruentes en la globalidad del proyecto.

La formación de recursos humanos se cumplimentó a través de la participación en el proyecto de dos becarios del INA del Programa de Entrenamiento Profesional y Técnico.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA ALUVIONAL Y DE ESCURRIMIENTOS PLUVIALES EN LAS ÁREAS URBANAS DE AGUAS ABAJO

2.1 El clima y las precipitaciones

El clima de Mendoza es templado continental seco, lo que se ve reflejado en los siguientes datos:

- La temperatura media anual es de 16°C variando las medias diarias mensuales de 8°C en Julio a 24°C en Enero.

- Las temperaturas máximas medias diarias oscilan de 15°C en Julio a 32°C en Enero y las mínimas medias diarias van de 2°C en Julio a 16°C en Enero.
- La humedad relativa media es de 52%, oscilando a lo largo del año de 42 a 62% (medias mensuales).

La precipitación media es de 194 mm. anuales, variando en el interior de la provincia de 80 a 340 mm. Las precipitaciones se desarrollan generalmente en el verano como tormentas convectivas de alta intensidad y corta duración (105 mm. en 1 hora, el 4 de enero de 1970), habiendo registros de intensidades de hasta 5 mm./min.

2.2 Problema aluvional

Históricamente, la ciudad de Mendoza, ha soportado severas inundaciones, derivadas del hecho de estar asentada en el piedemonte de la Precordillera Andina, en el cono de deyección de varias cuencas aluvionales. Existen antecedentes comprobados de problemas aluvionales desde el año 1607 (Mendoza fue fundada por españoles encabezados por Don Pedro del Castillo en el año 1561). Dichos antecedentes se encuentran plasmados en antiguos documentos y manuscritos, generalmente de sacerdotes y vicarios jesuitas y de altas autoridades de la época.

Síntesis de los eventos más importantes, aunque los antecedentes sobre los aspectos socio-económicos sean escasos:

- En 1716 una gran inundación destruyó gran parte de los edificios céntricos, entre los que se hallaban la Iglesia de Nuestra Señora de Loreto.
- En 1754 una inundación puso en peligro a los pobladores de la vieja ciudad fundada en 1561.
- En 1895 se precipitó sobre la ciudad y alrededores una lluvia de características inusuales, provocando una verdadera catástrofe. El agua que descendía de la cerrillada oeste arrastraba a su paso puentes, troncos de árboles, numerosos quioscos de la sierra y posteriormente ropas, muebles, animales muertos y enseres de las casas de los barrios pobres situados a oeste de la ciudad. Este aluvión produjo 24 muertos, 200 heridos e infinidad de familias sumidas en la miseria por haberlo perdido todo.
- En el año 1900 se produce una crecida en el río Mendoza, que destruye parte del dique Cipolletti, y deja sin agua al canal que proveía de ese elemento a la ciudad. Dos días después una fuerte lluvia caída en las cercanías del oeste provoca una avenida torrencial que inundó propiedades, viñas y casas.
- En 1959, el 31 de diciembre, una intensa lluvia, caída en las cerrilladas del oeste y sobre la ciudad misma, provocó inundaciones y daños en el centro de Mendoza. El comercio resultó muy perjudicado pero no se registraron víctimas. Las pérdidas económicas fueron superiores a los \$ 220.000.-
- En 1968, el 4 de enero, se produce otro evento de importancia en el departamento de Las Heras. Las pérdidas fueron calculadas en \$ 435.000.

El mismo día, otra avenida torrencial asoló el departamento de Tupungato que arrasa plantaciones. Las pérdidas se estimaron en \$ 2.150.000.

- También en 1968, el 4 de febrero, un aluvión asoló el departamento de Las Heras. Una enorme masa de arena y barro se desplazó y quedó depositada en importantes arterias y propiedades aledañas.
- El 4 de enero de 1970 ocurrió la peor catástrofe soportada por la provincia,. Una fuerte tormenta se precipitó sobre la cuenca del Frías, que provocó la destrucción del dique homónimo, originando una avalancha de agua y lodo que inundó la zona de influencia. El hecho provocó más de 24 víctimas fatales y los accidentados se estimaron entre 1500 y 2000 personas. Los daños materiales se calcularon en una suma superior a los \$ 23 millones. A estas referencias deben sumarse pérdidas millonarias por inundaciones en varios departamentos. Además de las pérdidas de las cosechas, que en algunos lugares fue total, debe tenerse en cuenta el lucro cesante, ya que muchas plantaciones no dieron frutos hasta 2 años después. En cuanto a la red vial, solamente en reparación de caminos destruidos debieron invertirse más de \$ 790.000.

Del piedemonte, bajan innumerables cauces de diferente importancia, en dirección Oeste-Este. Mendoza, que está situada donde el piedemonte se va transformando en planicie, los intercepta. Hoy, esta importante urbe de 950.000 habitantes llamada Gran Mendoza (Mendoza, Godoy Cruz, Guaymallén, Las Heras, Maipú y Luján), ha quedado surcada por una serie de canales que han tratado de respetar lo que la naturaleza ha impuesto desde el comienzo; una gran cantidad de esos cauces naturales, han desaparecido y otros se han convertido en calles. Los cauces más importantes se han respetado y hoy son canales que conducen el agua retenida y laminada por los diques aluvionales al colector principal.

Los problemas aluvionales surgen debido a la insuficiente capacidad de conducción con que cuentan dichos canales y a las características peculiares del sistema de drenaje pluvial. Esta insuficiencia puede atribuirse tanto a la disminución paulatina de su pendiente, como a la disminución de su sección cuando pasa por la ciudad (presión urbanística).

Los diques aluvionales forman una especie de escudo que normalmente protege de una forma efectiva a la ciudad de las avenidas que se forman en estas cuencas, las cuales poseen una importante pendiente media y por consiguiente, cortos tiempos de concentración y elevados caudales pico.

2.3 El drenaje urbano de Mendoza

El sistema de drenaje pluvial de Mendoza está compuesto por diferentes categorías de colectores:

- Colector primario: es el colector principal, el canal matriz de riego Cacique Guaymallén.
- Colectores secundarios: son los canales que desagüan al colector principal, (ej.:canales Maure, Frías y de los Ciruelos).
- Colectores terciarios: son las calles de la ciudad que desagüan a los canales descriptos como drenaje secundario.
- Colectores cuaternarios: son las acequias que se sitúan adyacentes a las calles.

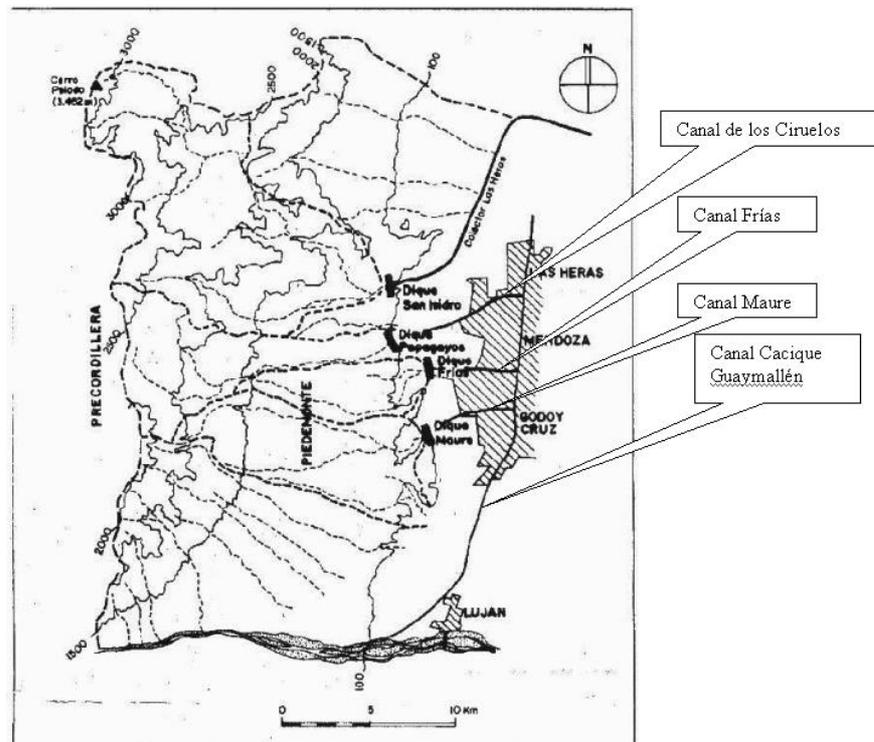


Figura N° 1

Una característica peculiar de este sistema, es que la capacidad de cada elemento drenante no guarda relación alguna con el papel que debe jugar dentro del sistema. Por ejemplo, la capacidad máxima de conducción del canal Cacique Guaymallén es de aprox. 250 m³/s, cuando la capacidad total de los canales que a él desaguan supera los 600 m³/s.

2.4 Origen de los problemas de inundación urbana

Debido a las características que posee el sistema de drenaje pluvial en Mendoza, los colectores descritos anteriormente como cuaternarios, las acequias, en un evento típico de lluvia estival de tipo convectivo de gran intensidad, queda en pocos minutos colapsado, ya que su capacidad se ve rápidamente sobrepasada.

Debido a esto y a que no existe otra vía para canalizar el agua, ésta se conduce por las calles de la ciudad, comportándose como verdaderos canales que desaguarán a la red secundaria.

Además, la red secundaria (canales aluvionales) no puede cumplir su función, que debería ser la de interceptar todo el escurrimiento que proviene de las calles, ya que su capacidad es sobrepasada y lo que hace a menudo, en cambio, es contribuir al escurrimiento aguas abajo. Esto sucede con frecuencia, en especial cuando llueve también en el piedemonte, ya que éstos traen un caudal, aunque laminado, desde los diques aluvionales.

3. PROBLEMÁTICA DE LA URBANIZACIÓN DEL PEDEMONTE

Además de las causas enunciadas la situación del drenaje pluvial urbano de Mendoza se ha agravado en los últimos años por la excesiva urbanización especulativa y sin criterio urbanístico que se ha llevado a cabo en las primeras estribaciones pedemontanas.

Tales urbanizaciones se han realizado con igual criterio al de las planicies: en forma de damero y, lamentablemente, con calles en dirección de la máxima pendiente, lo cual ha producido un aumento notable de los volúmenes de los escurrimientos pluviales y la disminución de los tiempos de concentración con el consecuente aumento de caudales.

Es decir que ante la presencia de lluvias de igual intensidad, el problema se va agravando, ya que una lluvia de 20 mm en media hora, que en Mendoza hace 30 años producía pocos problemas de crecientes, causa hoy, en cambio, serios inconvenientes.

Para la construcción de barrios con la forma descrita se realizaron grandes movimientos de tierra que modificaron las redes de drenaje natural de las cuencas lo cual produjo alteraciones en las direcciones del flujo de escurrimiento para los cuales estaba diseñado el sistema de desagües de aguas abajo. Así ahora existen canales que reciben muy poco escurrimiento y otros que se encuentran colapsados en su capacidad.

Esos grandes movimientos de tierra también afectaron considerablemente no solo al paisaje natural, tan valioso para el sentir de los pobladores locales, sino también la flora y fauna autóctona.

Es claro entonces que se necesita regular la urbanización del pedemonte por una variedad de razones. Estas incluyen la protección de:

- vidas y propiedades por deslizamientos de laderas y aluviones
- recursos naturales
- sistemas y aspectos ambientales, tales como cauces aluvionales, hábitat de fauna silvestre, y vegetación natural
- calidad estética o paisajística
- accesos para residentes, visitantes, y servicio público o proveedores.

En la práctica, estas metas se superponen frecuentemente.

3.1 Necesidad de sustentabilidad hidrológica

Las laderas pedemontanas poseen problemas que son únicos para la construcción y mantenimiento de asentamientos humanos. Están expuestos a peligros naturales, y topográficamente limitan el diseño de las urbanizaciones. Por esto, los terrenos del pedemonte frecuentemente permanecen sin acciones durante largo tiempo mientras las tierras adyacentes de la planicie se urbanizan.

A pesar de las limitaciones, son lugares atractivos para vivir por las vistas que poseen y por el hecho de estar cerca de la naturaleza. Pero la urbanización excesiva puede disminuir las mismas vistas y deteriorar el hábitat de fauna y flora silvestre que los residentes valoran.

Debido a la variedad de factores geológicos que afectan a la urbanización y a los diferentes objetivos que pueden conducir al gobierno a formular las regulaciones sobre urbanizaciones, no existe un conjunto de regulaciones "mejores" o "modelos" que puedan recomendarse. Desde luego, deben hacerse muchas negociaciones y elecciones cuando se toman decisiones sobre políticas de urbanización. No es suficiente esperar que una ordenanza de otra comunidad pueda resolver todos los problemas ya que se pueden plantear una infinidad de consideraciones como las que siguen:

- ¿La comunidad quiere permitir la construcción de un número grande de unidades habitacionales sin riesgo?
- ¿O se limitaría más bien la urbanización en el pedemonte a una baja densidad de casas de tipo residencial de gran poder adquisitivo?
- ¿Se quiere conservar solamente el aspecto del pedemonte?
- ¿O se quisiera enfatizar más bien el hábitat de fauna silvestre y el ambiente natural?
- ¿Se prefieren caminos más amplios con mayor seguridad o más estrechos que minimicen la perturbación de la pendiente natural?
- ¿Se querría tener más bien una vegetación nativa densa por motivos estéticos y ambientales, o un paisaje irrigado?

La lista podría ser aún más grande.

La regulación del pedemonte generalmente podría tomar uno de los siguientes tres enfoques filosóficos:

- El primer enfoque está en usar técnicas ingenieriles para, virtualmente, eliminar todos los peligros a la seguridad pública. Esto se realiza frecuentemente por medio de la reconstrucción completa de pendientes siguiendo los estándares de ingeniería.
- El segundo enfoque es el de realizar una nivelación selectiva, mejoramientos en el drenaje, y la revegetación a fin de lograr los objetivos públicos de seguridad reteniendo algunos aspectos naturales valiosos del pedemonte.
- El tercer enfoque es prohibir la urbanización del pedemonte por el valor de su recurso natural y a causa de la desconfianza de las soluciones ingenieriles.

La comunidad necesita escoger cuidadosamente entre estos enfoques; ya que permitir la urbanización intensa del pedemonte puede cambiar el carácter de una comunidad. En la práctica, la mayoría de las planificaciones y ordenanzas contienen elementos de estos tres de enfoques. Esto puede ser problemático porque los razonamientos subyacentes en estos enfoques pueden conflictuar a uno con el otro. Muchas comunidades han encontrado que es posible, aunque no fácil, combinar selectivamente partes de los tres enfoques.

Emprendimientos de urbanizaciones han encontrado maneras para acomodar exitosamente accesos y estructuras sin hacer peligrar la estabilidad del lugar, el aspecto visual y los valores ecológicos.

Este informe tiende a que se sea más cuidadoso en el diseño de las ordenanzas y planificaciones del pedemonte, y más explícito en las metas, valores, y negociaciones

inherentes a esas planificaciones y ordenanzas. Hay por lo menos dos acciones para lograr esto:

- La primera es ayudar a los proyectistas para que sean capaces de confeccionar las regulaciones que más cabalmente coincidan con los objetivos de la comunidad.
- La segunda está en presentar a los potenciales urbanizadores regulaciones más consistentes y defendibles.

Dado el criterio que está siendo aplicado para la regulación del uso del suelo por el derecho de propietarios privados, los gobiernos necesitan dar una atención especial a los contenidos de sus ordenanzas y a los diseños de las soluciones para paliar los problemas.

Los estándares, lineamientos y criterios que debieran ser contemplados deben incluir pero no limitarse a lo siguiente:

- protección al público de peligros naturales de escurrimiento pluvial y erosión.
- minimizar la posibilidad y daños consecuentes del fuego en áreas pedemontanas.
- preservar el ambiente, el hábitat natural y el espacio abierto.
- preservar el acceso público a las áreas pedemontanas y canales naturales de drenaje.
- preservar las características topográficas naturales tales como canales, cauces, altas cumbres, vistas, árboles y otras formaciones vegetales naturales.
- asegurar un adecuado sistema de transporte para las áreas de montaña. El diseño del sistema debe considerar densidades y topografía minimizando movimientos de tierra.
- alentar una variedad de urbanizaciones, diseños y conceptos compatibles con el ambiente natural del área de montaña para preservar el paisaje natural.
- establecer criterios de manejo de uso del suelo que sustenten la protección de elementos naturales permitiendo urbanizaciones armoniosas.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y REGLAMENTACIONES

Se realizó una amplia revisión bibliográfica sobre reglamentaciones y códigos de urbanización en pedemonte de la cual se pudo extraer información correspondiente a las siguientes 34 ciudades que figuran en la Tabla 1

Tabla 1

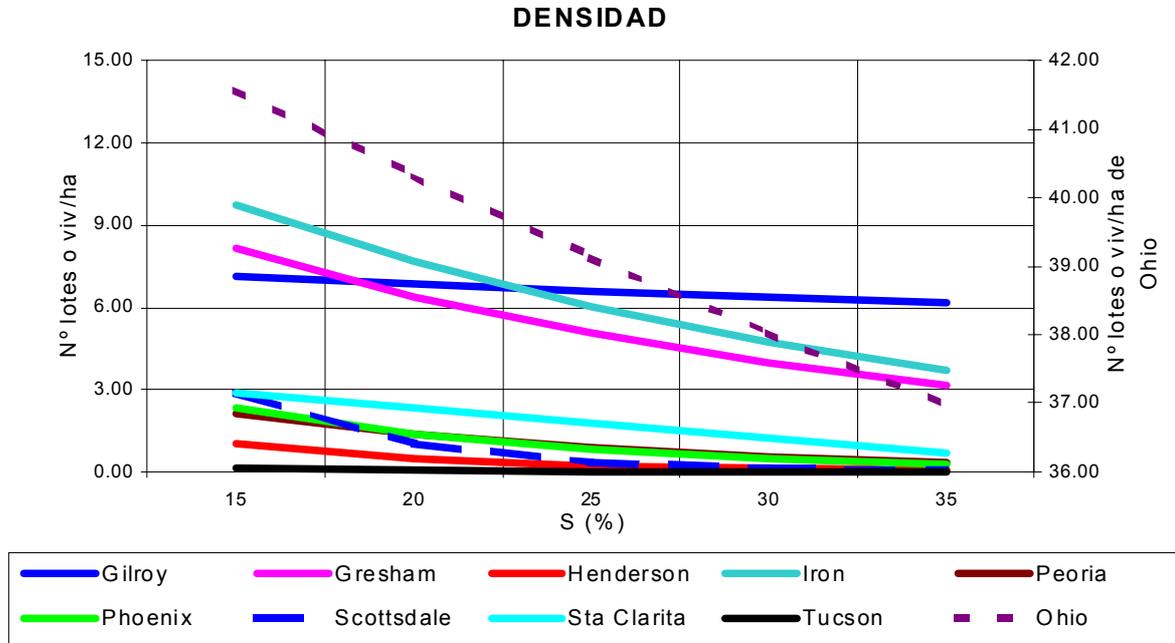
N°	Ciudad	Estado	País
1	Beverly Hills	California	USA
2	Boise	Idaho	USA
3	Bucks	Pennsylvania	USA
4	Clark	Nevada	USA
5	Colorado Spring	Colorado	USA
6	Draper	Utah	USA
7	Folsom	California	USA
8	Gilroy	California	USA
9	Grand Junction	Colorado	USA
10	Greeley	Colorado	USA
11	Gresham	Oregon	USA
12	Hampden	Massachusetts	USA
13	Henderson	Nevada	USA
14	Huntsville	Alabama	USA
15	Iron	Utah	USA
16	Layton	Utah	USA
17	Lolo	Montana	USA
18	Los Gatos	California	USA
19	Loudoun	Virginia	USA
20	Nanaimo	British Columbia	Canada
21	Nashville	Tennessee	USA
22	Newbury	New Hampshire	USA
23	Ohio	Ohio	USA
24	Pacifica	California	USA
25	Peoria	Arizona	USA
26	Phoenix	Arizona	USA
27	Ross	California	USA
28	Salt Lake	Utah	USA
29	San Dimas	California	USA
30	Scottsdale	Arizona	USA
31	Sta Clarita	California	USA
32	Susanville	California	USA
33	Tucson	Arizona	USA
34	Weber	Utah	USA

Tal información se reagrupó en los siguientes aspectos:

- Limitaciones sobre área cubierta y densidad de lotes
- Limitaciones sobre movimientos de tierra (nivelaciones)
- Requerimientos sobre superficies con espacios inalterados (naturales)
- Pautas sobre el desarrollo de calles
- Pautas sobre el drenaje pluvial
- Pautas sobre el diseño arquitectónico

4.1. Limitaciones sobre área cubierta y densidad de lotes

Se han podido resumir las reglamentaciones pertinentes a este aspecto en el siguiente gráfico:



Se puede apreciar en el gráfico que las pendientes consideradas se encuentran entre 15 y 35% ya que pendientes menores al 15% no se consideran conflictivas para el desarrollo urbano y la pendiente del 35% es considerada, por otra parte, como un límite para el emprendimiento de urbanizaciones.

También se puede visualizar que la densidad máxima, en la mayoría de los casos no supera 9 lotes y/o viviendas por hectárea, salvo en el caso del Estado de Ohio donde la permisividad es mucho mayor (eje derecho del gráfico).

4.2. Limitaciones sobre movimientos de tierra (nivelaciones)

$$Volmovtierra(m^3) = \left[\frac{(4 - 10 * S) * 4 + 16.2}{19.06} \right] * Alote(m^2)$$

BEVERLY HILLS

GREELEY

No permite nivelaciones para $S > 25\%$

PHOENIX

Las nivelaciones no deben exceder el 35% del área

TUCSON

$$\text{Densidad máx de nivelación (\%)} = 2702.4 * A_{\text{lote}} (\text{m}^2)^{-0.525}$$

4.3. Requerimientos sobre superficies con espacios inalterados (naturales)

BUCKS

Para $S > 25\%$ el 80% de la superficie debe permanecer como espacio abierto con no más del 20% alterado

$15 < S < 25\%$ Superficie alterada $< 30\%$
 $S > 25\%$ Superficie alterada $< 15\%$

CLARK

S (%)	Máxima alteración (% de urbanización neta)	Area natural (% de urbanización neta inalterada)
12 a 25	50	50
> 25	35	65

Colorado Spring

Regla general: *DESMONTE ES MEJOR QUE TERRAPLÉN Y NINGUNO ES MEJOR QUE CUALQUIERA*

Henderson

$15 < S < 35\%$ Alteración del terreno (%) = $74.5 - 1.7 * S(\%)$

HUNSTVILLE

$S < 20\%$ área alterada = 30% área lote
 $S > 20\%$ área alterada = 20% área lote

LOUDOUN

En áreas altamente sensibles la alteración no debe superar:

- _ 5000 m² en lotes de 5 ha o menos
- _ 10% en lotes de más de 5 ha

En áreas sensibles o moderadamente sensibles la alteración no debe superar:

- _ 1 ha en lotes de 5 ha o menos
- _ 20% en lotes de más de 5 ha

PEORIA

10<S<35% Máxima alteración (%)= $0.37-0.0082*S(\%)$

4.4. Pautas sobre el desarrollo de calles

Boise

Las calles deben diseñarse de manera tal de minimizar la cobertura impermeable y la perturbación del suelo.

Las calles deben seguir los contornos naturales.

Draper

Pendiente máxima de calles=12%

Pendiente máxima de calles en intersecciones=5%

Las calles deben seguir los contornos naturales.

La cantidad máxima de superficie impermeable de calle debe ser el 20% de la urbanización total.

Folsom

Las calles deben generalmente seguir los contornos naturales del terreno y no deben ser perpendiculares a las curvas de nivel, a menos que sea absolutamente inevitable. Deben preferirse calles curvas.

Gilroy

Las calles deben seguir los contornos naturales del pedemonte para minimizar desmontes y terraplenes.

Grand Junction

Pendiente máxima de calles=30%

Greeley

Pendiente máxima de calles=5%

Huntsville

La alineación de calles debe seguir al terreno natural cuando sea posible.

Iron

Pendiente máxima de calles=12%

La máxima cantidad de superficie impermeable por calles debe ser el 20% de la urbanización total

Los Gatos

Las calles deben alinearse, lo más cerca posible, a las pendientes existentes, minimizando la necesidad de nivelaciones.

No deben alterar mayormente el carácter físico y visual del pedemonte.

Loudoun

Las calles no deben cruzar pendientes mayores de 50%.

Las pendientes máximas de calles < 25%

Se permite que un tramo de 30 m o 10% de la longitud completa de la calle pueda estar en pendientes entre 25 y 50%.

Nanaimo

Alinear calles para conformar la topografía natural.

4.5. Pautas sobre el drenaje pluvial

Boise

Los caudales de un sitio urbanizado no deben exceder a los caudales del sitio en su condición natural anterior a la urbanización.

Draper

Los dispositivos de drenaje para retener deben diseñarse para el escurrimiento máximo generado por la tormenta de TR=10 años, y la descarga no debe exceder 5 l/s/Ha.

Los dispositivos de retardo de escurrimiento, tales como embalses de detención, deben usarse donde sea necesario minimizar el incremento de volumen y caudal pico debido a la urbanización.

Gresham

Todos los escurrimientos privados que descargan a un cauce natural deben utilizar sistemas de infiltración lo más extendido posible.

Hampden

Todo el escurrimiento generado por superficies impermeables debe ser recargado a través de cuencos de infiltración cubiertos con vegetación natural. Los cuencos de infiltración deben diseñarse para la tormenta de TR=25 años.

Los pozos secos deben utilizarse cuando los otros métodos son impracticables y deben estar precedidos de trampas para aceites, grasa y sedimentos para facilitar la remoción de la contaminación.

Lolo

Todo escurrimiento superficial adicional al normalmente presente antes de la urbanización debe retenerse en el sitio o erogarse desde el sitio de manera tal que no incremente el pico de escurrimiento generado antes de la urbanización.

Los Gatos

Los cursos de drenaje natural deben preservarse lo más posible y los dispositivos de drenaje deben incorporarse como una parte integral del diseño del proyecto para realizar el aspecto estético y natural de la urbanización.

Ross

Las residencias y estructuras accesorias no deben atravesar, encauzar o impedir un cauce natural.

Toda nueva urbanización debe proveer la mejora de drenaje necesaria para mitigar el escurrimiento creado por la perturbación de la cuenca.

Scottsdale

Todo escurrimiento debe ser dirigido hacia cauces naturales usando prácticas de control de erosión.

4.6. Pautas sobre el diseño arquitectónico

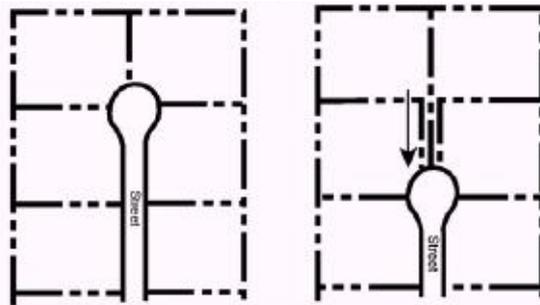
Folsom

El diseño arquitectónico de las viviendas, los materiales de construcción y los colores de pintura, deben proveer una suave transición entre las viviendas y los alrededores.

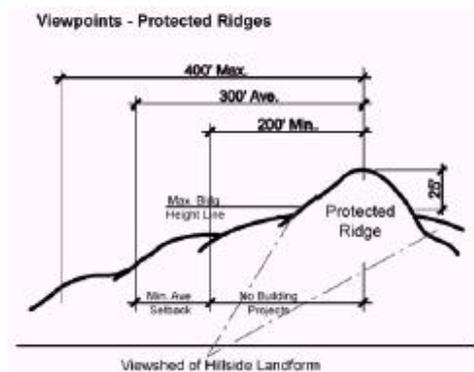
Scottsdale

Los proyectos de urbanización deben emplear técnicas que reducen el impacto en las superficies, disminuyen la cantidad de calles y pavimentos, maximizan el espacio abierto y minimiza la reestructuración del sistema de drenaje natural.

Todo proyecto debe ubicarse en promedio a 90 m horizontalmente desde una cumbre.



Reducción de longitud de calles



Resguardo de visual de las cumbres

5. ESTUDIO EN EL PEDEMONTE DEL GRAN MENDOZA

5.1 Introducción

La implementación de la metodología se ha llevado a cabo en un sector del pedemonte del Gran Mendoza donde una empresa inmobiliaria ha propuesto una urbanización (Figuras 1 y 2). Tal sector está limitado al Norte con el barrio denominado La Estanzuela, al Oeste y al Sur con otras cuencas del pedemonte y al Este con el Corredor del Oeste.

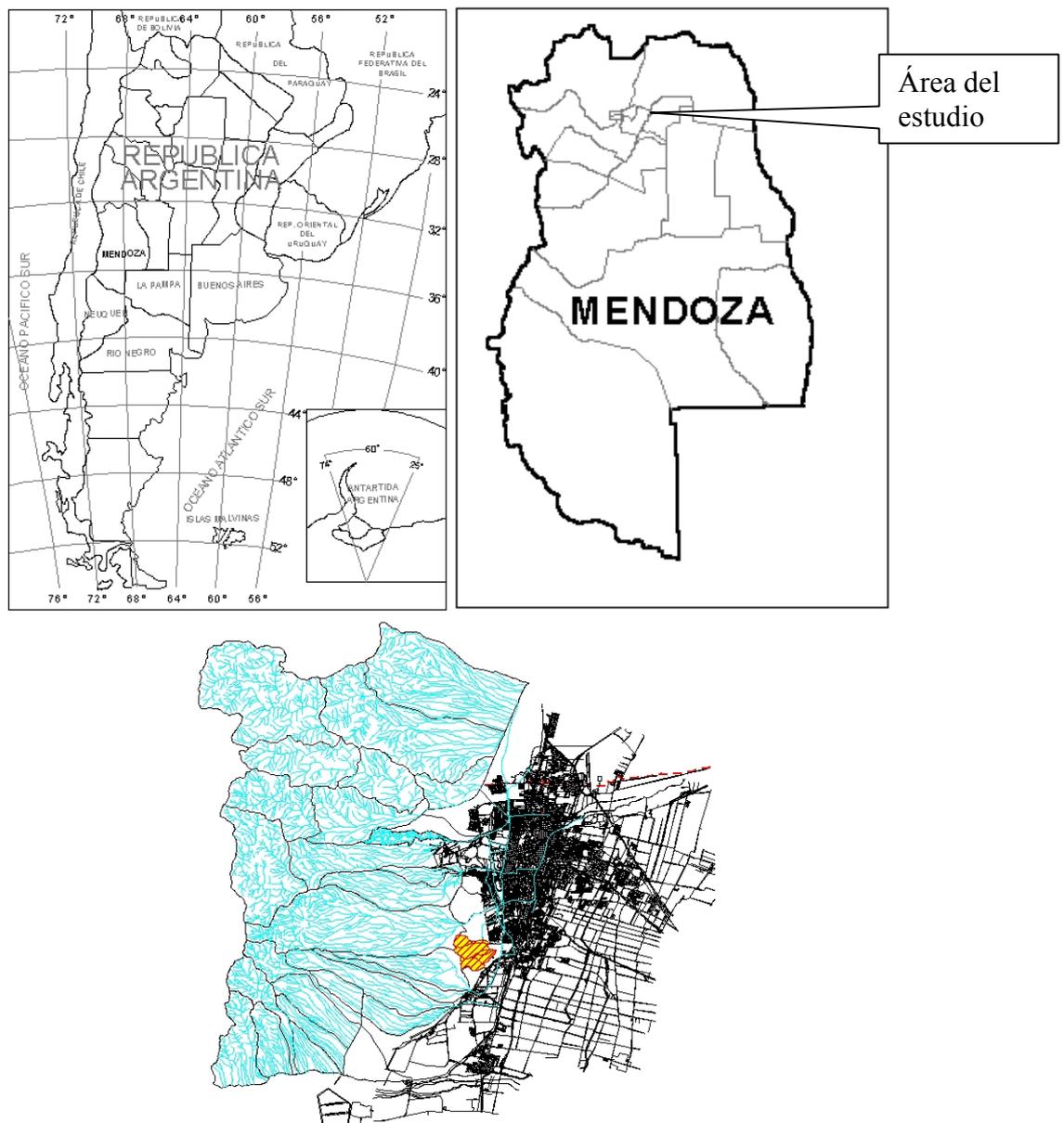


Figura 1. Ubicación relativa

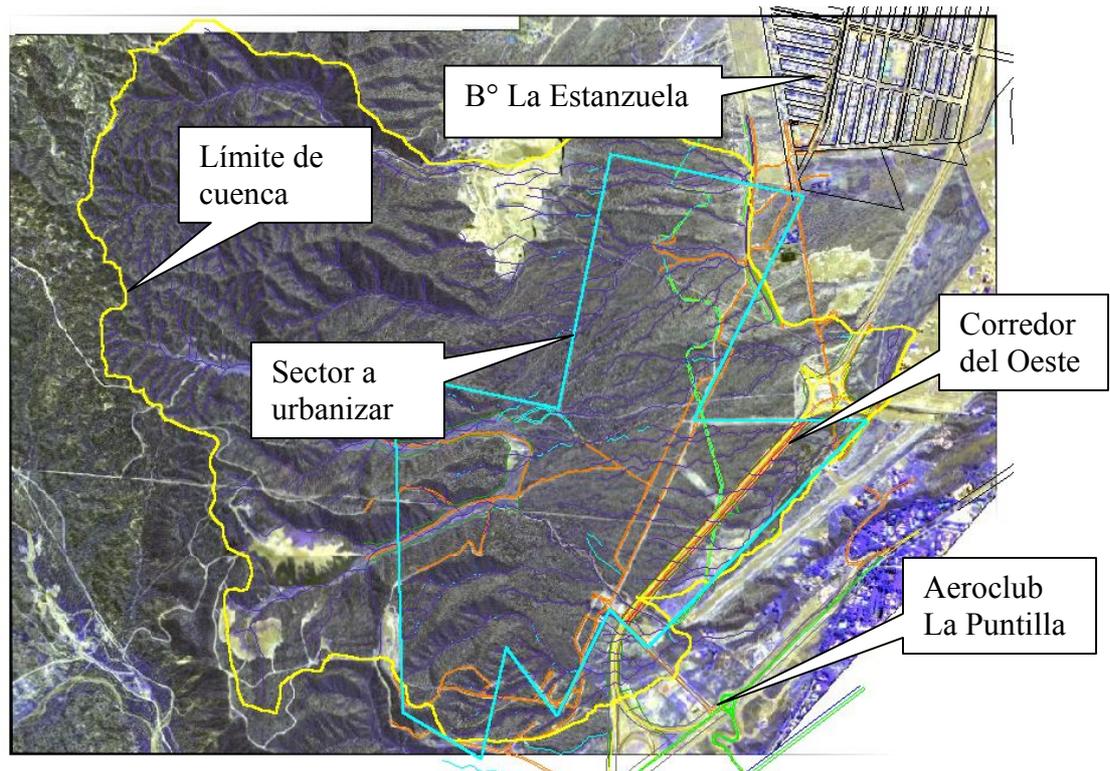


Figura 2. Ubicación relativa con cuenca de estudio y límites de urbanización. (Lámina 1)

La metodología se desarrolló, en líneas generales, con el objetivo de encontrar una tipología urbanística de bajo impacto hidrológico, es decir cuyos escurrimientos sean iguales o menores a los que se generan en la cuenca en su estado natural. Para ello se generaron y analizaron los siguientes escenarios:

- Escenario N° 1: cuencas en estado natural
- Escenario N° 2: urbanización de tipo no convencional (de bajo impacto hidrológico)
- Escenario N° 3: urbanización de tipo convencional (de alto impacto hidrológico)
- Escenario N° 4: es el Escenario 2 con restricciones de cantidad de lotes
- Escenario N° 5: es el Escenario 2 con restricciones de cantidad de lotes y embalses de detención

5.2 Implementación del S.I.G y M.D.E.

En cuencas no aforadas, la determinación de los recursos hídricos y de las avenidas máximas ha de basarse en las características propias de las mismas, como su geomorfología, tipos de suelos, usos y aprovechamientos, etc., y en las variables meteorológicas que las afectan, como la precipitación y la evapotranspiración. El tratamiento de las cuencas no aforadas a partir de los datos mencionados ofrece una nueva dimensión con la aparición comercial de sistemas de adquisición de datos mediante sensores remotos y de Sistemas de Información Geográfica (SIG) potentes. Los primeros facilitan la adquisición de la información de la zona de estudio, mientras que los segundos ofrecen grandes posibilidades en el manejo de dicha información y

en la simulación de los procesos hidrológicos mediante modelos (Maidment, 1996; Leipnik, 1993).

La cartografía temática de cobertura y ocupación de la tierra con información espacial actualizada se ha integrado en ambiente S.I.G. a otras capas de información tales como red hidrográfica y subcuencas hídricas, infraestructura vial y férrea, límites político-administrativos e información topográfica, requeridas para modelado espacial y como base para estudios hidrológicos multi-escenarios de manera de calificar y comparar la incidencia hidrológica de dos metodologías de urbanización. Se ha integrado información vectorial y raster utilizando los sistemas Woditem (Univ. de Padova) y ArcView Gis® con sus extensiones Spatial Analyst®, 3D Analyst® e Image Analysis ®

Mediante la digitalización de curvas de nivel (Figura 3) del relevamiento aerofotogramétrico realizado por la Dirección Provincial de Catastro en el año 1970 de todo el pedemonte mendocino con una equidistancia de 5m en escala 1:5000 y las proporcionadas por una digitalización de una restitución fotogramétrica del año 1999 con equidistancia de 1m a escala 1:2500, se logró confeccionar el modelo digital de elevaciones del área de estudio (Figura 4).

- Modelo Digital de Elevaciones

El modelo digital de elevaciones (M.D.E.) se preparó a partir de los puntos con coordenadas x,y,z tomados de las curvas de nivel digitalizadas. En total se utilizó para la interpolación cerca de 200.000 puntos y se generó con el variograma de Krigging una grilla de 700 filas por 700 columnas con celdas de 5x5m. Se realizó un análisis de los residuos generados que fueron reducidos al ir ajustando el variograma de interpolación hasta lograr residuos aceptables (Figura 5). Por último se compararon las curvas de nivel cada 5m del M.D.E. con las curvas originales digitalizadas observando una muy alta adyacencia.

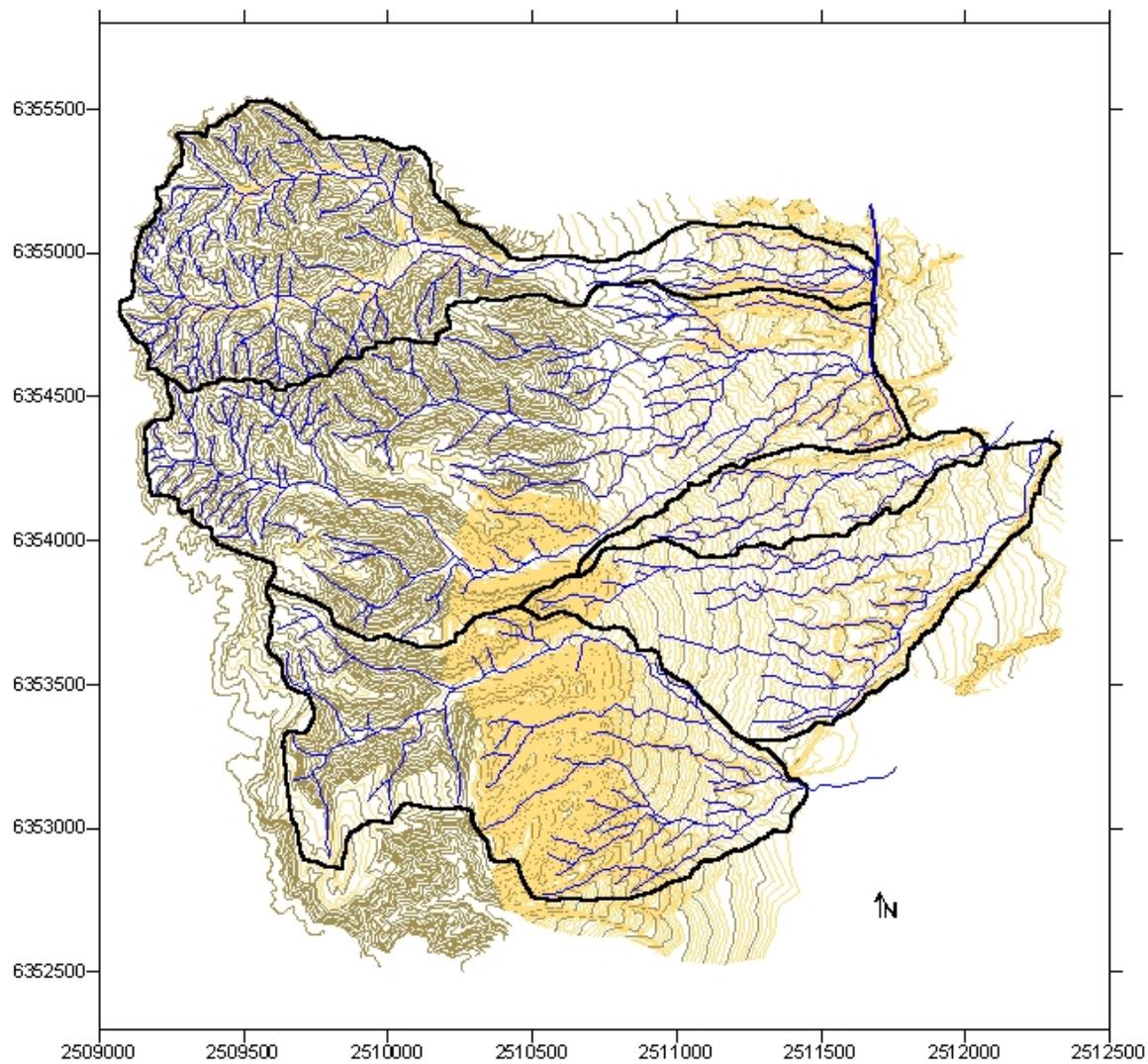


Figura 3. Mapa de curvas de nivel digitalizadas.

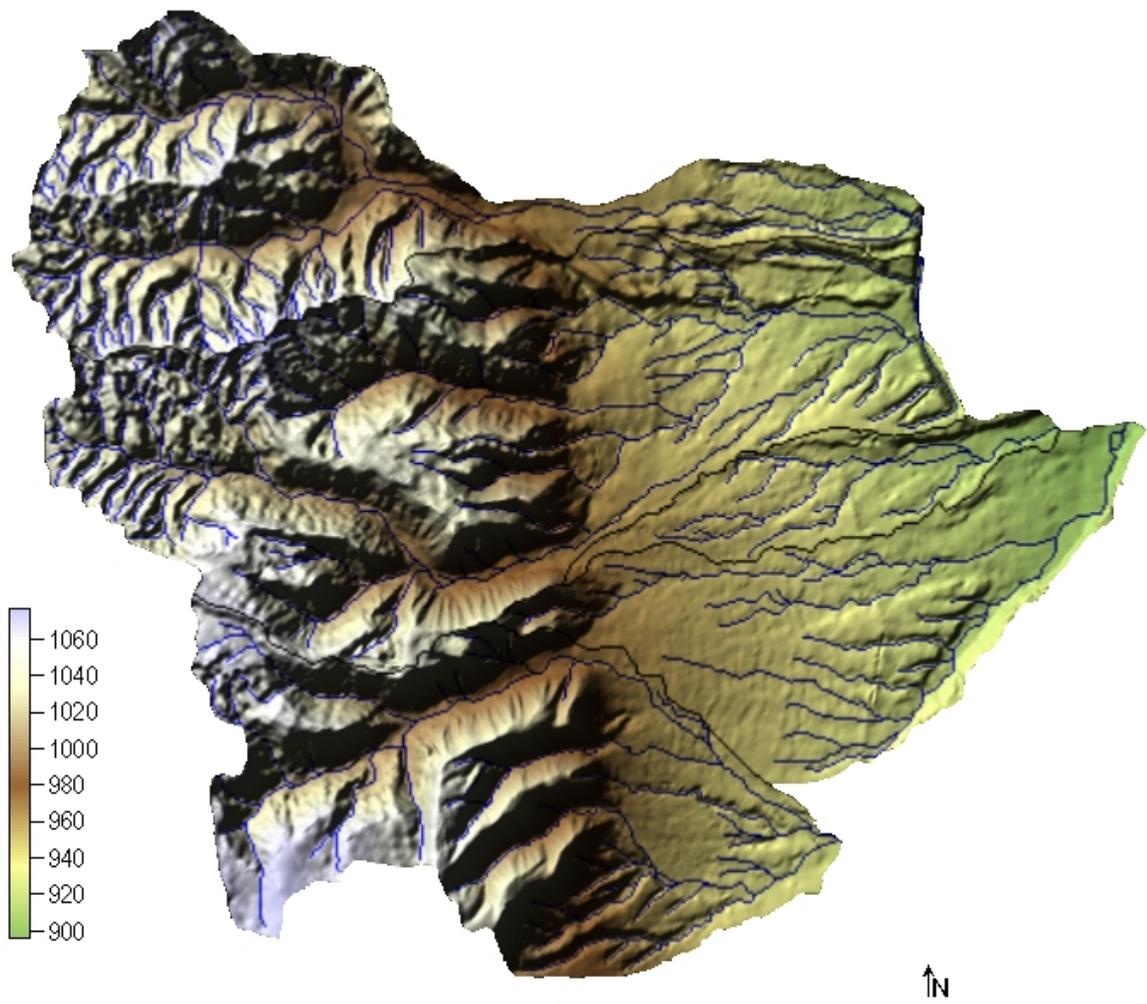


Figura 4. Modelo Digital de Elevaciones (DEM) (Lámina 2)

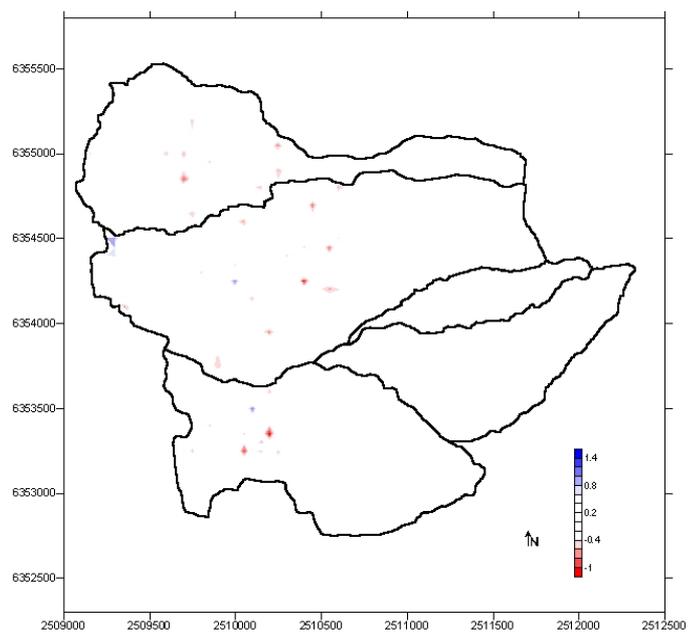


Figura 5. Mapa de residuos del M.D.E.

Toda la información se almacenó en un SIG, el cual permitió realizar análisis geomorfométricos tales como pendientes, longitudes y jerarquía de cauces, perímetros, diferencias de altura, etc, de forma de confeccionar la tabla de parámetros morfométricos de cada cuenca.

5.3 Descripción y estudios en cada escenarios

5.3.1 Escenario N° 1

El área total de la cuenca de estudio tiene 5,43 km² y a partir de las curvas de nivel se delimitó manualmente las subcuencas, resultando en una división de 5 subcuencas que oscilan entre los 0,3 km² y 2km² (Figura 6).

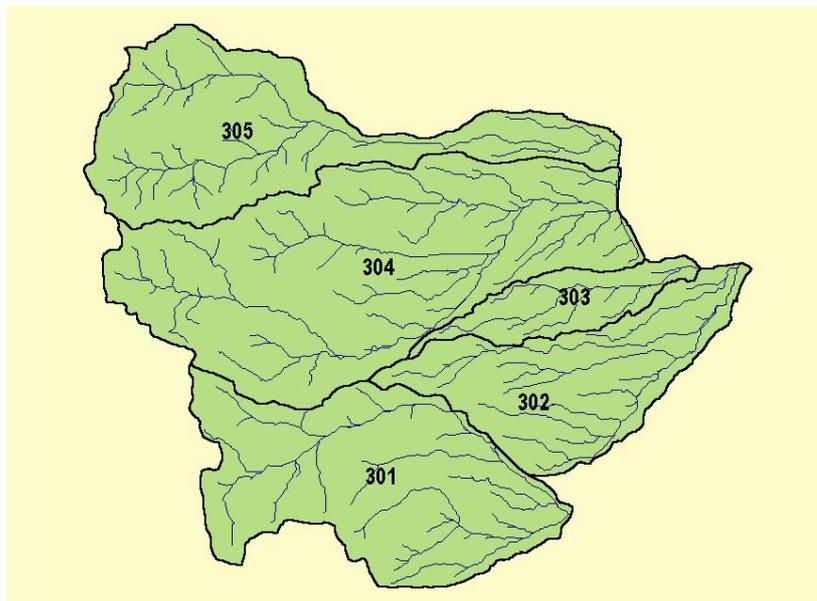


Figura 6. Mapa de Cuencas Rurales

La confección de un Sistema de Información Geográfica (SIG en adelante) permitió la administración y gestión de la información procesada como así también el análisis de los datos espacialmente referenciados. El primer resultado de análisis fue el de los parámetros morfométricos de las cuencas en estado natural (Tabla 2) que fueron datos de entrada a los modelos hidrológicos.

Tabla 2. Parámetros morfométricos del Escenario N°1

Sub cuenca	Area [Km ²]	Perim. [m]	Long. Cauce [m]	cota max cauce [m]	cota min cauce [m]	cota max cuenca	cota min cuenca	ΔH [m]	Pend. cauce [m/m]
301	1.263	5753	2449	1070	928	1078	928	142	0.058
302	0.808	4881	2159	1010	896	1035	896	114	0.053
303	0.287	3431	1443	962	903	995	903	59	0.041
304	1.935	7046	3310	1045	911	1075	911	134	0.040
305	1.130	6827	2987	1040	911	1075	911	129	0.043
Total	5.424								

Otra de las determinaciones realizadas fue el de derivar el mapa de elevaciones en un mapa de pendientes (Figura 7), el cual se utilizó para restringir zonas de loteos.

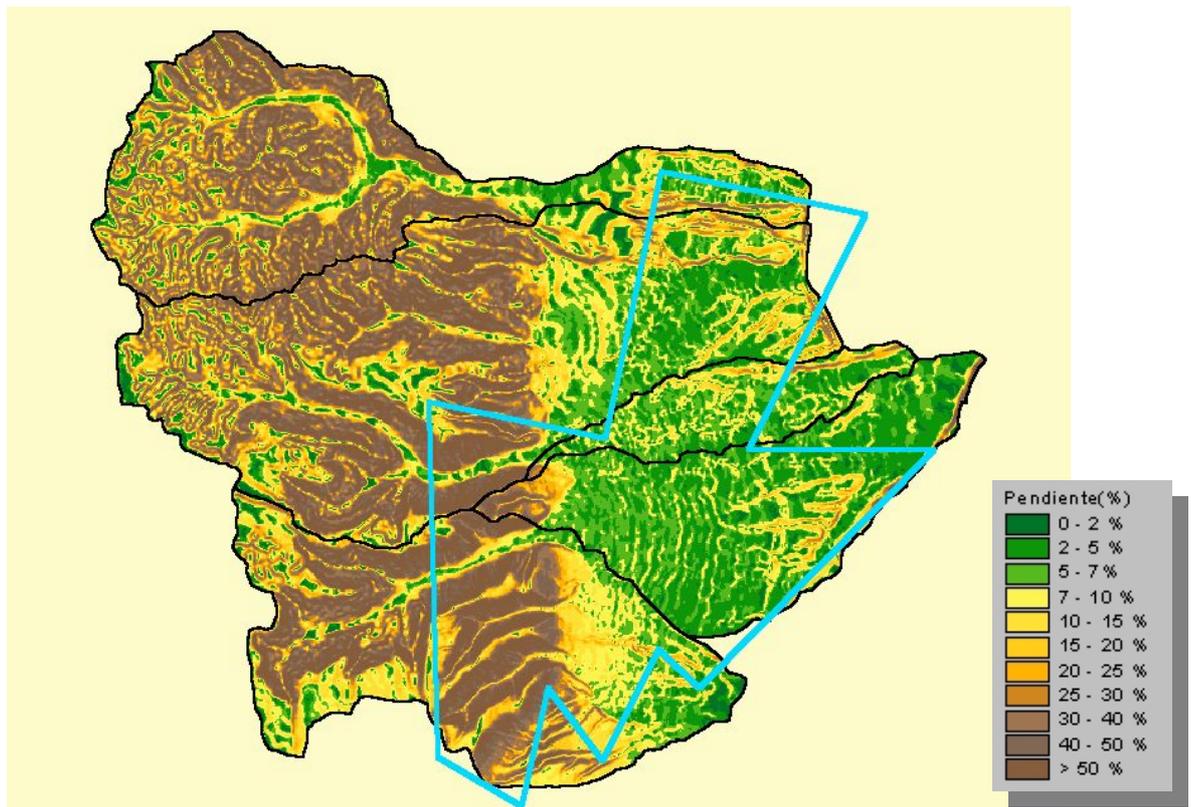


Figura 7. Mapa de Pendientes y límite de loteo (Lámina 3)

También fue de interés el conocimiento de la hipsometría de la cuenca y por medio de un análisis de las áreas entre bandas altitudinales se logró confeccionar la curva hipsométrica (Figura 8) que muestra la potencialidad erosiva debido a la forma de distribución de sus pendientes, que comparada con curvas patrones límite nos indica que estamos en presencia de una cuenca entre joven y madura con un grado de erosión medio.

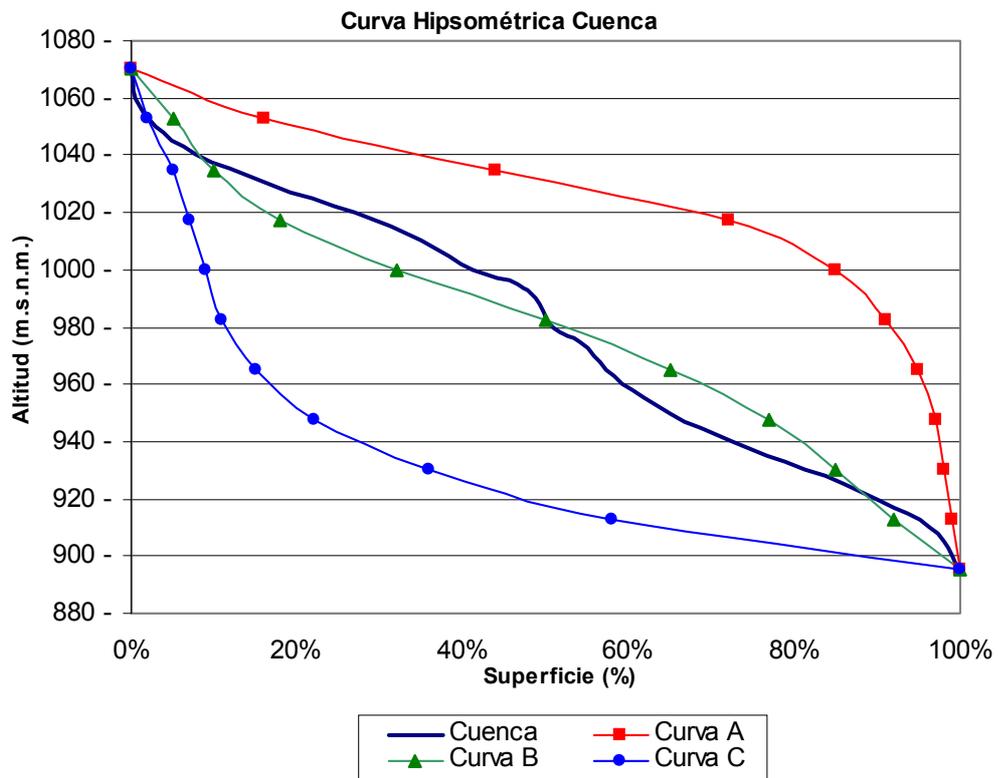


Figura 8. Curva hipsométrica de la cuenca de estudio

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. Quedarían, así, representadas distintas fases de la vida de los ríos:

- curva A: fase de juventud
- curva B: fase de madurez
- curva C: fase de vejez

5.3.1. 1.Red de drenaje

La hidrografía fue digitalizada en una primera instancia para luego ser corroborada por medios automáticos y con un análisis geomorfológico se compararon los dos métodos. En la Figura 9 se aprecia la alta adyacencia de los cursos obtenidos automáticamente mediante modelación hidrológica con HEC GeoHMS, representados en color azul, con respecto a los digitalizados en color rojo.

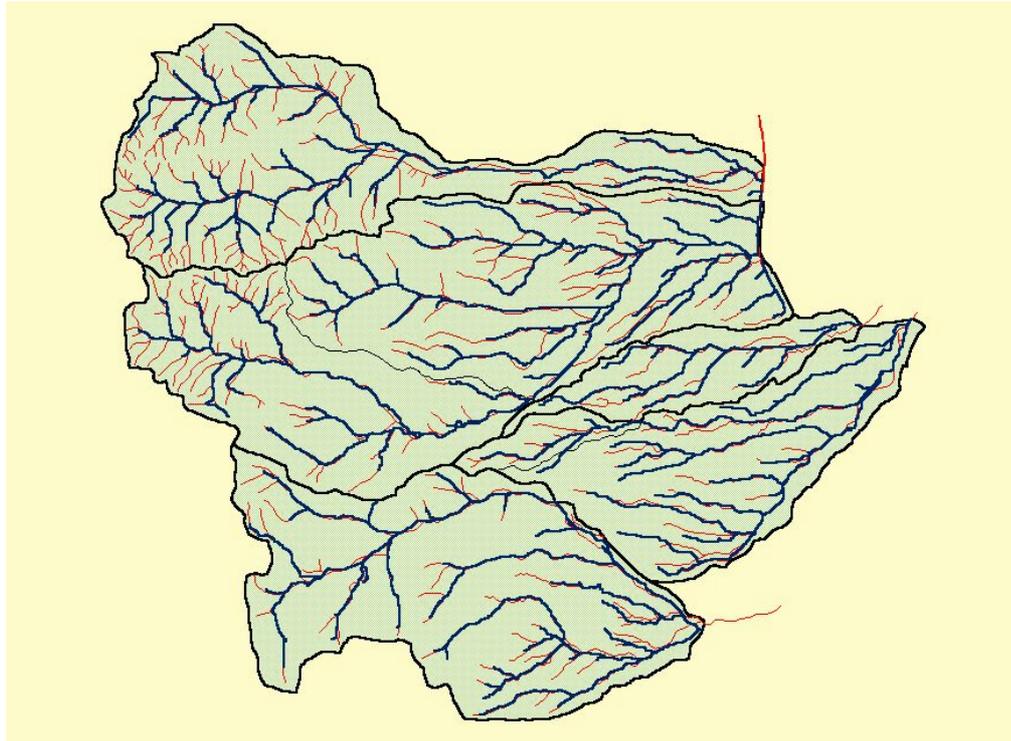


Figura 9. Diferencia entre Cauces digitalizados vs automáticos

Se realizó una comparación de parámetros geomorfológicos como órdenes de Horton, densidad de drenaje (Dd), frecuencia de canales, etc., de manera de validar el método automático de obtención de red hidrográfica (Tabla 3) (Figura 10).

Tabla 3. Tabulación cruzada entre subcuencas y cantidad y distancias de cauces según órdenes de Horton para red sintética y red digitalizada.

	Orden Horton	301		302		303		304		305	
		Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]	Cant.	Dist. cauces [m]
Red digitalizada	1	45	6686	22	4414	8	2165	104	13796	100	8633
	2	15	3218	6	2131	2	591	31	4259	34	4414
	3	4	2832	4	1073	1	742	10	3965	8	789
	4	1	437	1	464			3	2186	2	2493
	5							2	297	1	1324
	$\Sigma=$	65	13173	33	8082	11	3498	150	24504	145	17653
Red sintética	1	38	4880	22	4457	7	1549	53	9110	47	5325
	2	16	3710	11	3685	2	419	29	4797	11	1053
	3	19	2363	9	1206	5	691	7	1334	24	1908
	4	1	37					14	2085	7	1747
	$\Sigma=$	74	10990	42	9349	14	2659	103	17327	89	10034

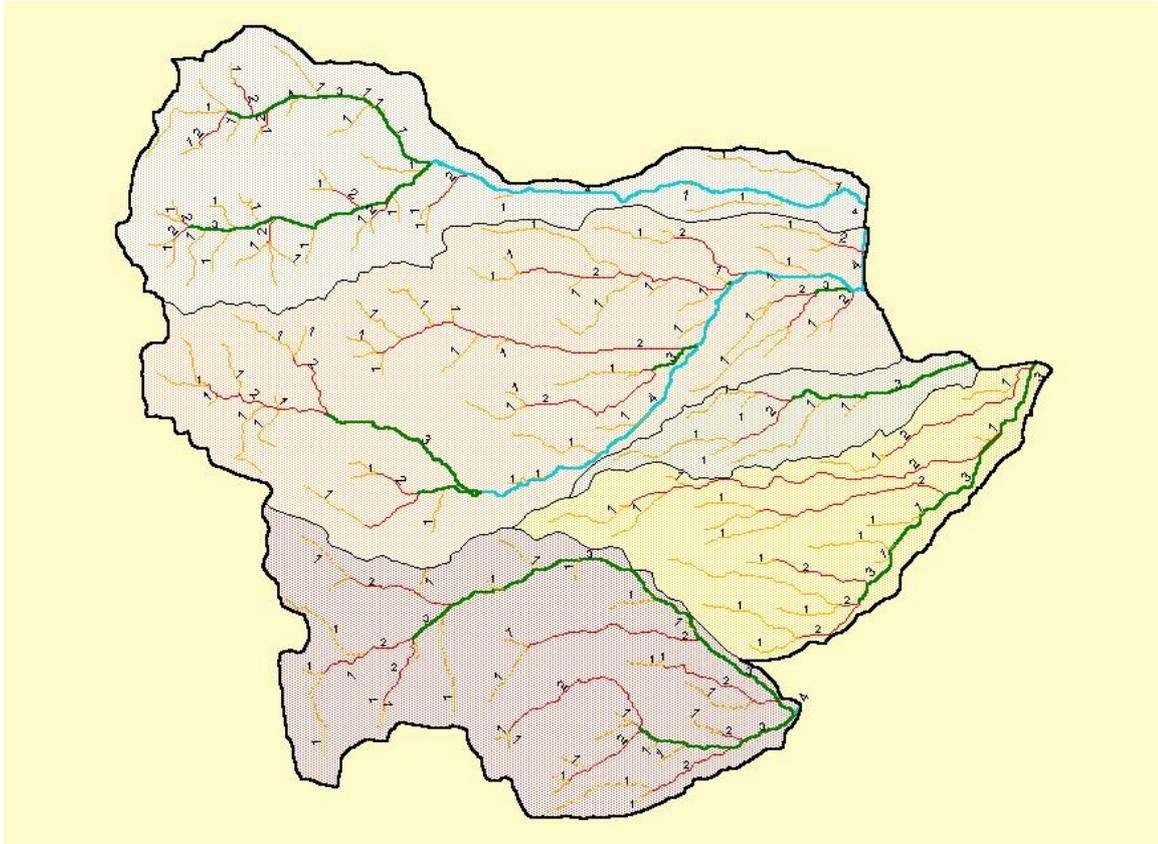


Figura 10. Jerarquización de cauces. Ordenes de Horton

La longitud de canales por unidad de área de la cuenca, definida por Horton (1932) como la relación entre longitud total de los cauces (L_c) y el área de la cuenca (A):

$$D = \frac{L_c}{A}$$

refleja la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red drenaje y el tipo de respuesta ante un evento de precipitación, por lo que condiciona la forma del hidrograma (Tabla 4). A mayor densidad de drenaje es más dominante el flujo en cauce que en ladera que se traduce en menores tiempos de concentración.

La frecuencia de canales (F) refleja en alguna medida, la actividad erosiva de las cuencas y queda representado por el número de cauces con respecto al área de la cuenca.

Tabla 4. Planilla de densidad de drenaje y frecuencia

	Red digitalizada						Red sintética				
	Area [Km ²]	Cant. de cauces	Dist. Total de cauces [m]	Lc km	Dd1 [Km/Km ²]	F	Cant. de cauces	Dist. Total de cauces [m]	Lc km	Dd2 [Km/Km ²]	F
Cuenca 301	1.263	65	13173	13.17	10.43	51.47	74	10990	10.99	8.70	58.59
Cuenca 302	0.808	33	8082	8.08	10.00	40.82	42	9349	9.35	11.56	51.95
Cuenca 303	0.287	11	3498	3.50	12.19	38.33	14	2659	2.66	9.27	48.79
Cuenca 304	1.935	150	24504	24.50	12.66	77.51	103	17327	17.33	8.95	53.23
Cuenca 305	1.130	145	15253	15.25	13.49	128.27	89	10034	10.03	8.88	78.73

Nota: Lc1, tomada con red sintética de drenaje (GeoHMS), y Lc2 con red de drenaje digitalizada

Según la clasificación de Smith (1950) y Stralher (1957) todas las cuencas en ambas situaciones se presentan con una red de drenaje fina ($Dd > 13.7 \text{ km/km}^2$), típica de regiones con suelos muy erodables, poco permeables y con lluvias de alta intensidad.

5.3.1.2. Hidrología

A) Determinación del CN (metodología del U.S. Soil Conservation Service)

Se ha planteado la generación de modelados cartográficos para la determinación de parámetros hidrológicos tales como el Número de Curva (CN), aplicando álgebra de mapas y reclasificaciones digitales a los mapas de cobertura vegetal y grupos hidrológicos de suelos, M.D.E. y mapas derivados de pendientes y aspectos. Esta información es requerida para la posterior modelación hidrológica integrando sistemas de información geográfica, interfaces geoespaciales y modelos hidrológicos.

La determinación del número de curva (CN) de cada escenario se llevó a cabo de forma distribuida utilizando una tabla de clasificación. El cruzamiento de los mapas de cobertura vegetal (en analogía al uso del suelo) y el del tipo hidrológico de suelos se llevó a cabo dentro del SIG.

Por medio de la interpretación de una imagen Ikono del año 2001 (Figura 11), se pudo obtener el estado actual o uso del suelo de la cuenca, por medio de la cobertura vegetal. Se detectaron tres clases de cobertura vegetal (monte natural de poca y media cobertura herbácea y suelos desnudos o zonas de alta impermeabilidad).

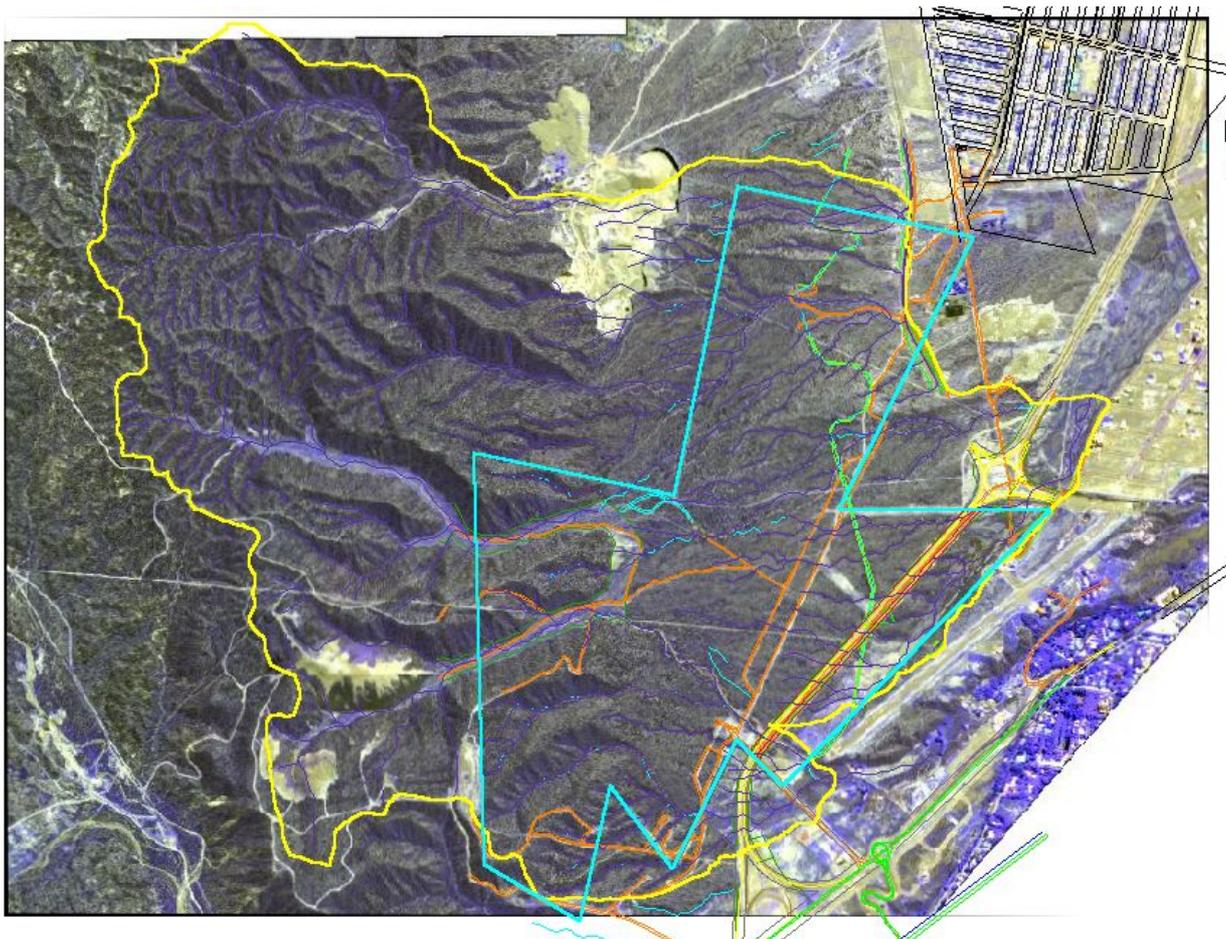


Figura 11. Imagen IKONO

El procesamiento digital de la imagen satelital se llevó a cabo dentro del mismo SIG, con la extensión Image Analysis del paquete ArcView GIS ®. Luego de rectificar la imagen se obtuvo una clasificación no supervisada de tres categorías utilizando como máscara el borde de cuenca.

El resultado obtenido fue un mapa de cobertura vegetal (Figura 12) utilizado como uso de suelo para el cálculo del CN distribuido.

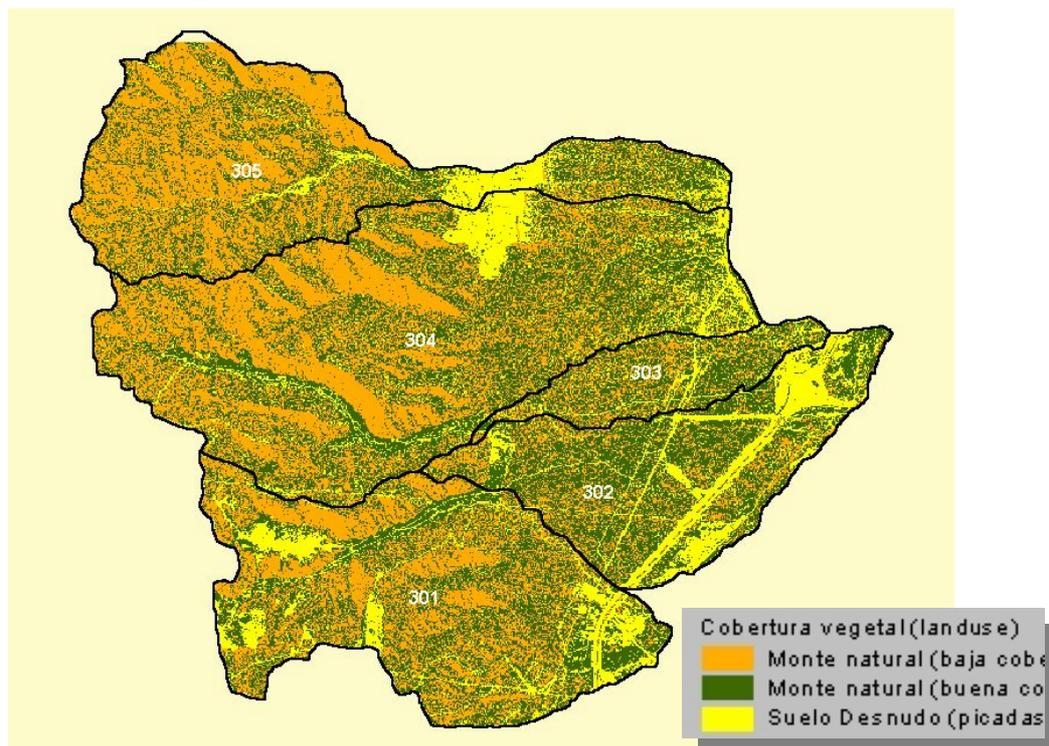


Figura 12. Mapa de cobertura vegetal

El mapa de clasificación hidrológica de suelos se llevó a cabo por medio de un cruzamiento espacial entre los mapas de pendientes, red hidrográfica y tipo de suelo respetando la siguiente tabla:

Tabla 5. Grupos hidrológico de suelo (de USDA-SCS, 1964)

Grupo hidrológico del suelo	Potencial de escorrentía	Infiltración cuando la tierra está húmeda	Suelos típicos
A	Escaso	Alta	Arenas y grava excesivamente drenadas
B	Moderado	Moderada	Texturas medias
C	Medio	Lenta	Textura fina o suelos con una capa que impide el drenaje hacia abajo
D	Elevado	Muy lenta	Suelos de arcillas hinchadas o compactas o suelos poco profundos sobre capas impermeables

El resultado obtenido se muestra en la Figura 13.

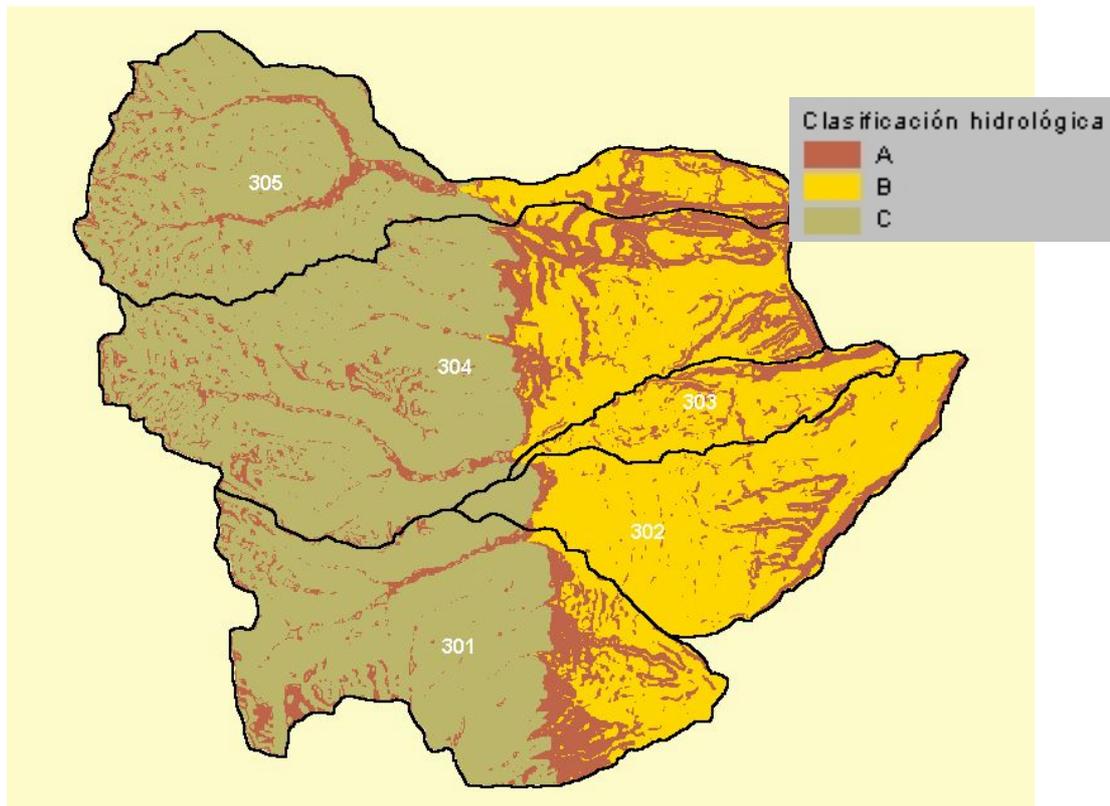


Figura 13. Mapa de Clasificación hidrológica de suelos.

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

Tabla 6. Código de Clasificación para el cálculo del CN

Código	Cobertura Vegetal	CN			
		Clasificación Hidrológica de Suelos (SCS)			
		A	B	C	D
1000	Externo	0	0	0	0
2000	Monte Natural (1) (20% de cob. vegetal)	66	76	83	87
3000	Monte Natural (2) (60% de cob. vegetal)	49	68	78	82
4000	Suelo Desnudo (Picadas, urbanizac.)	72	82	87	90

(1): *Estepa arbustiva con bajo nivel de cobertura vegetal*

(2): *Estepa arbustiva con cobertura herbacea media*

Las operaciones realizadas para determinar el CN se podrían representar y explicar mediante el diagrama de flujo de la Figura 14.

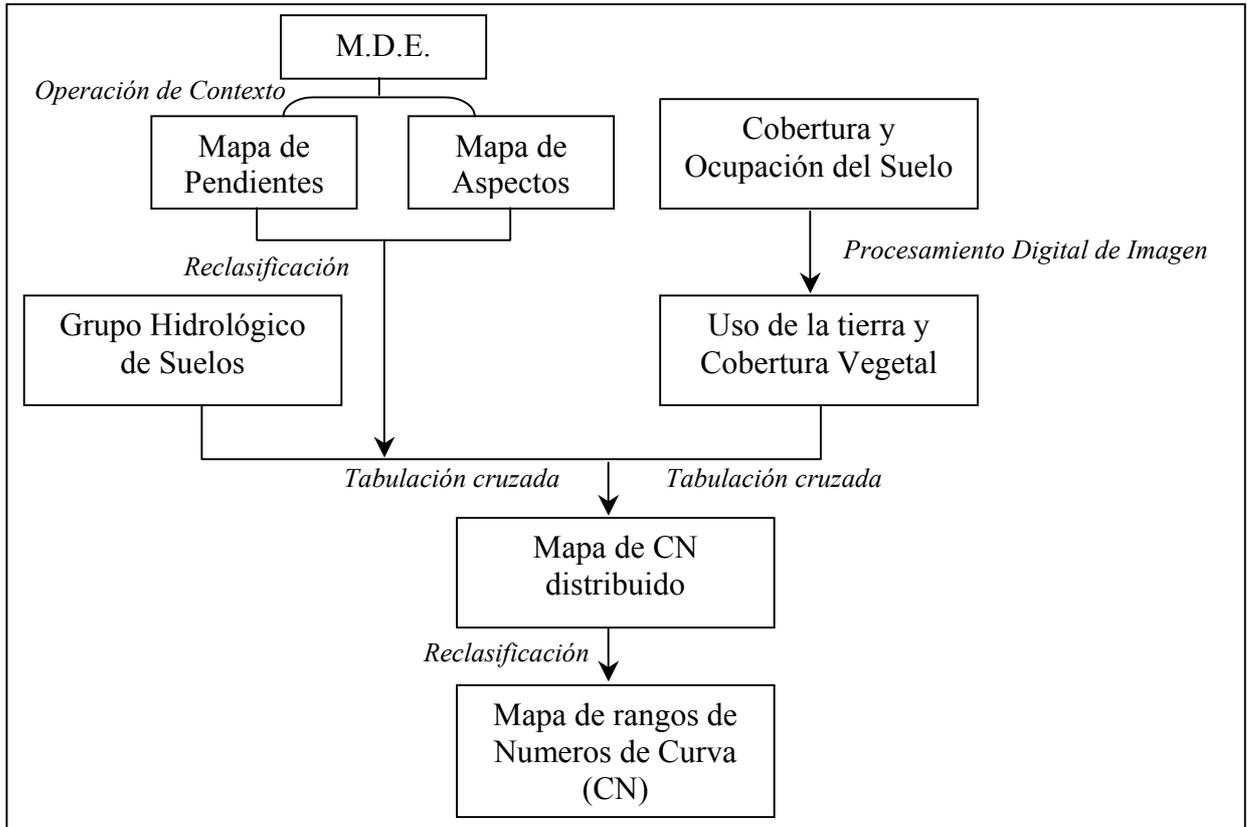


Figura 14. Modelo cartográfico aplicando álgebra de mapas y reclasificación para cálculo de CN

El mapa de valores distribuido de CN se muestra en Figura 15 y los valores medios por cuenca en la Tabla 7.

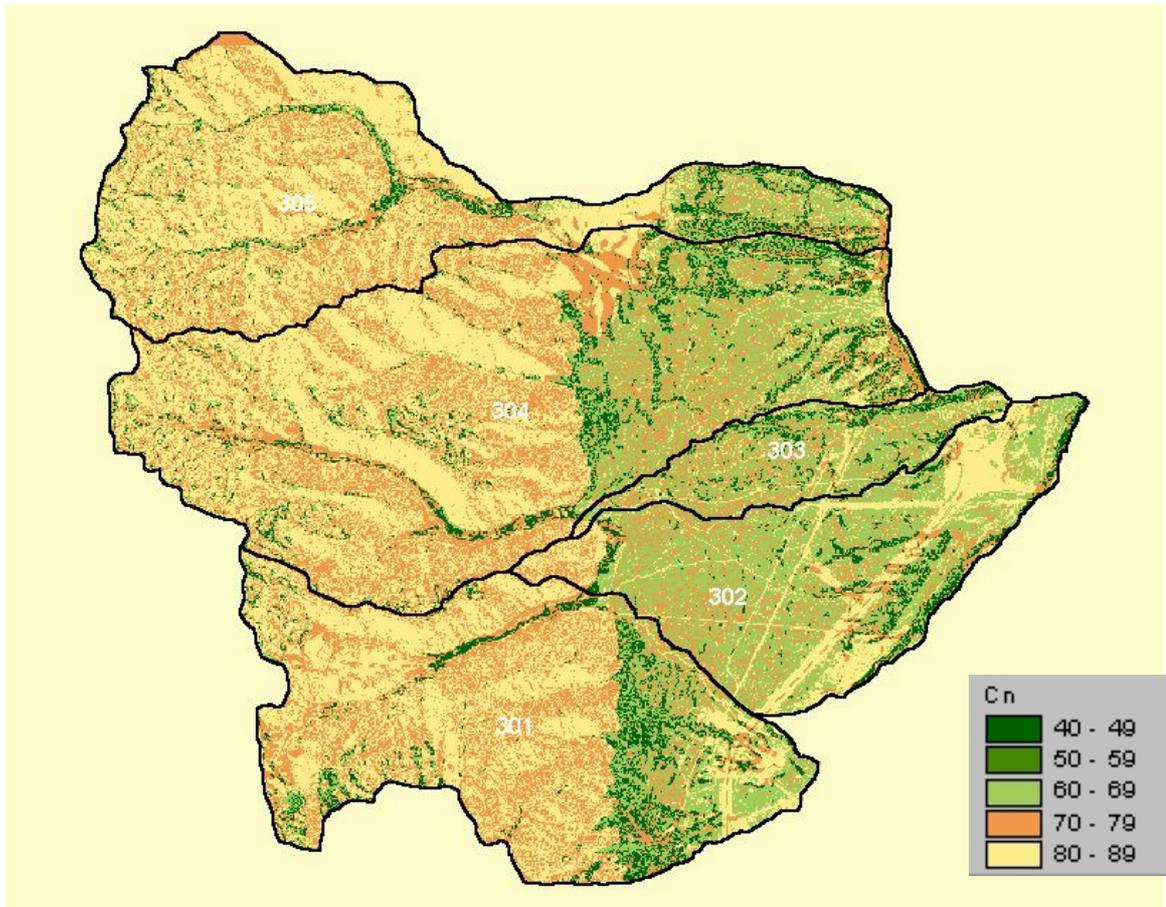


Figura 15. Mapa de CN distribuido (Lámina 4)

Tabla 7. Valores de CN medios por cuenca

Sub cuenca	Area [Km ²]	CN
301	1.263	76.0
302	0.808	71.8
303	0.287	69.7
304	1.935	75.6
305	1.130	77.5
Total	5.424	75.2

Se utilizó una imagen aérea de la zona del año 1978 (Figura 16), en la cual, una vez georreferenciada y ajustada, se interpretaron geomorfologías originales y el estado anterior de la cuenca.

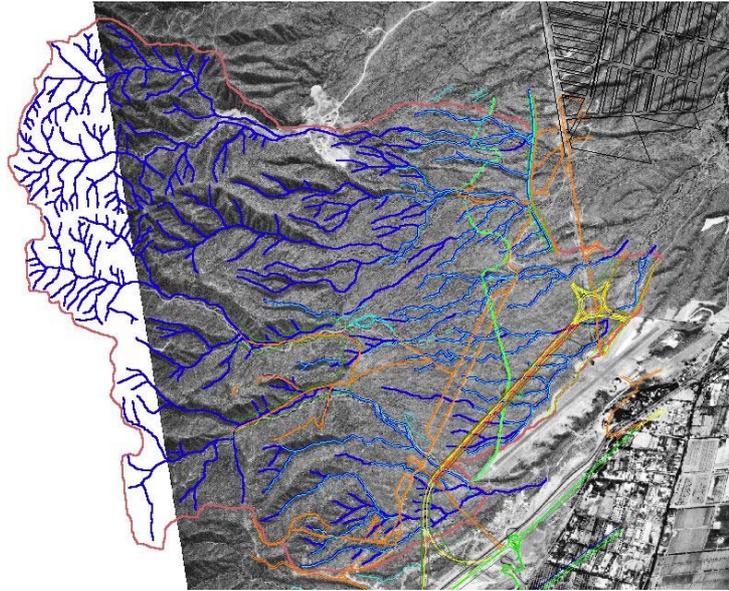


Figura 16. Foto Aérea

B) Tormenta de Diseño

Se aplicó para el modelado hidrológico la tormenta de diseño para Mendoza, desarrollada por el Instituto Nacional del Agua-Centro Regional Andino, (INA-CRA), para los tiempos de recurrencia 2, 5 y 10 años (Apéndice II).

Las láminas de precipitación, sin decaimiento areal, utilizadas en todas las modelaciones hidrológicas fueron las siguientes:

Tabla 8. Láminas de precipitación

Duracion [min]	LAMINA (mm)		
	TR2	TR 5	TR 10
5	1.8	2.5	2.9
10	1.0	1.4	1.7
15	3.7	5.2	6.1
20	6.6	9.2	10.8
25	9.0	12.5	14.7
30	12.4	17.3	20.2
35	5.1	7.1	8.4
40	2.4	3.3	3.9
45	0.7	1	1.1
50	0.2	0.3	0.4
55	0.0	0.1	0.1
60	0.0	0.1	0.1
$\Sigma=$	43.0	60.0	70.4

C) Modelación con HEC GeoHMS

Una vez introducidos los mapas temáticos dentro del SIG, con la extensión del HEC GeoHMS se procedió a realizar el preprocesamiento del terreno consistente en el llenado de vacíos, dirección de flujo, hidrografía y delimitación automática de subcuencas, caracterización morfométrica y topología.

El llenado de vacíos se realiza para que la cuenca tenga continuidad y salida única sin zonas de depresión que implique un estancamiento del flujo. Este paso consiste en corregir la cota del M.D.E. en las zonas donde en un grupo de 3x3 celdas, la central posea cota menor que las 8 restantes, lo que produciría un corte en las líneas de flujo.

Del mapa de dirección de flujo junto con el mapa de flujo acumulado deriva la hidrografía y la delimitación de subcuencas al ir definiendo salidas (outlets).

Una vez completado el preprocesamiento, se obtuvieron los parámetros morfométricos de las cuencas y su topología (Figura 17), como las distancias de cauces, pendientes, máximos recorridos, centroides de cuenca, áreas y perímetros.

La modelación hidrológica se llevó a cabo usando como entrada los hietogramas para TR 2, 5 y 10 años afectados por la reducción areal en función del área de las cuencas (Apéndice II). Para las pérdidas y el modelo de transformación lluvia-escorrentía se utilizó el método del SCS.

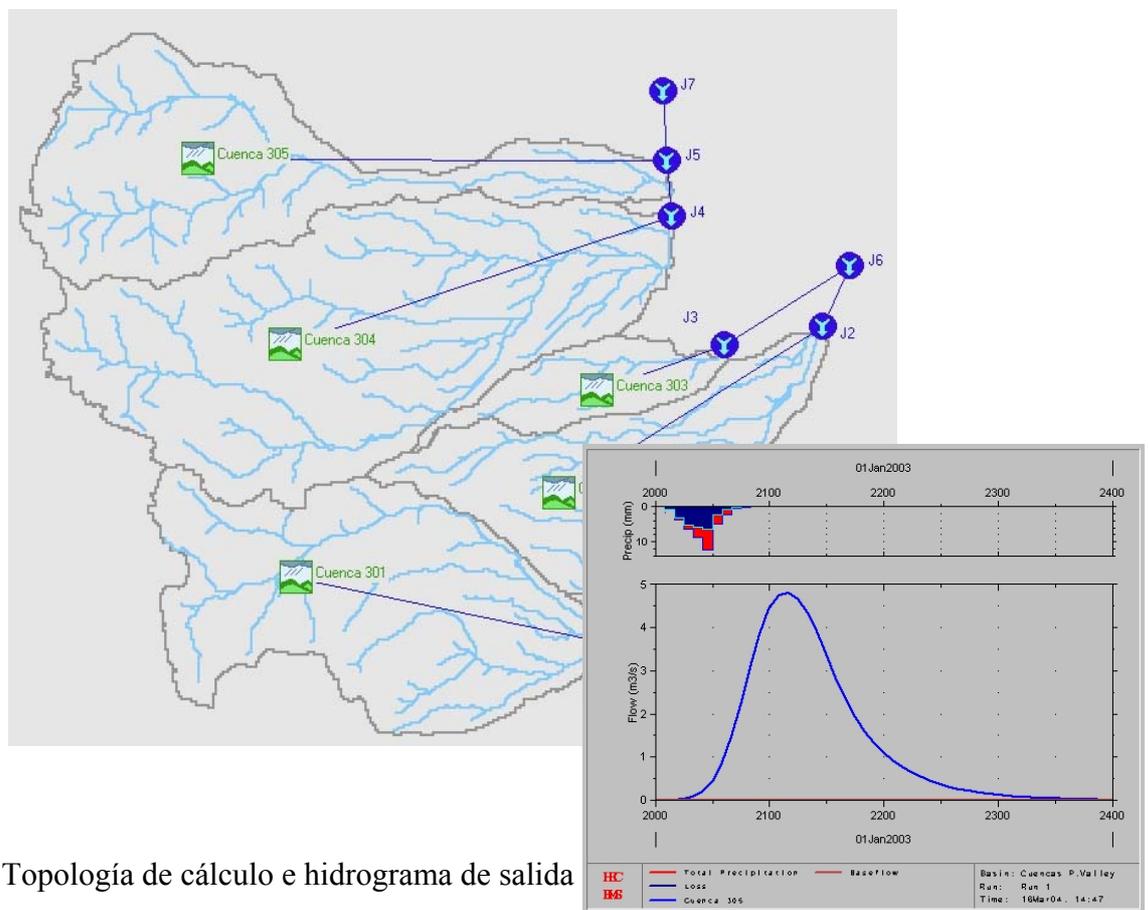


Figura 17. Topología de cálculo e hidrograma de salida

Los resultados de la aplicación de HEC-HMS se visualizan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados modelación hidrológica con HEC HMS para Escenario N°1

Cuenca	TR= 2 años			TR= 5 años			TR= 10 años		
	Qp (m³/s)	Vol (hm³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m³/s)	Vol (hm³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m³/s)	Vol (hm³)	Precip. Efect. (mm)
301	4.99	0.018	14.2	8.65	0.031	24.5	11.03	0.039	31.2
302	4.36	0.014	17.1	7.11	0.022	27.8	8.89	0.028	34.7
303	1.52	0.004	12.3	2.69	0.006	21.4	3.47	0.008	27.6
304	5.07	0.022	11.5	9.15	0.040	20.8	11.86	0.052	26.9
305	4.09	0.015	13.3	7.31	0.027	23.7	9.49	0.035	30.8

D) Modelación con ARHYMO

El modelo ARHYMO es un modelo determinístico de parámetros concentrados que fue ampliamente utilizado en Argentina desde 1993 (Maza, J. et al., 1993). En este proyecto se hizo uso de la nueva versión en entorno Windows (Fornero, L. et al., 2002).

El diagrama topológico del Escenario N°1 está formado por las 5 cuencas rurales (Figura 18) y como datos de entrada se utilizó la planilla de parámetros morfométricos (Tabla 2), la planilla de los valores de CN medios por cuenca (Tabla 7) y los hietogramas de precipitación de la tormenta de proyecto (Tabla 8) afectados por la reducción areal en función del área de las cuencas (Apéndice II). En al Tabla 10 y en la Figura 19 se muestran los resultados obtenidos mediante la aplicación de ARHYMO.

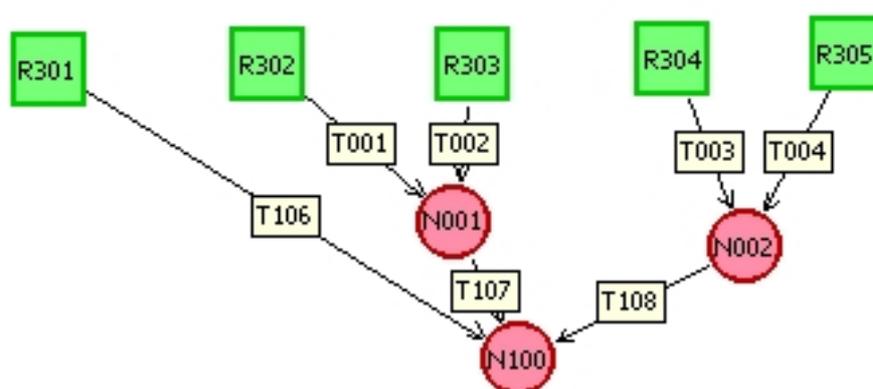


Figura 18. Topología de cálculo en ARHYMO

Tabla 10. Resultados obtenidos con modelación en ARHYMO para Escenario N°1

Cuenca	TR= 2 años			TR= 5 años			TR= 10 años		
	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)	Qp (m ³ /s)	Vol (hm ³)	Precip. Efect. (mm)
R301	3.51	0.011	8.5	7.19	0.022	17.5	9.66	0.030	23.6
R302	2.14	0.006	7.4	4.40	0.012	15.3	6.01	0.017	21.0
R303	1.05	0.002	8.3	1.75	0.004	13.9	2.42	0.006	19.2
R304	4.39	0.014	7.5	8.34	0.031	15.8	11.36	0.042	21.5
R305	3.33	0.011	9.5	6.67	0.022	19.1	8.98	0.029	25.7
Salida (N100)	13.49	0.044	8.1	27.49	0.091	16.7	42.20	0.140	25.7

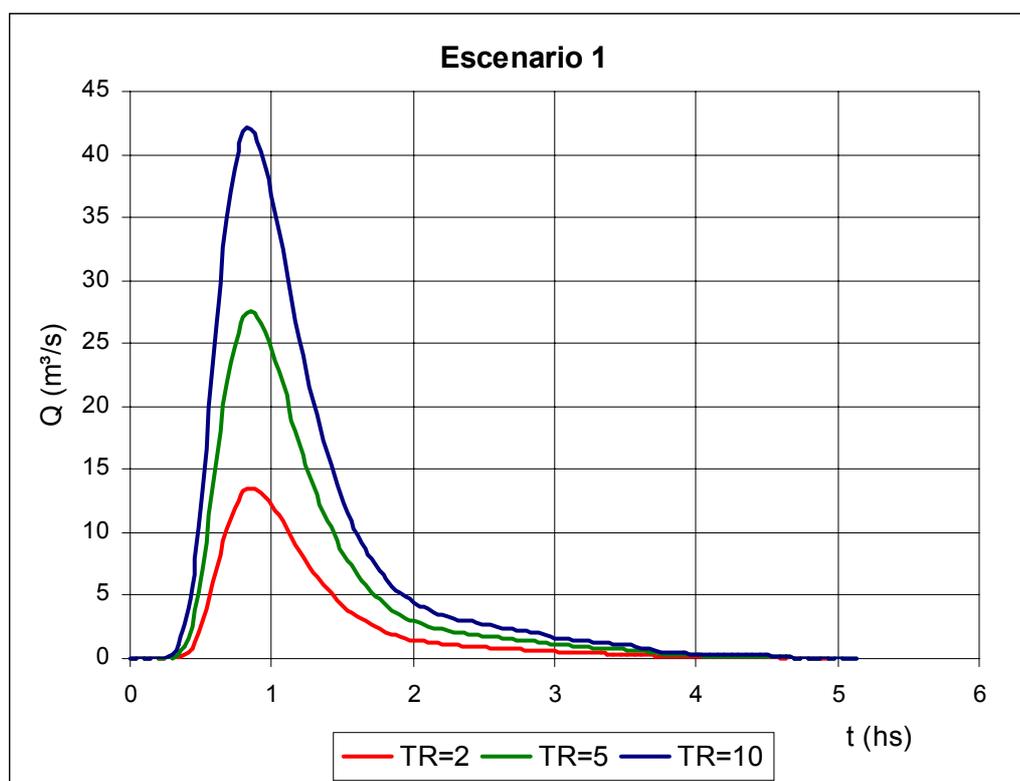


Figura 19. Hidrograma de salida en ARHYMO para el nodo N100 en el Escenario N°1 para TR= 2, 5 y 10 años

E) Modelación con método de Clark

Aprovechando el desarrollo existente de software que vincula las características geomorfológicas de las cuencas con sus respuestas hidrológicas y la facilidad de obtener tales parámetros geomorfológicos con el S.I.G. y M.D.E., es que se decidió implementar el método de Clark.

El método de Clark consiste en convolucionar un hidrograma unitario instantáneo (HUI) calculado a partir de las curvas isocronas (curvas que unen puntos de la cuenca con igual tiempo de desagüe) de cada cuenca.

Para la determinación de estas isocronas se utilizó la extensión HyGrid 2k2 del S.I.G. Woditem, desarrollado en Udine.

Como punto de partida una vez obtenido el M.D.E., se procede a corregir cualquier depresión que impida el libre flujo hasta la salida de la cuenca.

La metodología del cálculo de las curvas isocronas se puede explicar mediante el diagrama de flujo de la Figura 20.

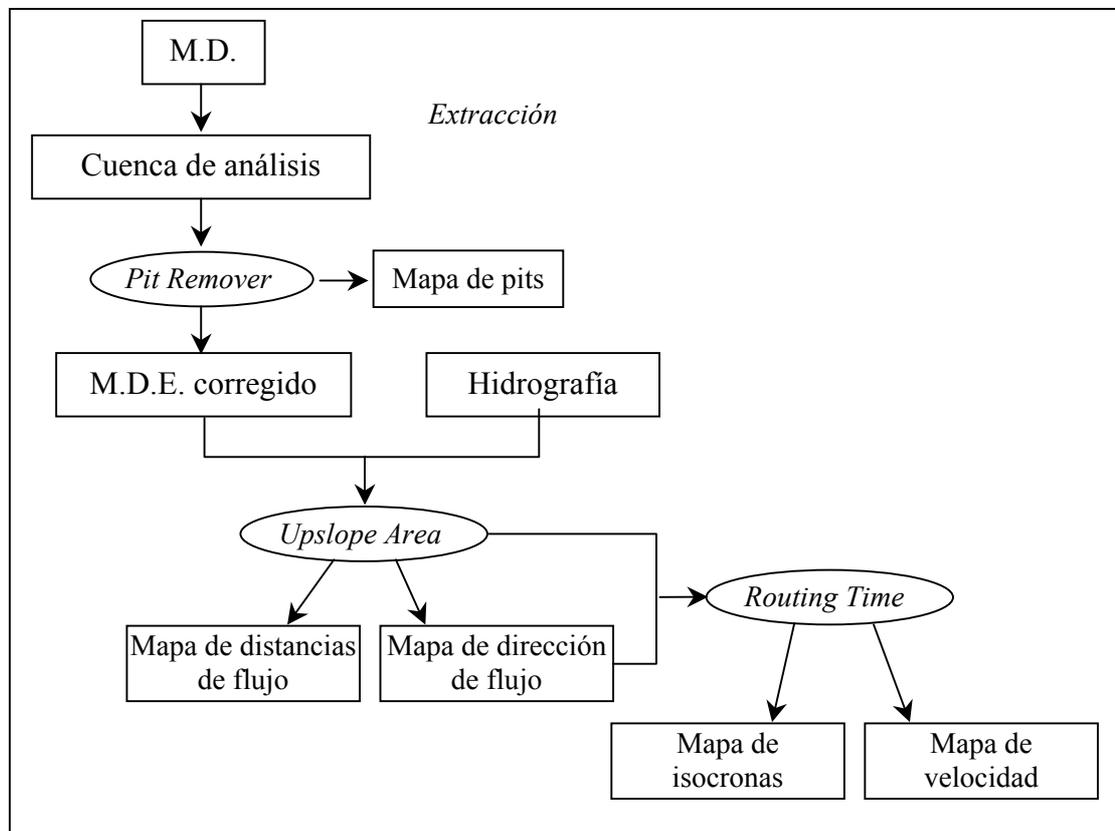


Figura 20. Diagrama de flujo para el cálculo de las isocronas de una cuenca

El mapa de área drenada (Upslope Area) es un raster en el cual cada celda indica la cantidad de celdas que drenan a ésta. Junto con el mapa de dirección de flujo, que puede ser calculado con distintos métodos (D8 clásico o facetado, D infinito, o Flujo múltiple) y mediante la rutina “Routing Time” se generan los dos mapas finales, el de velocidades y las isocronas.

El cálculo de la velocidad de propagación del flujo está dividida en tres bloques según que el área drenada esté por encima, debajo o dentro de ciertos umbrales expresados en número de celdas.

$$si[area_drenada] > 40000 \rightarrow v = 1.6 \left(\frac{area_drenada}{40000} \right)^{0.07}$$

$$si 40000 > [area_drenada] > 40 \rightarrow v = 1.6 \text{ m/s}$$

$$si [area_drenada] < 40 \rightarrow v = 0.5 \text{ m/s}$$

La primer ecuación expresa que si el área drenada supera el umbral de 40000 celdas (10 Ha) la velocidad está en función del área drenada con un mínimo de 1,6 m/s. La segunda ecuación expresa la velocidad en cauce ($v=1.6\text{m/s}$) cuando el área se encuentra entre el mínimo y el máximo umbral. Por último se define la velocidad en ladera (overlandflow) cuando el área drenada no supere las 40 celdas (1000m^2).

El primer resultado de las operaciones realizadas con los mapas de dirección de flujo, isodistancias, y área drenada es el mapa de velocidades distribuidas. En el mapa de velocidades de la cuenca R304 (Figura 21) se observa la distribución de velocidades tanto en cauces como en laderas.

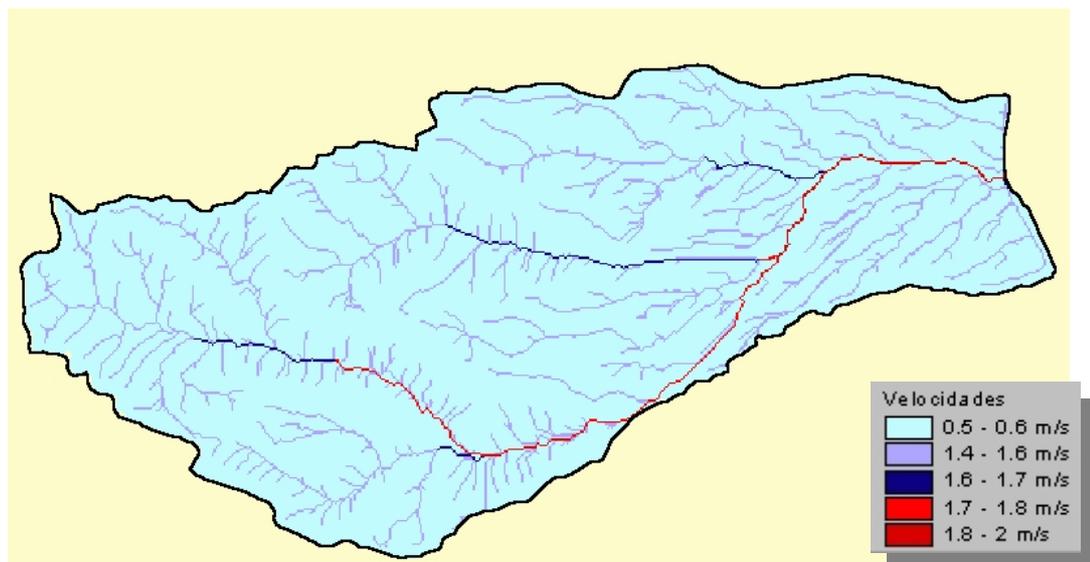


Figura 21. Mapa de Isovelocidades de flujo para cuenca R304

Los mapas derivados del primer análisis con la rutina *Upslope Area* son : el mapa de dirección de flujo (Figura 22) que representa el ángulo de escurrimiento de cada celda y el mapa de isodistancias de flujo (Figura 23) que representa los recorridos de los escurrimientos expresados en longitudes a través de la red hidrográfica sintética.

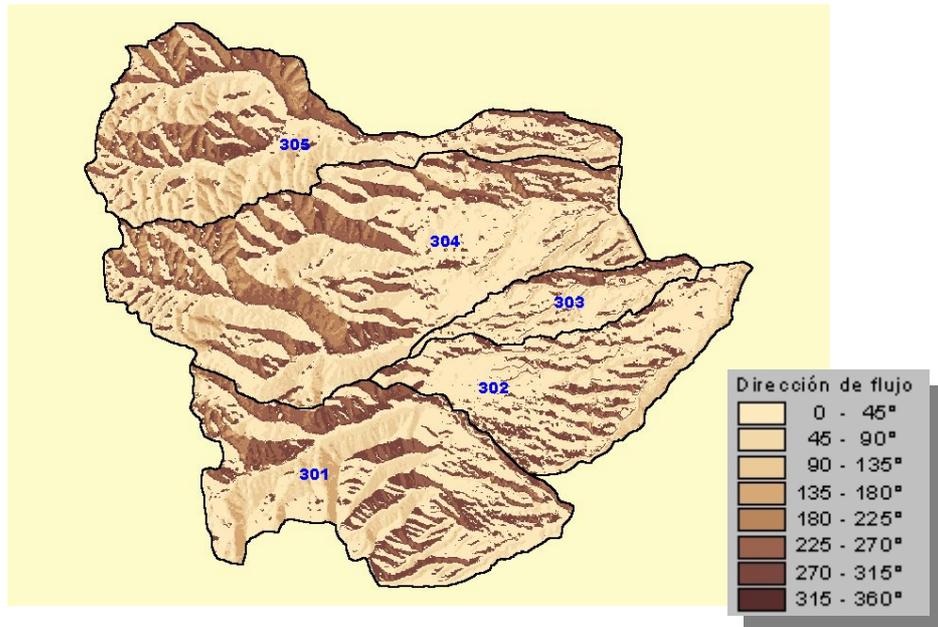


Figura 22. Mapa de Dirección de flujo

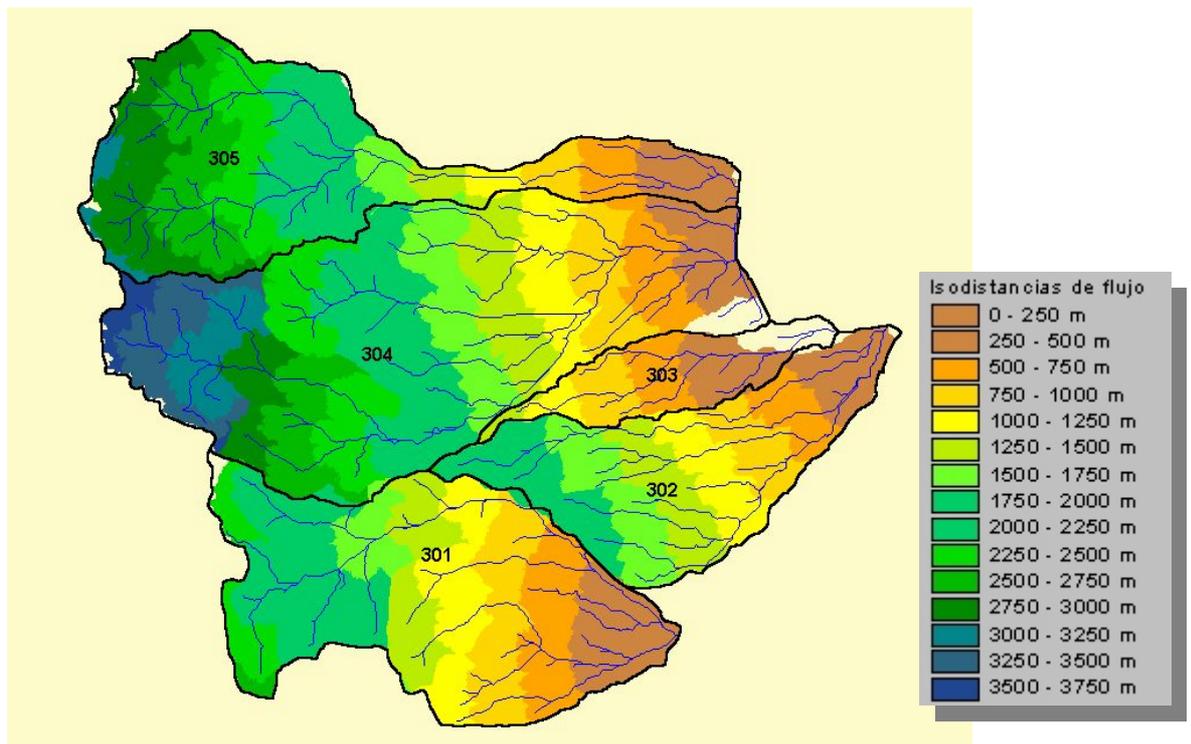


Figura 23. Mapa de Isodistancias de flujo

Por último con la rutina *Routing Time* se obtuvo el mapa de isocronas, como se observa en la Figura 24.

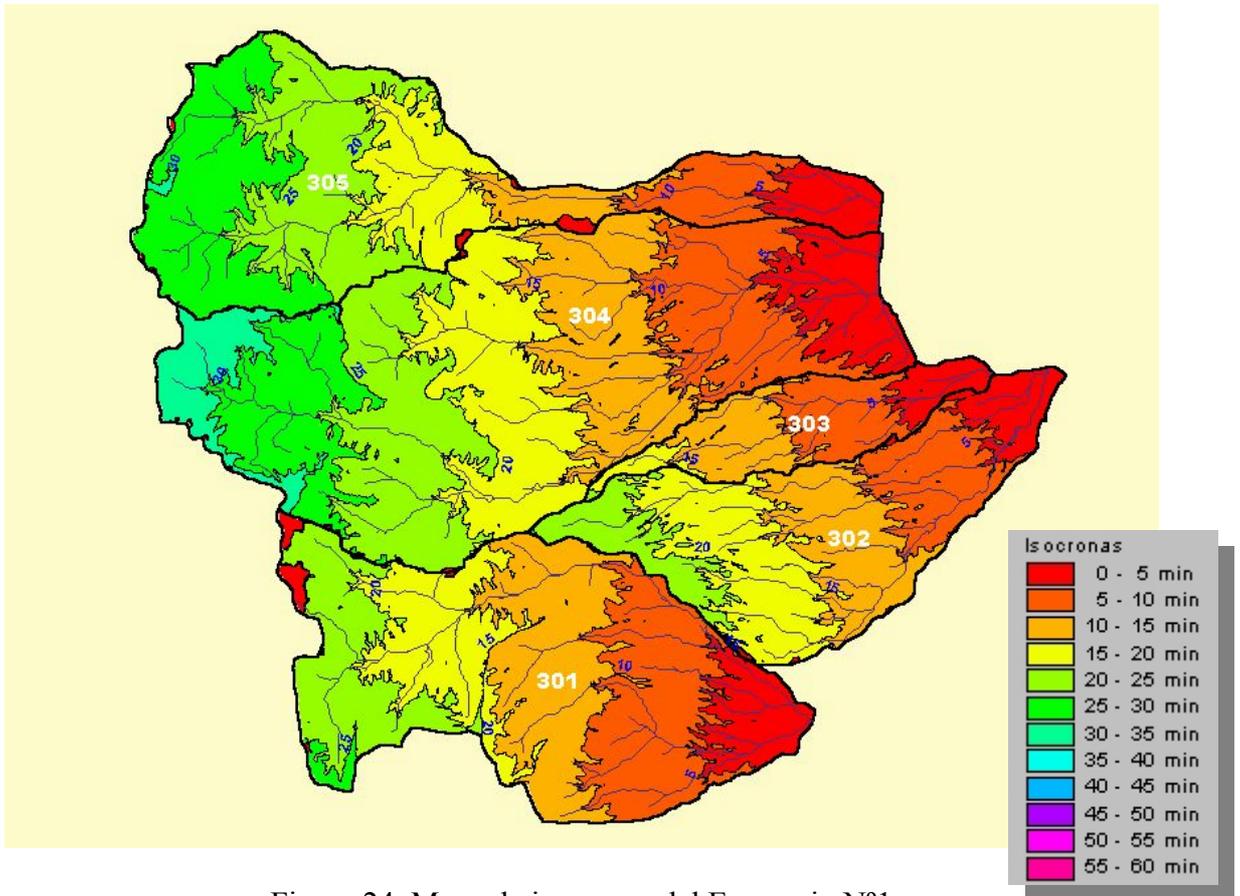


Figura 24. Mapa de isocronas del Escenario N°1

Una vez obtenido el mapa de isocronas de cada cuenca, se determinan las curvas área-tiempo utilizando los histogramas de frecuencias (Tabla 11 y Figura 25).

Tabla 11. Histograma de frecuencias para Curva Tiempo – Área de la cuenca 304

Intervalos de Tiempo (min)		Frecuencia	Area (km2)	Suma	Media	Min	Max	Area acum
0	5	6935	0.173	379.930	0.055	0.001	0.083	0.173
5	10	11365	0.284	1425.552	0.125	0.083	0.167	0.458
10	15	14061	0.352	2962.713	0.211	0.167	0.250	0.809
15	20	15460	0.387	4498.623	0.291	0.250	0.333	1.196
20	25	15004	0.375	5579.178	0.372	0.333	0.417	1.571
25	30	9811	0.245	4532.245	0.462	0.417	0.500	1.816
30	35	5034	0.126	2626.529	0.522	0.500	0.572	1.942
		77670	1.942	22004.770	0.283	0.001	0.572	

Curvas Tiempo Area

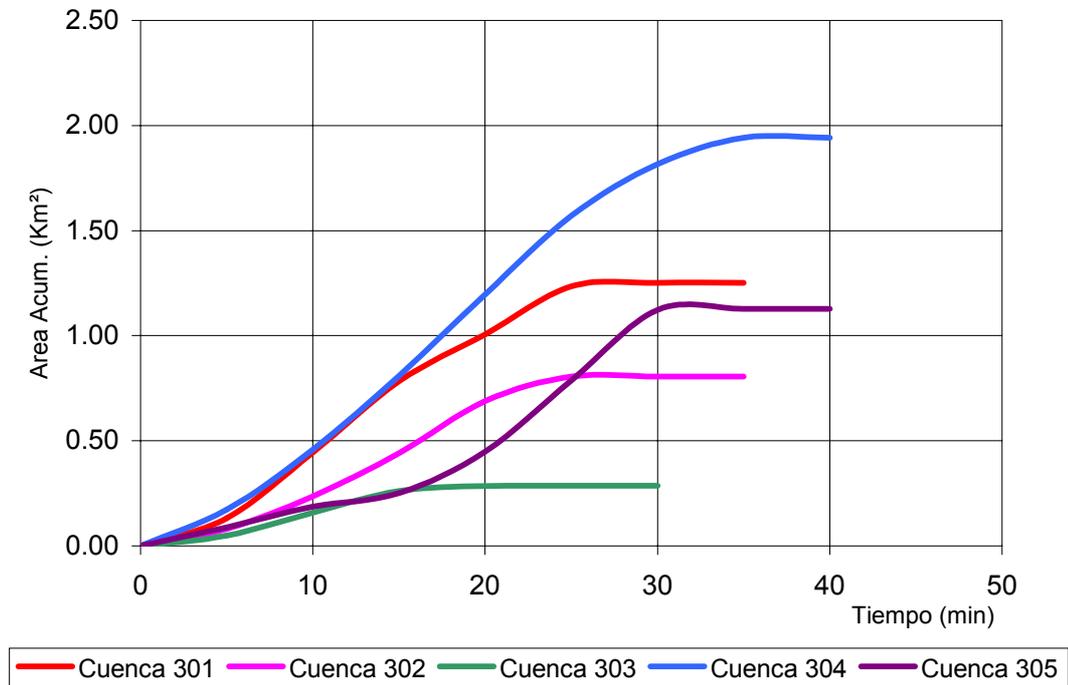


Figura 25. Curvas Tiempo – Area

El hidrograma unitario instantáneo (HUI) del método de Clark se determinó mediante planilla de cálculo (Tabla 12) utilizando las siguientes ecuaciones y parámetros que ejemplifican el caso de la cuenca 304:

$$\Delta T = 0.083 \text{ hr}$$

$$t_c = 0.572 \text{ hr}$$

$$C_0 = \Delta T / (k + 0.5 \Delta T) = 0.254$$

$$C_2 = (k - 0.5 \Delta T) / (k + 0.5 \Delta T) = 0.746$$

$$C_0 + C_2 = 1$$

$$k = t_c / 2 = 0.286 \text{ hr}$$

$$F = P_{ef} (m) \times \text{Area Cuenca (m}^2) / \Delta T (\text{seg}) / 100 = 0.065$$

$$P_{ef} = 0.001 \text{ m}$$

$$\text{Area Cuenca} = 1935177 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = 300 \text{ seg}$$

Tabla 12. Cálculo de Hidrograma Unitario de Clark

0	1	2	3	4	5	6
Tiempo (hr)	Frecuencia	Area (%)	C0 x (2)	C2 x (5) ⁱ⁻¹	(3)+(4)	(5) x F
						HUI (m ³ /s mm)
0.000	0	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000
0.083	6935	8.93	2.272	0.000	2.272	0.147
0.167	11365	14.63	3.723	1.694	5.417	0.349
0.250	14061	18.10	4.606	4.039	8.645	0.558
0.333	15460	19.90	5.065	6.445	11.510	0.742
0.417	15004	19.32	4.915	8.581	13.496	0.871
0.500	9811	12.63	3.214	10.062	13.276	0.856
0.583	5034	6.48	1.649	9.898	11.547	0.745
0.667		0.00	0.000	8.609	8.609	0.555
0.750		0.00	0.000	6.419	6.419	0.414
0.833		0.00	0.000	4.786	4.786	0.309
0.917		0.00	0.000	3.568	3.568	0.230
1.000		0.00	0.000	2.660	2.660	0.172
1.083		0.00	0.000	1.983	1.983	0.128
1.167		0.00	0.000	1.479	1.479	0.095
1.250		0.00	0.000	1.102	1.102	0.071
1.333		0.00	0.000	0.822	0.822	0.053
1.417		0.00	0.000	0.613	0.613	0.040
1.500		0.00	0.000	0.457	0.457	0.029
1.583		0.00	0.000	0.341	0.341	0.022
1.667		0.00	0.000	0.254	0.254	0.016
1.750		0.00	0.000	0.189	0.189	0.012
1.833		0.00	0.000	0.141	0.141	0.009
1.917		0.00	0.000	0.105	0.105	0.007
2.000		0.00	0.000	0.078	0.078	0.005
2.08		0.00	0.000	0.059	0.059	0.004
2.17		0.00	0.000	0.044	0.044	0.003
2.25		0.00	0.000	0.033	0.033	0.002
2.33		0.00	0.000	0.024	0.024	0.002
2.42		0.00	0.000	0.018	0.018	0.001
2.50		0.00	0.000	0.013	0.013	0.001
2.58		0.00	0.000	0.010	0.010	0.001
2.67		0.00	0.000	0.007	0.007	0.000

Luego para cada una de las cuencas se convolucionó el HUI con las precipitaciones efectivas correspondientes a los eventos de TR= 2, 5 y 10 años obteniendo así los hidrogramas de escurrimiento (Figura 26 y Tabla 13).

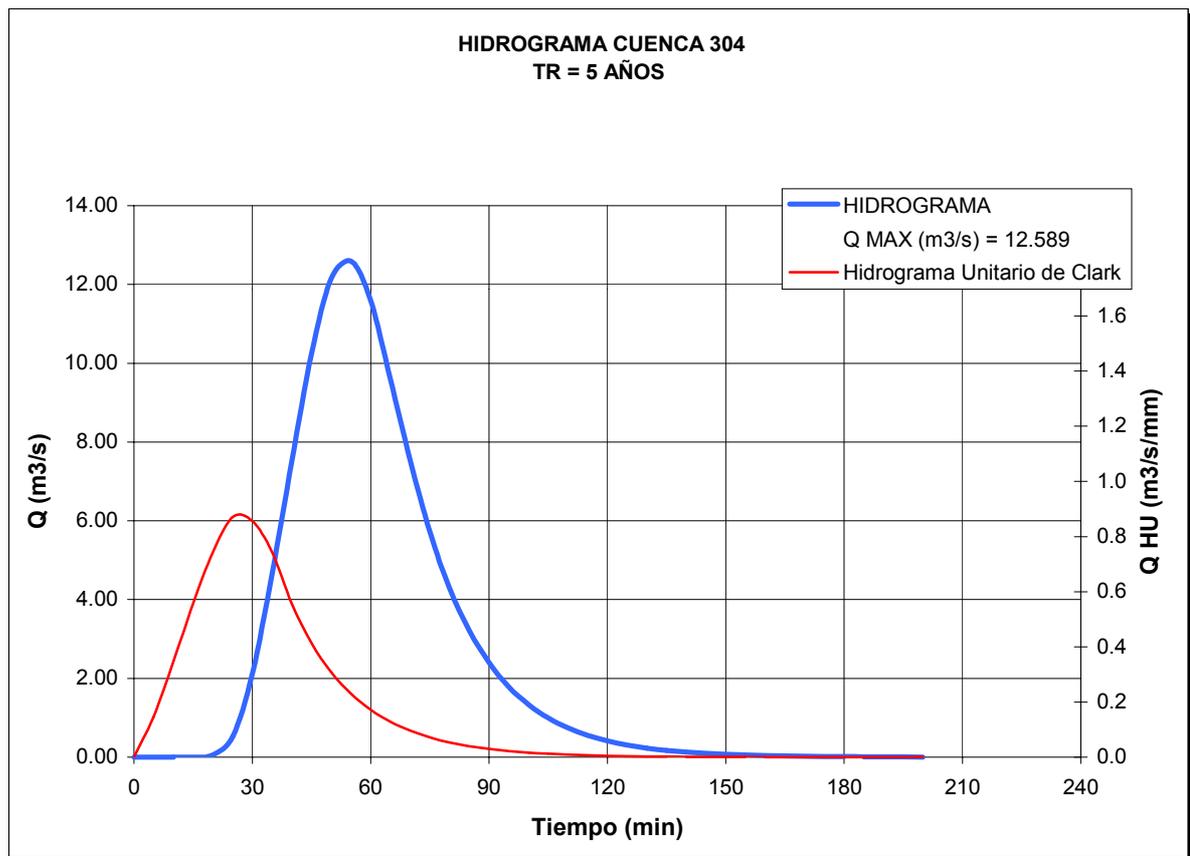


Figura 26. Hidrograma de salida cuenca 304 para TR= 5 años

Tabla 13. Caudales pico por cuenca del Escenario N°1 con el HUI de Clark

	TR= 2 años	TR= 5 años	TR= 10 años
Cuenca	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)	Qp (m ³ /s)
301	5.46	11.02	14.76
302	3.14	6.59	8.96
303	1.13	2.50	3.47
304	6.04	12.59	17.05
305	5.18	10.41	13.91

F) Calibración y Ajuste de Parámetros

Para el procesamiento de las cuencas rurales, el modelo ARHYMO convolucionada el hidrograma de precipitación efectiva con un HUI sintético. Este HUI está formulado desde su origen hasta el punto de inflexión de la rama descendente, por la analogía de Nash de n

embalses lineales en serie, y desde ese punto de inflexión hasta el final por dos ecuaciones exponenciales de recesión.

Los parámetros K (constante de recesión del HUI) y TPU (tiempo al pico del HUI) son parámetros de calibración o ajuste.

Como dato de entrada al modelo (Figura 27) se pueden ingresar:

- los valores correspondientes a la morfometría (diferencia de elevación y longitud del cauce más largo) ya que el modelo posee ecuaciones que calculan los parámetros K y TPU en función de tales valores o
- los parámetros K y TPU directamente

R301 Subcuenca Rural 301

Datos generales

Area: 1.263 km² Delta tiempo para Cálculo: 5 minutos

Infiltración

Valor de CN: 76 mm
Abstracción inicial: 11.15 mm

Entrada / Salida

Identificación de tormenta: TR21
Hidrograma resultante: H102 .dat
Hidrograma a comparar: h112 .dat

Hidrograma Unitario

Según Morfometría
Diferencia de elevación: [] m
Longitud de cauce: [] km

Según Parámetros
K: 0.222 horas
TPU: 0.25 horas

Imprimir... Aceptar Cancelar

Figura 27. Pantalla de ingreso de datos para una cuenca rural en el modelo ARHYMO

Debido a la incertidumbre que producen las ecuaciones de correlación que posee ARHYMO se decidió ajustar los hidrogramas generados por ARHYMO con los resultantes de la aplicación del método de Clark por medio de la modificación del parámetro K, verificando por comparación de hidrogramas, el caudal pico y tiempo al pico. El parámetro TPU no se calibró debido a que los hidrogramas simulados por ambos métodos no fueron sensibles en la variación de tal parámetro.

Este ajuste se realizó en forma manual en las cuencas rurales de los Escenarios N°s 1 y 3 logrando un conjunto de datos que permitieron efectuar una correlación entre las variables área, longitud de cauce, diferencia de altitud y K de cada cuenca ajustada, de manera de obtener una ecuación que se pudiera generalizar para los otros casos.

La ecuación del parámetro K ajustado para las cuencas de estudio es:

$$K_{ajust} = 0.036 \cdot A^{-0.2} \cdot Lc^{1.1} \cdot \Delta H^{0.15} \quad (R^2 = 0.716)$$

mientras que la que posee ARHYMO (Maza, J. et al, 1993) es:

$$K_{ARHYMO} = 0.48 \cdot A^{0.2} \cdot Lc^{0.3} \cdot \Delta H^{-0.1}$$

donde:

- K_{ajust} = constante de recesión del HUI en horas.
- A = área de la cuenca en km².
- L = longitud de la cuenca en km, medida sobre el cauce de mayor longitud.
- ΔH = diferencia de altitud en metros, en la cuenca, entre la altura máxima en cabeceras y la mínima a la salida de la cuenca.

Con la ecuación de calibración obtenida se simularon las cuencas rurales del Escenario N°1 (Figura 28) ingresando en lugar de los parámetros morfométricos, los valores de K y TPU, verificando en los hidrogramas de salida el ajuste con respecto al hidrograma calculado por método de Clark (Figura 29). Se puede apreciar también en la Tabla 14 los buenos resultados de la calibración en el caso del Nodo 100 para el Escenario N° 1 y los tiempos de recurrencia empleados.

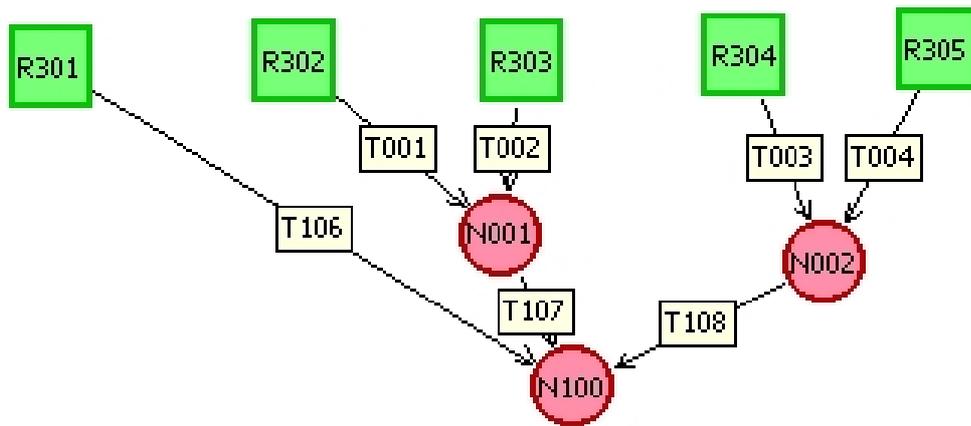


Figura 28. Topología de la simulación en el Escenario N°1

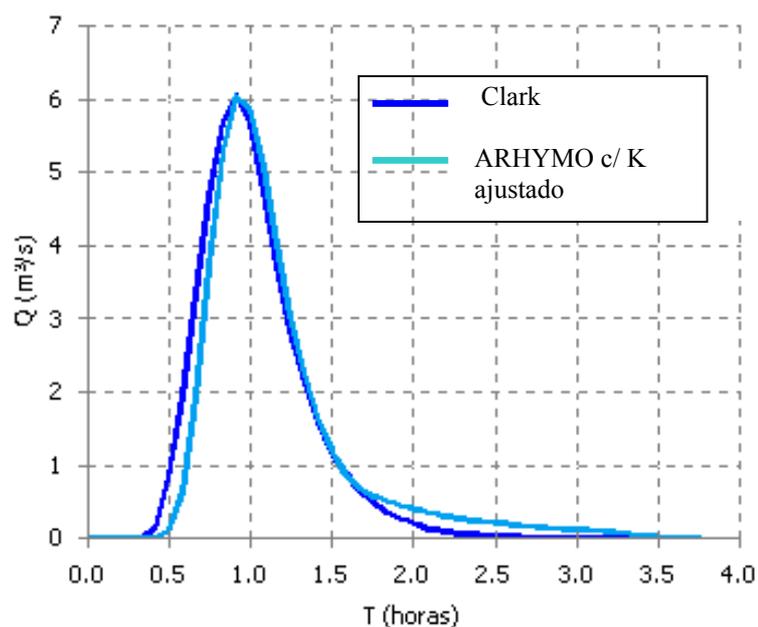


Figura 29. Calibración y ajuste de hidrograma de cuenca rural 304 para TR=2 años

Tabla 14. Resultados de la aplicación del método de Clark y el modelo ARHYMO calibrado en el nodo 100 para el Escenario N°1

		Clark	ARHYMO
TR=2	Qp (m³/s)	19.29	18.89
	Tp (hs)	0.83	0.85
	V (Hm³)	0.043	0.044
TR=5	Qp (m³/s)	40.28	40.10
	Tp (hs)	0.83	0.84
	V (Hm³)	0.090	0.091
TR=10	Qp (m³/s)	54.61	55.32
	Tp (hs)	0.83	0.84
	V (Hm³)	0.123	0.140

5.3.2. Escenario N° 2: Loteo No Convencional

Se eligió parcialmente como base de este escenario el diseño de loteo denominado *Palmares Valley* (Figura 30) presentado en asamblea pública para la consideración del estudio de impacto ambiental. De los planos de loteo se digitalizaron las manzanas y las calles, así como también el corredor del oeste quedando anexado al S.I.G. como capa temática.

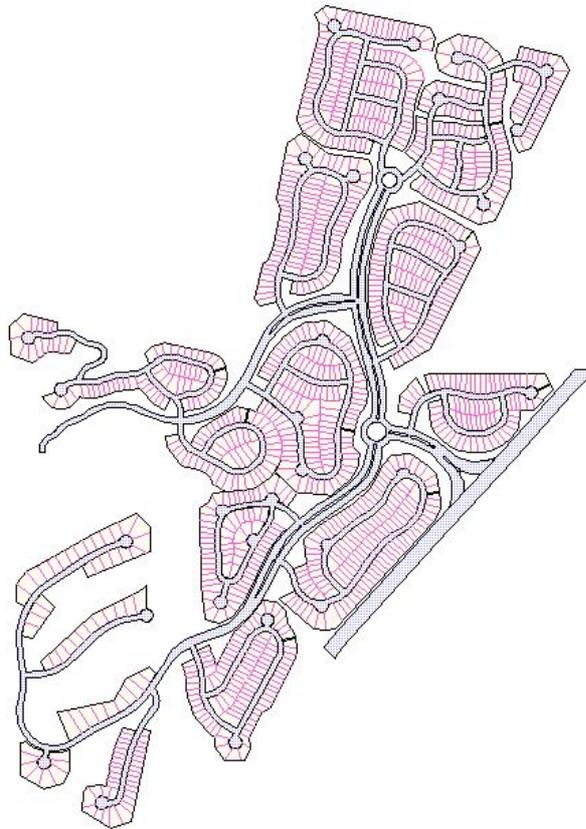


Figura 30. Escenario N° 2, loteo no convencional

Para la delimitación de cuencas en el área urbana, se asumieron las siguientes hipótesis:

- a. Los fondos de lotes son divisorias de agua
- b. Los lotes desaguan a las calles
- c. Las manzanas desaguan a calles principales

Para lograr digitalmente las divisiones de cuenca bajo tales hipótesis, se planteó un modelo digital de terreno con cotas de proyecto, el cual permitió la verificación de que el escurrimiento fuera por las calles.

En la Figura 31 se observa en líneas azules, la red sintética de los escurrimientos urbanos, obtenida con el preprocesamiento de HEC Geo-HMS.

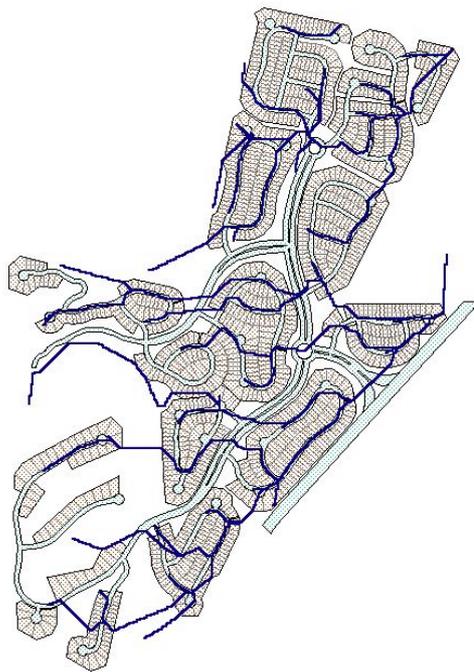


Figura 31. Red sintética de escurrimientos urbanos

Una vez delimitadas las cuencas tanto rurales como urbanas (Figura 32), se determinaron los parámetros morfométricos mediante análisis espacial con el S.I.G. (Tabla 15).

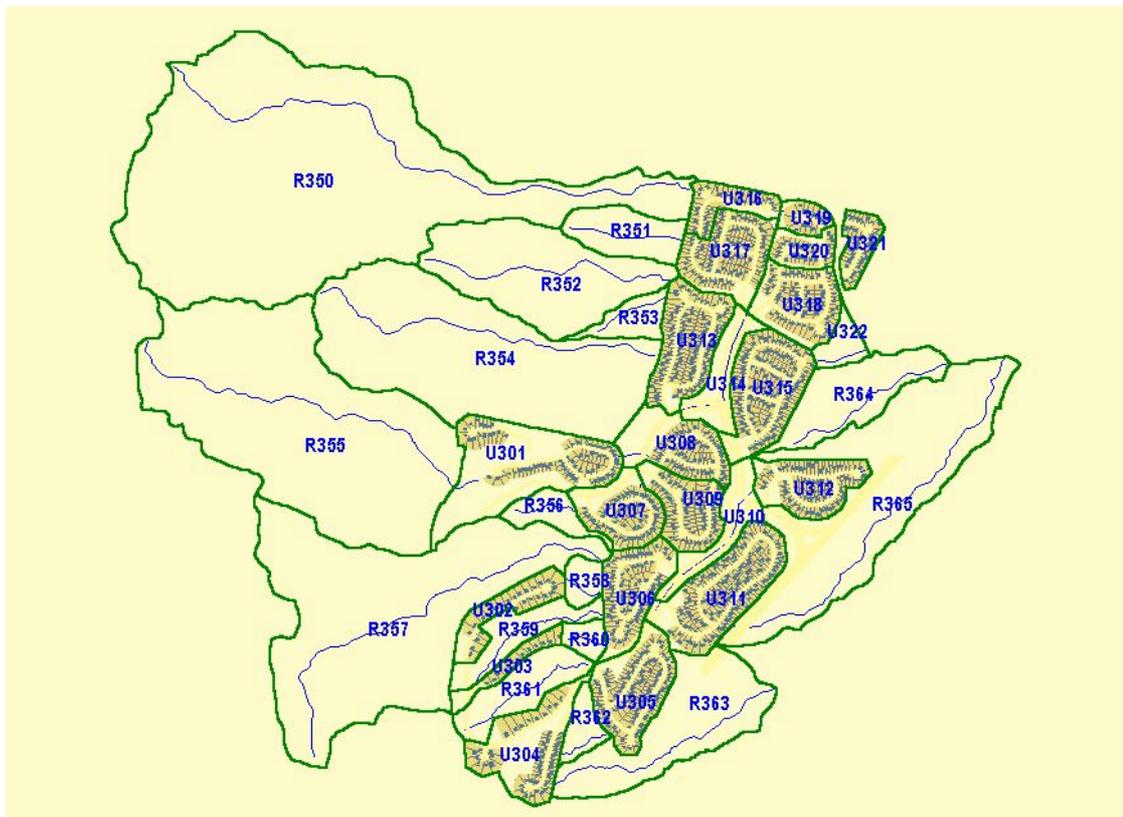


Figura 32. Cuencas urbanas y rurales del Escenario N°2 (Lámina 5)

Tabla 15. Parámetros morfométricos del Escenario N°2 (Loteo No Convencional) .

CUENCAS RURALES										
Cuenca	Area (km²)	Perímetro (m)	Cota máx (m)	Cota min (m)	Dif. Elev. (m)	Lc (km)	Pendiente (m/m)	Imperm (%)	CN	Abstracc. Inicial [mm]
R350	0.999	5738	1075.0	937.0	138.0	2.186	0.063	0.0	78.85	10.2
R351	0.066	1149	970.0	935.0	35.0	0.419	0.084	0.0	69.81	13.3
R352	0.232	2269	1055.0	935.0	120.0	0.986	0.122	0.0	75.26	11.4
R353	0.035	1079	965.0	935.0	30.0	0.284	0.106	0.0	69.40	13.4
R354	0.481	3297	1075.0	941.0	134.0	1.345	0.100	0.0	77.07	10.8
R355	0.633	3796	1075.0	986.0	89.0	1.381	0.064	0.0	79.16	10.1
R356	0.034	1084	1034.0	966.0	68.0	0.231	0.294	0.0	78.14	10.4
R357	0.559	4395	1077.0	963.0	114.0	1.614	0.071	0.0	78.76	10.2
R358	0.022	563	1012.0	964.0	48.0	0.149	0.322	0.0	77.49	10.7
R359	0.058	1635	1060.0	963.0	97.0	0.649	0.150	4.2	80.07	9.8
R360	0.018	555	1012.0	963.0	49.0	0.145	0.338	2.5	74.82	11.5
R361	0.072	1352	1060.0	970.0	90.0	0.581	0.155	10.0	80.42	9.7
R362	0.027	813	984.0	957.0	27.0	0.195	0.139	0.0	73.06	12.1
R363	0.182	2390	991.0	928.0	63.0	0.937	0.067	5.1	70.27	13.1
R364	0.110	1849	938.0	903.0	35.0	0.686	0.051	0.0	69.12	13.5
R365	0.378	4399	941.5	897.0	44.5	1.551	0.029	12.6	72.37	12.4

CUENCAS URBANAS

Cuenca	Area (Ha)	Perím. (m)	Cota máx (m)	Cota min (m)	AREA PERMEABLE					AREA IMPERMEABLE				
					CN	Abstrac Inicial (mm)	Plano de Escurrimiento			Prop. Área direct. Conect (%)	Prop. Área Total (%)	Plano de Escurrimiento		
							Pend (%)	Long (m)	Coefic. Rugos.			Pend. (%)	Long (m)	Coefic. Rugos.
U301	15.93	2012	1035.0	957.5	75	11.5	10.0	773	0.25	14.3	21.7	10.0	773	0.02
U302	4.53	1283	1051.0	1009.0	75	11.5	8.4	498	0.25	14.7	24.8	8.4	498	0.02
U303	2.47	1142	1050.0	1010.0	75	11.5	10.2	394	0.25	16.6	25.4	10.2	394	0.02
U304	9.70	1621	1045.0	970.0	75	11.5	15.8	476	0.25	15.9	25.9	15.8	476	0.02
U305	8.86	1272	970.0	943.0	75	11.5	4.4	612	0.25	22.9	40.0	4.4	612	0.02
U306	7.36	1257	963.0	951.0	75	11.5	2.6	469	0.25	20.8	35.3	2.6	469	0.02
U307	6.51	1046	980.0	955.0	75	11.5	4.5	550	0.25	23.9	37.5	4.5	550	0.02
U308	7.68	1250	957.5	941.0	75	11.5	3.6	462	0.25	20.5	32.3	3.6	462	0.02
U309	6.20	1092	957.0	943.0	75	11.5	2.5	565	0.25	18.4	35.6	2.5	565	0.02
U310	5.09	1524	955.5	934.0	75	11.5	3.9	551	0.25	47.5	47.5	3.9	551	0.02
U311	11.74	1513	959.0	933.0	75	11.5	3.5	739	0.25	18.9	38.6	3.5	739	0.02
U312	6.92	1171	934.5	919.0	75	11.5	3.3	471	0.25	18.3	35.8	3.3	471	0.02
U313	9.01	1350	947.0	931.5	75	11.5	2.6	588	0.25	19.0	36.6	2.6	588	0.02
U314	4.98	1358	948.0	928.0	75	11.5	3.9	511	0.25	44.5	44.5	3.9	511	0.02
U315	10.26	1413	944.0	930.0	75	11.5	2.7	510	0.25	21.6	39.4	2.7	510	0.02
U316	3.79	1037	940.0	925.0	75	11.5	3.8	395	0.25	20.3	32.6	3.8	395	0.02
U317	8.41	1260	940.0	925.0	75	11.5	3.6	417	0.25	20.6	35.8	3.6	417	0.02
U318	7.47	1087	928.0	915.0	75	11.5	2.7	483	0.25	21.4	34.9	2.7	483	0.02
U319	1.98	571	928.0	915.0	75	11.5	6.2	211	0.25	13.0	24.7	6.2	211	0.02
U320	2.94	754	929.0	917.0	75	11.5	5.0	242	0.25	20.2	33.5	5.0	242	0.02
U321	2.82	764	916.0	911.0	75	11.5	1.8	278	0.25	19.6	39.1	1.8	278	0.02
U322	2.45	813	931.0	914.0	75	11.5	4.2	408	0.25	0.0	0.0	4.2	408	0.02

5.3.2.1. Hidrología

Con los parámetros así determinados y con las tormentas de TR= 2, 5 y 10 años se corrió el modelo ARHYMO bajo el siguiente esquema de modelación (Figura 33)

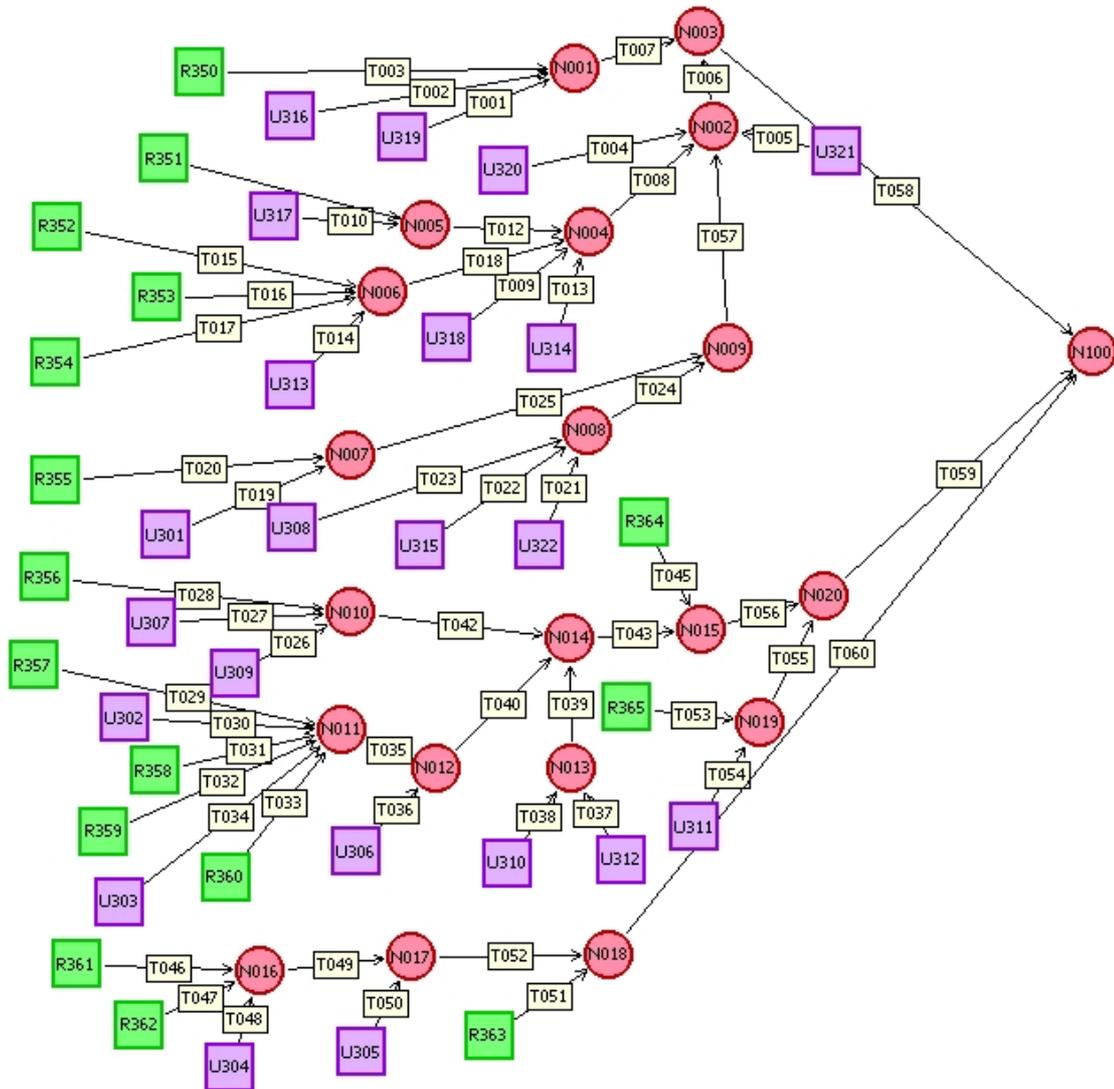


Figura 33. Topología de cálculo en modelo ARHYMO del Escenario N°2

Los resultados de las corridas del modelo ARHYMO, ya calibrado, en el Nodo 100 se pueden apreciar en los valores característicos del escurrimiento de la Tabla 16 y en los hidrogramas de la Figura 34.

Tabla 16. Resultados de la modelación hidrológica en el Nodo 100 para el Escenario N°2

TR2	Qp (m ³ /s)	26.89
	Tp (hs)	0.67
	V (Hm ³)	0.063
TR5	Qp (m ³ /s)	53.30
	Tp (hs)	0.66
	V (Hm ³)	0.119
TR10	Qp (m ³ /s)	70.33
	Tp (hs)	0.66
	V (Hm ³)	0.155

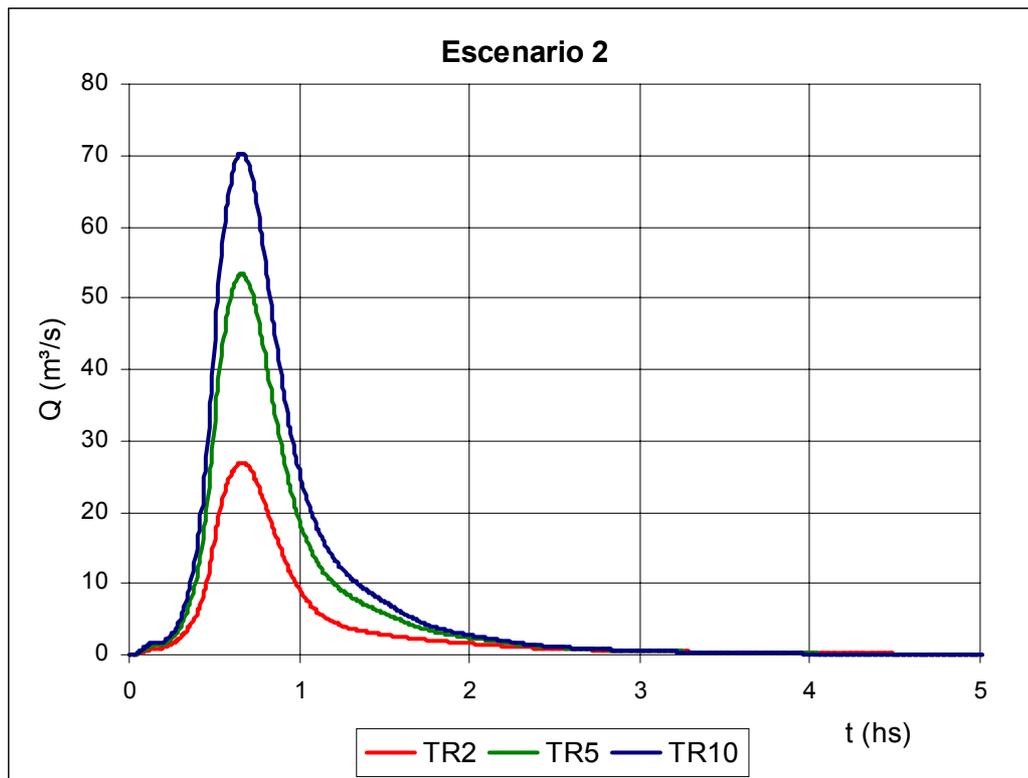


Figura 34. Hidrogramas de TR= 2, 5 y 10 años en el Nodo 100 para el Escenario N°2

5.3.3 Escenario N° 3: Loteo convencional

El objetivo de simular con este escenario es permitir la comparación de resultados con la urbanización de loteo no convencional. El diseño del mismo corresponde al típico estilo de construcción del tipo “damero” con calles perpendiculares, lotes pequeños, y manzanas rectangulares o cuadradas. Para tal simulación se tomó como esquema el trazado del Barrio “La Estanzuela” (al Norte de las cuencas estudiadas) y se insertó en la misma superficie utilizada por el Escenario N°2 (Figura 35).

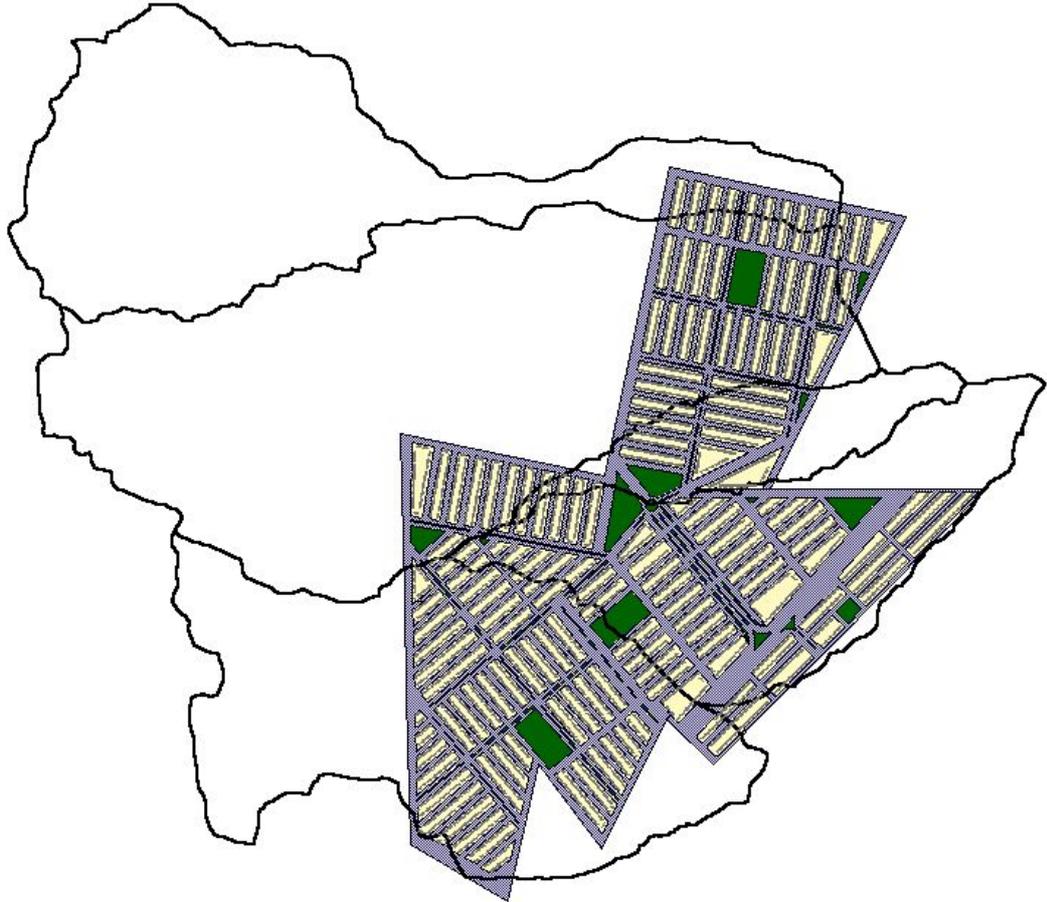


Figura 35. Escenario N°3 Urbanización Convencional tipo damero (Lámina 6)

Los parámetros morfométricos (Tabla 17) se obtuvieron de igual manera que en el caso del Escenario N°2.

Tabla 17. Parámetros morfométricos del Escenario N° 3

Cuencas Urbanas

Cuenca	Area (ha)	Perim. (km)	Area Permeable							Area Impermeable						
			CN	$Ia=S^{0.55}$	Cota max. (m)	Cota min. (m)	Pendiente (%)	Longitud (m)	Coef. Rug.	TIMP (%)	XIMP (%)	Cota max. (m)	Cota min. (m)	Pendiente (%)	Longitud (m)	Coef. Rug.
U301	63.19	4.075	75	11.5	990	933	4.06	1405	0.25	64.6	64.6	990	933	4.06%	1405	0.02
U302	63.87	4.087	75	11.5	960	915	3.23	1394	0.25	63.3	63.3	960	915	3.23%	1394	0.02
U303	18.33	2.516	75	11.5	954	927	2.94	919	0.25	62.5	62.5	954	927	2.94%	919	0.02
U304	49.20	4.343	75	11.5	952	921	2.35	1319	0.25	65.3	65.3	952	921	2.35%	1319	0.02
U305	6.02	1.382	75	11.5	946	915	4.66	665	0.25	72.3	72.3	946	915	4.66%	665	0.02

Cuencas Rurales

Cuenca	Area [Km ²]	Perim. [km]	Cota máx (m)	Cota min (m)	ΔH (m)	Long. Cauce (km)	Pendiente (m/m)	CN	$Ia=S^{0.55}$
R301	0.631	6.207	1077.0	995.0	82.0	1.614	0.051	76.03	11.1
R302	0.170	3.960	941.5	897.0	44.5	1.551	0.029	71.84	12.6
R303	0.104	1.907	930.0	903.0	27.0	0.686	0.039	69.67	13.3
R304	1.455	6.699	1045.0	935.0	110.0	2.092	0.053	75.59	11.3
R305	1.070	6.888	1035.0	938.0	97.0	2.186	0.044	77.54	10.6

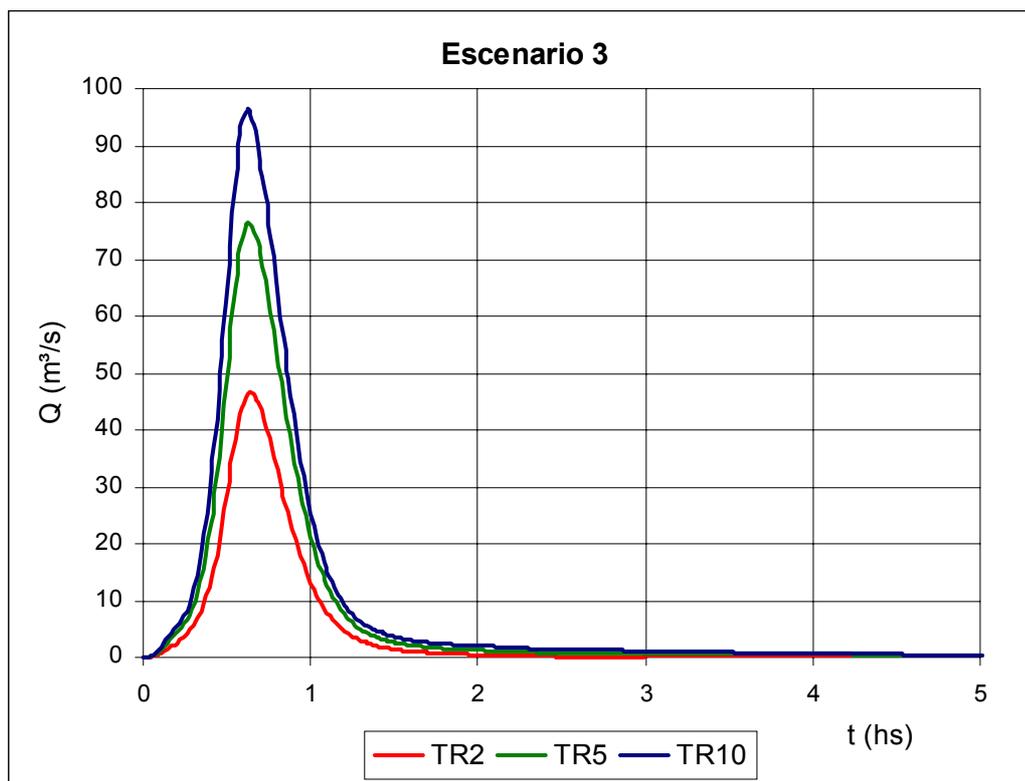


Figura 37. Hidrogramas de TR= 2, 5 y 10 años en el Nodo 100 para el Escenario N°3

5.3.4 Fragilidad del territorio

5.3.4.1. Sustentabilidad de la Urbanización

En los últimos años se ha llegado a un consenso mundial acerca de la necesidad de un desarrollo sostenible. Además de un cambio de perspectiva acerca del desarrollo, el concepto del desarrollo sostenible implica nuevas demandas. Una de éstas es la producción de la información, la cual debe jugar un papel crítico, puesto que ella puede proveer de bases firmes al proceso de toma de decisiones y al seguimiento del desarrollo.

En el caso de la hidrología la información espacial se puede usar para indicar la condición del sistema hidrológico en escala nacional, regional o local usando conceptos de indicadores de fragilidad.

Existen diversas propuestas de indicadores que han sido elaboradas por instituciones internacionales o nacionales, pero no existe todavía un indicador estándar. En el caso en estudio se resolvió utilizar un concepto de fragilidad hidrológica propuesto por (CaZorzi, F., 2002).

Cualquier intervención que contemple un cambio en el uso del suelo requiere de una evaluación del efecto que tal cambio produce, al menos a nivel hidrológico. Es posible clasificar el territorio en términos de fragilidad, siendo frágiles las áreas en las cuales la

modificación no conservativa produce un marcado efecto negativo a escala local o a nivel de cuenca. (Cazorzi,F., 2002)

El índice de fragilidad propuesto combina los efectos que pueden producir cambios en variables como el CN (número de curva de la cuenca), la pendiente del terreno y la cercanía a cauces naturales y queda definido como:

$$F = \frac{(100 - CN) + (100 - D) + P}{3}$$

siendo:.

- F = Índice de Fragilidad (de 0 a 100)
- CN = Número de Curva
- D = Distancia a red hidrográfica, en metros
- P = Pendiente del terreno, en %

Para obtener un mapa de distancias a cauces mediante en forma distribuida se utilizó una operación de análisis espacial conocida como multibuffering. El resultado fue un mapa de distancias (Figura 38) en el cual se observan las zonas de intersección entre cauces y urbanización.

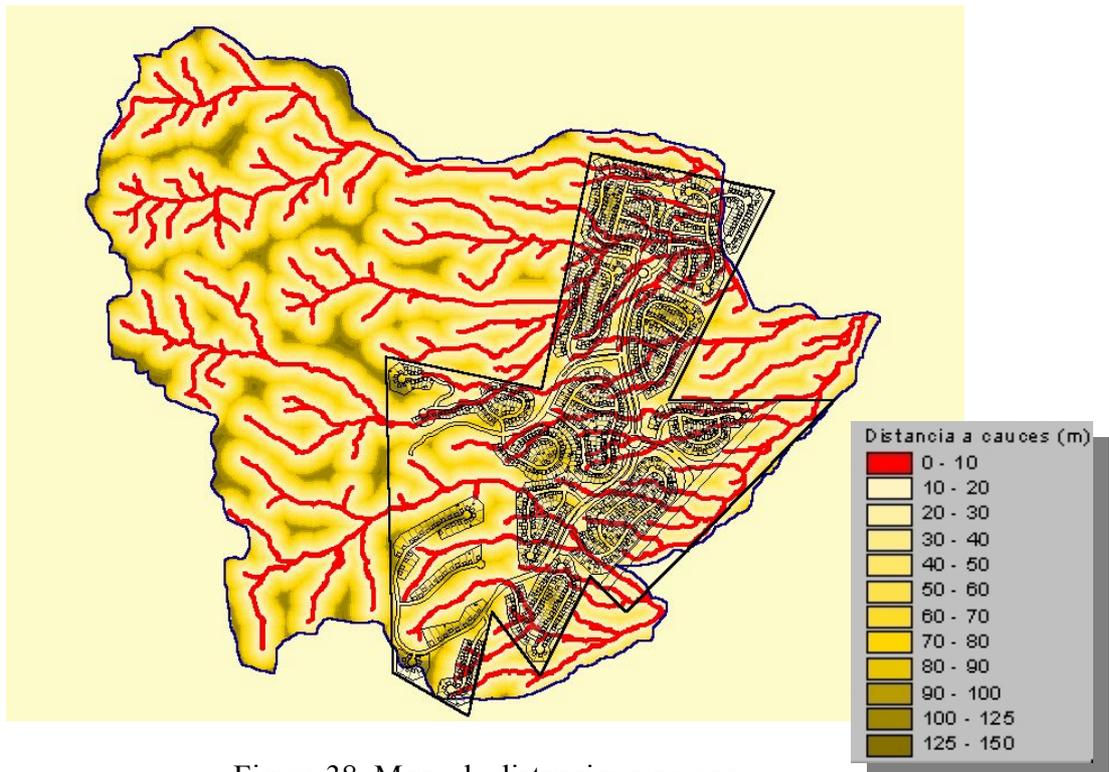


Figura 38. Mapa de distancias a cauces

Al contar con los mapas de CN, pendiente y distancia a cauces en forma de raster, mediante álgebra de mapas se pudo calcular el indicador de fragilidad en forma distribuida y con una reclasificación se obtuvieron 4 clases de fragilidad con colores que van del verde (fragilidad de 0 a 30), hasta el rojo (fragilidad de 70 a 100). (Figura 39)

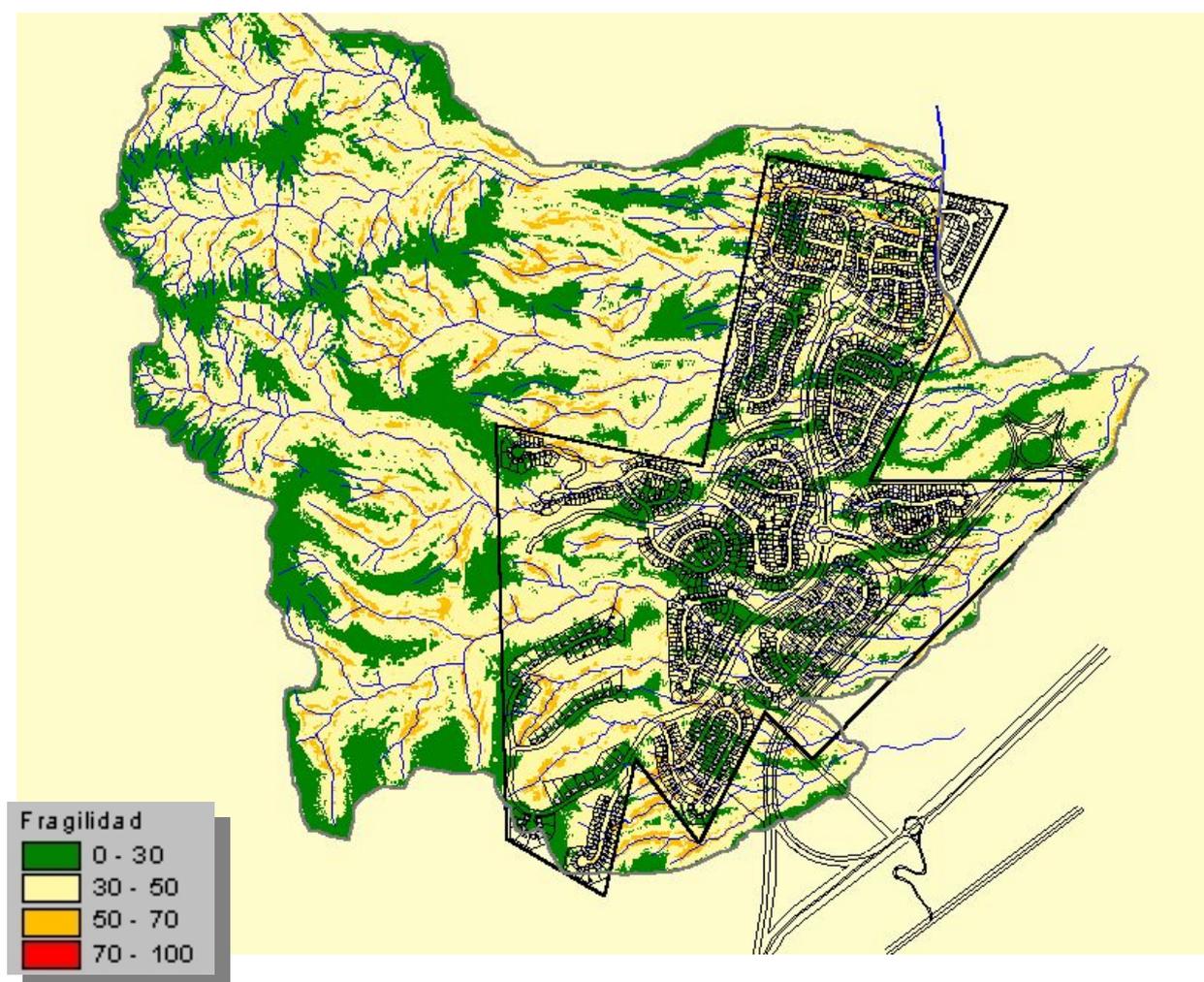


Figura 39. Mapa de Fragilidad del territorio y Escenario N°2 (Lámina 7)

Como uno de los objetivos específicos era la determinación de una metodología de restricción de loteo que se fundamentara en el análisis espacial de variables que influyeran en el escurrimiento, es que este indicador de fragilidad junto con los mapas de movimientos de suelos, de interrelación de lotes con cauces de 3° orden (Figura 40) y el de pendiente media por lote sirvieron para restringir la urbanización no convencional propuesta como sistema de loteo sustentable.

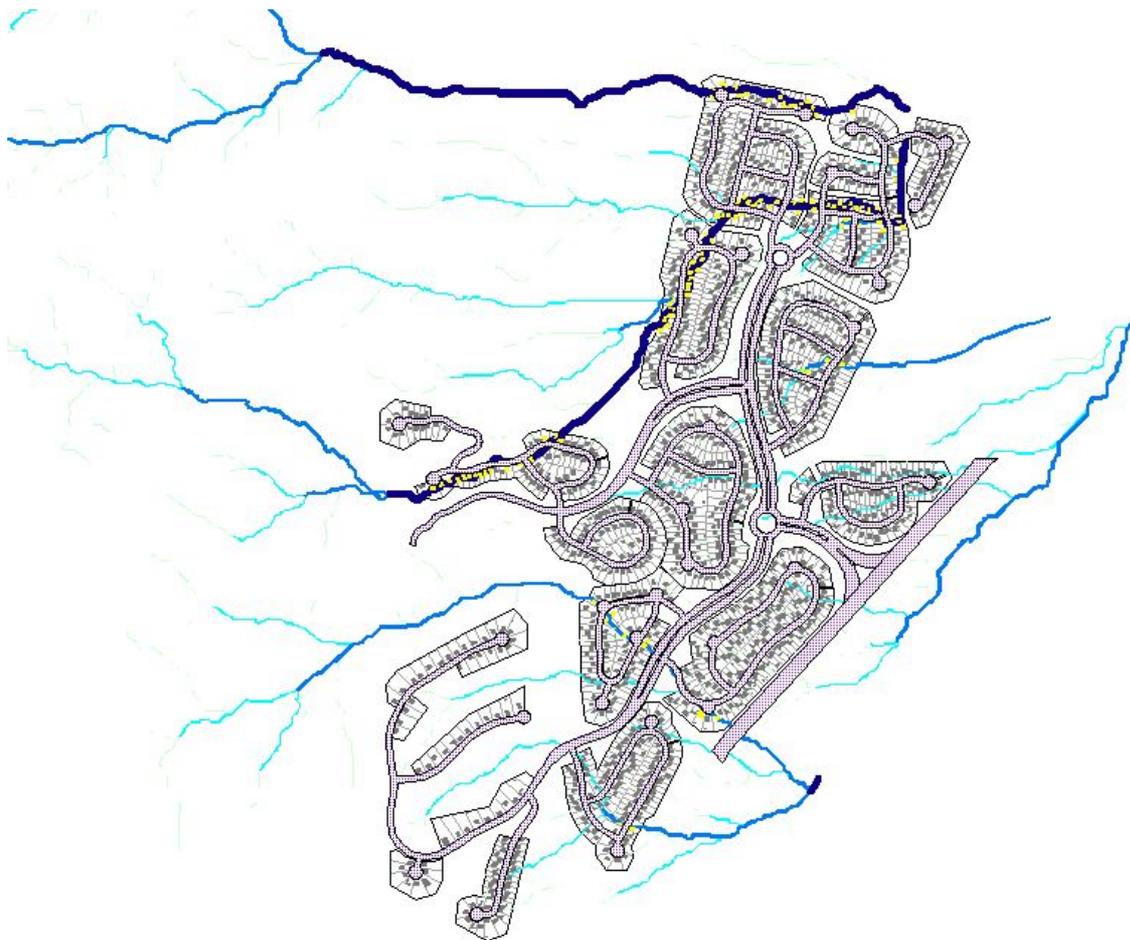


Figura 40. Mapa de Interrelación entre lotes y cauces de 3° orden (Lámina 8)

Una de las premisas para considerarlo sustentable hidrológicamente fue que el escurrimiento producido por el escenario urbanizado sea como máximo el producido por las cuencas en estado natural para un tiempo de retorno de 5 años ($Q_{\text{máx}} \text{ escen. } 1_{\text{TR}=5} = Q_{\text{máx}} \text{ escen. } 4_{\text{TR}=5}$).

Este criterio se propone considerando que el tiempo de recurrencia de 5 años es internacionalmente aceptado para el diseño de los elementos que componen los sistemas menores de drenaje, los cuales son los más sensibles a las actividades de la población cuando son superados en su capacidad.

5.3.4.2. Análisis de lotes vs pendientes

Se determinó el histograma de frecuencias de los lotes por pendientes clasificadas por medio de una tabulación cruzada entre el mapa distribuido de pendientes y los lotes de los escenarios 2 y 3 (Tabla 19 y Figura 41).

Tabla 19. Cantidad de lotes por clase de pendiente.

	<i>Escenario Nº2</i>	<i>Escenario Nº3</i>
<i>Pendientes %</i>	<i>Cantidad de Lotes</i>	
0	0	0
2	0	61
5	257	979
10	608	1593
15	112	416
20	61	229
25	40	203
30	28	150
35	22	107
40	17	108
45	18	141
50	8	160
>50	4	489

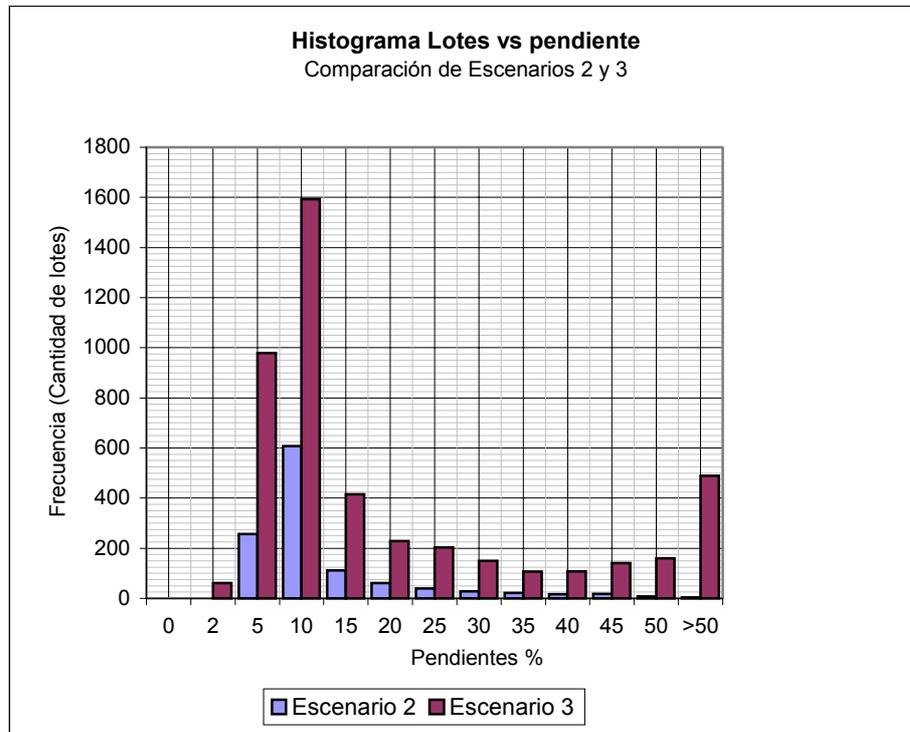


Figura 41. Histograma de lotes vs pendientes

En la Figura 41 se puede visualizar claramente la enorme diferencia de cantidad de lotes entre los Escenarios N°s. 2 y 3.

5.3.4.3. Movimiento de suelos

Partiendo del M.D.E. original y el proyectado para el Escenario N°2, se pudo confeccionar un mapa de movimientos de suelo expresado tanto en volumen (m^3) como en desviación estándar debido a la diferencia entre el terreno natural y el proyectado. En la Figura 42 se presentan en color azul los terraplenes y en rojo los desmontes a realizarse.

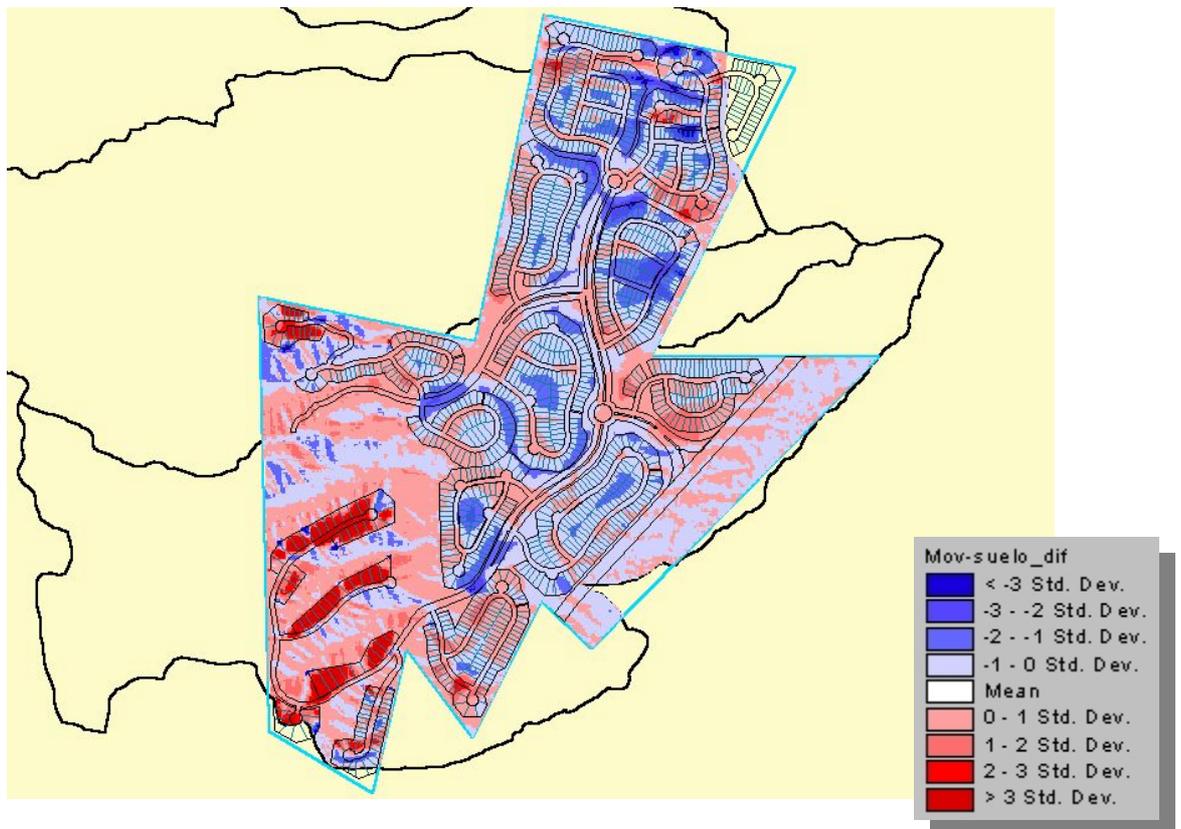


Figura 42. Mapa de movimientos de suelo

Asimismo se realizaron perfiles transversales automáticos desde el S.I.G. (Figura 43) para los Escenarios N°s. 2 y 3, de manera de obtener un análisis de movimiento de suelos a nivel de lote.

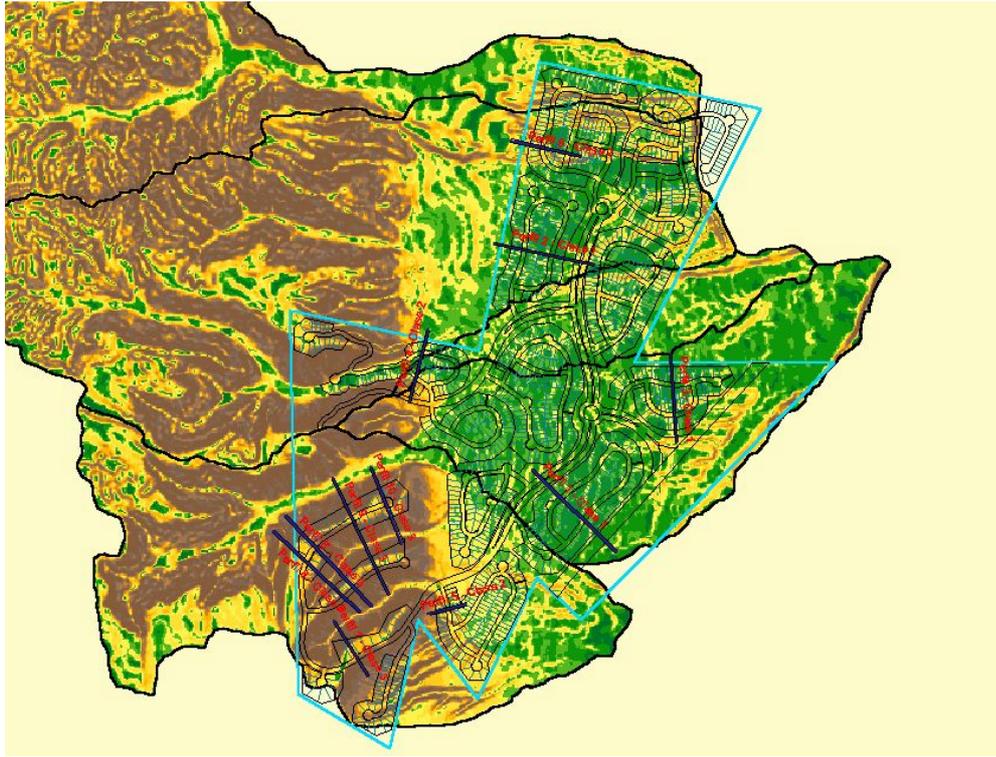
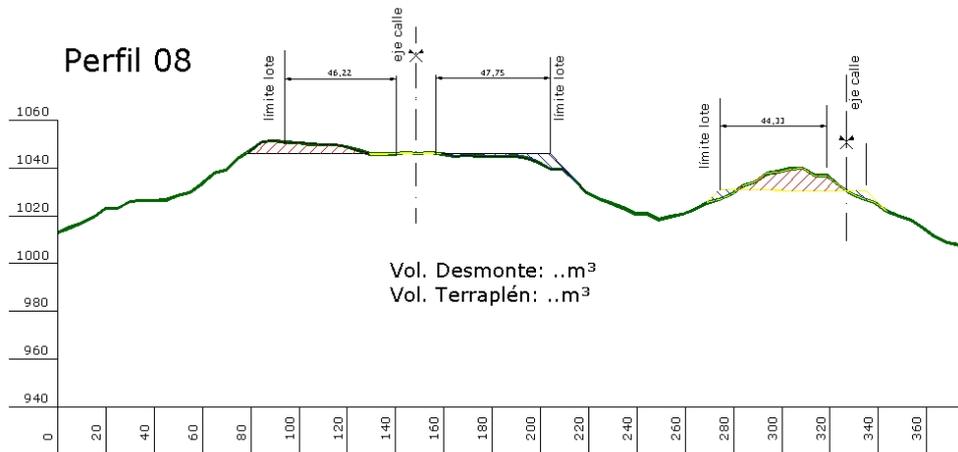


Figura 43. Ubicación de perfiles transversales. Escenario N° 2

Los perfiles transversales, como los de la Figura 44, permitieron el cálculo de terraplén o desmonte medio por lote, determinados a través de la medición de las áreas de desmonte (marcadas en rojo en la Figura 43) y las áreas de terraplén (marcadas en azul en la Figura 43) por unidad de lote representativo. Se definieron tres clases de zonas para perfilar dependiendo de la pendiente media.



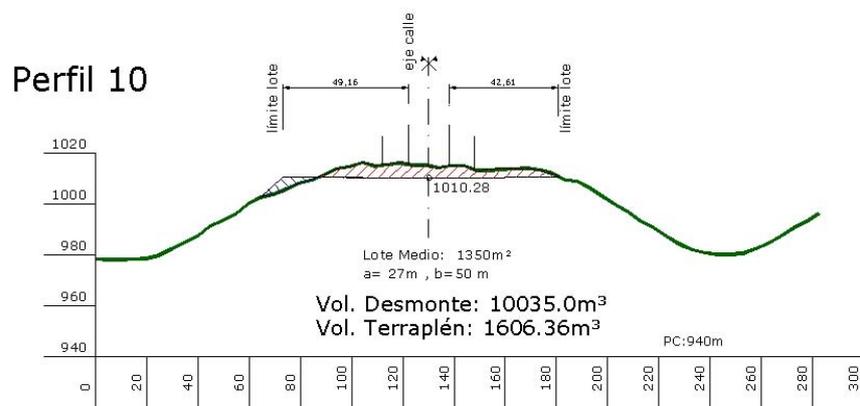
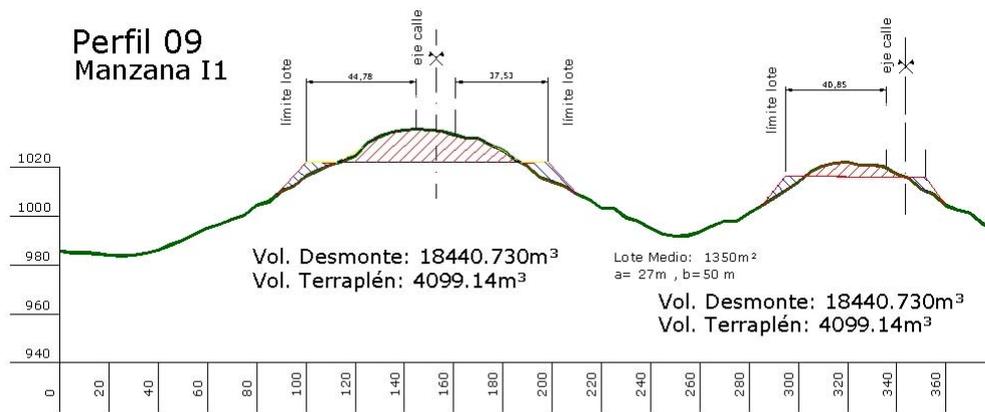


Figura 44. Perfiles transversales de clase 3 (pendiente de 36 a 84%)

El análisis se completó por medio de una planilla de cálculo (Tabla 20), comparando los Escenarios N^os. 2 y 3.

Tabla 20. Resumen de movimientos de suelo para Escenarios N° 2 y N° 3

Escenario N° 2						Escenario N° 3				
CLASE (pendiente)	VOLUMEN REPRESENTATIVO / LOTE		Cant. Lotes/clase	Volumen final		VOLUMEN REPRESENTATIVO / LOTE		Cant. Lotes/clase	Volumen final	
	Desmonte	Terraplén		Desmonte	Terraplén	Desmonte	Terraplén		Desmonte	Terraplén
	[m³]	[m³]		[Hm³]	[Hm³]	[m³]	[m³]		[Hm³]	[Hm³]
1 (0-18%)	1257.11	1239.45	1244	1.56	1.54	466.26	640.28	3433	1.60	2.20
2 (18-36%)	3091.38	1572.04	111	0.34	0.17	436.12	795.52	612	0.27	0.49
3 (36-84%)	3151.89	3110.21	46	0.14	0.14	2892.22	3151.71	908	2.63	2.86
			$\Sigma=$ 1400	2.05	1.86			$\Sigma=$ 4952	4.49	5.55

5.3.5 Escenario N° 4

Este escenario surge de la necesidad de encontrar métodos de evaluación y restricción de loteo de forma tal que verifique la sustentabilidad hidrológica es decir que para TR= 5 años el caudal máximo correspondiente al Escenario N°4 sea igual al caudal máximo correspondiente al Escenario N°1 ($Qp4_{TR=5} = Qp1_{TR=5}$).

Como se puede apreciar existe una alta incidencia de los loteos convencionales frente a los loteos no convencionales. Pero dentro de estos últimos es aún viable restringir o marcar pautas para que se cumpla con la sustentabilidad hidrológica.

Una de las pautas que se ha considerado para elaborar el Escenario N°4 es la de tener en cuenta el Índice de Fragilidad explicitado en 5.3.4.

Mediante mapas de fragilidad (en función de las variables CN, pendiente, distancia a cauces, movimiento de suelos) se determinaron zonas de restricción de loteo que dio lugar a una transformación de cuencas urbanas en rurales debido a la eliminación de algunas manzanas o una disminución del porcentaje impermeabilizado de la cuenca urbana (Figura 45).

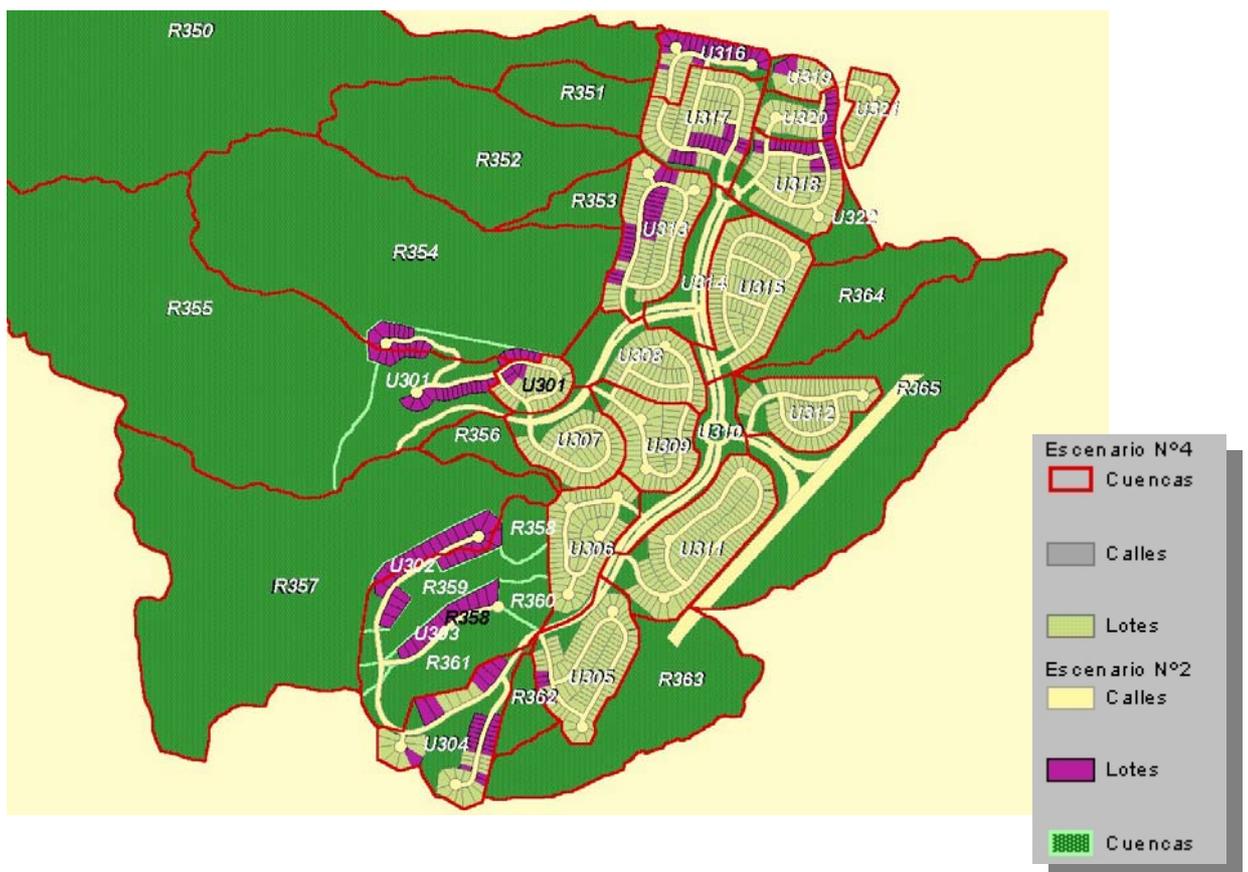


Figura 45. Comparación entre Escenarios N°2 y N°4 y delimitación de cuencas urbanas y rurales del Escenario N°4 (Lámina 9)

La relación N° de lotes/ha en función de la pendiente se puede visualizar en al Figura 46.

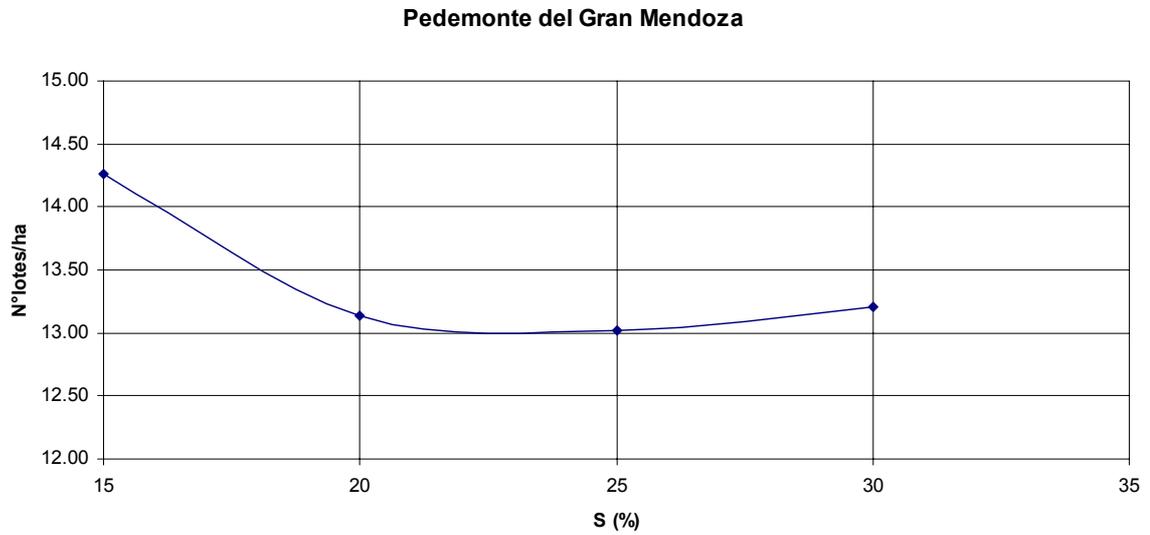


Figura 46. Cantidad de lotes por ha en el Escenario N°4 en función de la pendiente

Una vez delimitadas las cuencas tanto rurales como urbanas (Figura 45), se determinaron los parámetros morfométricos mediante análisis espacial con el S.I.G. (Tabla 21).

Tabla 21. Parámetros morfométricos del Escenario N° 4

CUENCAS RURALES											
Nombre	Area (km²)	Perímetro (m)	Cota máx (m)	Cota min (m)	Recorrido más largo (m)	Pendiente (m/m)	% Imperm.	INFILTRACION		Dif. Elevac. [m]	Long. cauce [km]
								CN	Abstracc. Inicial [mm]		
R350	0.999	5738	1075.0	937.0	2186	0.063	0.0%	78.85	10.2	138.0	2.186
R351	0.066	1149	970.0	935.0	419	0.084	0.0%	69.81	13.3	35.0	0.419
R352	0.232	2269	1055.0	935.0	986	0.122	0.0%	75.26	11.4	120.0	0.986
R353	0.035	1079	965.0	935.0	284	0.106	0.0%	69.40	13.4	30.0	0.284
R354	0.508	3300	1075.0	941.0	1345	0.100	0.0%	77.07	10.8	134.0	1.345
R355	0.734	4606	1075.0	969.6	1795	0.059	0.0%	79.16	10.1	105.5	1.795
R356	0.034	1084	1034.0	966.0	231	0.294	0.0%	78.14	10.4	68.0	0.231
R357	0.582	4379	1077.0	963.0	1614	0.071	0.0%	78.76	10.2	114.0	1.614
R358	0.218	2081	1060.5	964.0	649	0.149	0.0%	77.49	10.7	96.5	0.649
R362	0.027	813	984.0	957.0	195	0.139	0.0%	73.06	12.1	27.0	0.195
R363	0.182	2390	991.0	928.0	937	0.067	2.5%	70.27	13.1	63.0	0.937
R364	0.110	1849	938.0	903.0	686	0.051	0.0%	69.12	13.5	35.0	0.686
R365	0.378	4399	941.5	897.0	1551	0.029	12.1%	72.37	12.4	44.5	1.551

CUENCAS URBANAS

Nombre	Area (Ha)	Perímetro (m)	Cota máx (m)	Cota min (m)	AREA PERMEABLE					AREA IMPERMEABLE				
					CN	Abstracc. Inicial [mm]	Plano de Escurrimiento			Prop. Área direct. Conectada	Prop. Área Total	Plano de Escurrimiento		
							Pend. [%]	Long. [m]	Coefic. Rugosid.			Pend. [%]	Long. [m]	Coefic. rugosidad
U301	3.07	703	969.3	959.4	75	11.5	4.1	240	0.25	23.7%	40.9%	4.1	240	0.02
U304	9.70	1621	1045.0	970.0	75	11.5	15.8	476	0.25	15.7%	20.9%	15.8	476	0.02
U305	8.86	1272	970.0	943.0	75	11.5	4.4	612	0.25	22.9%	38.9%	4.4	612	0.02
U306	7.36	1257	963.0	951.0	75	11.5	2.6	469	0.25	20.8%	34.0%	2.6	469	0.02
U307	6.51	1046	980.0	955.0	75	11.5	4.5	550	0.25	22.2%	35.9%	4.5	550	0.02
U308	7.68	1250	957.5	941.0	75	11.5	3.6	462	0.25	20.6%	32.3%	3.6	462	0.02
U309	6.20	1092	957.0	943.0	75	11.5	2.5	565	0.25	17.5%	34.7%	2.5	565	0.02
U310	5.09	1524	955.5	934.0	75	11.5	3.9	551	0.25	47.5%	47.5%	3.9	551	0.02
U311	11.74	1513	959.0	933.0	75	11.5	3.5	739	0.25	18.9%	38.2%	3.5	739	0.02
U312	6.92	1171	934.5	919.0	75	11.5	3.3	471	0.25	18.3%	35.8%	3.3	471	0.02
U313	9.01	1350	947.0	931.5	75	11.5	2.6	588	0.25	19.0%	32.2%	2.6	588	0.02
U314	4.98	1358	948.0	928.0	75	11.5	3.9	511	0.25	44.5%	44.5%	3.9	511	0.02
U315	10.26	1413	944.0	930.0	75	11.5	2.7	510	0.25	21.6%	38.8%	2.7	510	0.02
U316	3.79	1037	940.0	925.0	75	11.5	3.8	395	0.25	20.3%	25.5%	3.8	395	0.02
U317	8.41	1260	940.0	925.0	75	11.5	3.6	417	0.25	20.6%	32.8%	3.6	417	0.02
U318	7.47	1087	928.0	915.0	75	11.5	2.7	483	0.25	21.3%	30.7%	2.7	483	0.02
U319	1.98	571	928.0	915.0	75	11.5	6.2	211	0.25	13.0%	23.1%	6.2	211	0.02
U320	2.94	754	929.0	917.0	75	11.5	5.0	242	0.25	20.2%	29.9%	5.0	242	0.02
U321	2.82	764	916.0	911.0	75	11.5	1.8	278	0.25	19.5%	39.1%	1.8	278	0.02
U322	2.45	813	931.0	914.0	75	11.5	4.2	408	0.25	0.0%	0.0%	4.2	408	0.02

5.3.5.1. Hidrología

Con los parámetros así determinados y con las tormentas de TR= 2, 5 y 10 años se corrió el modelo ARHYMO bajo el siguiente esquema de modelación (Figura 47).

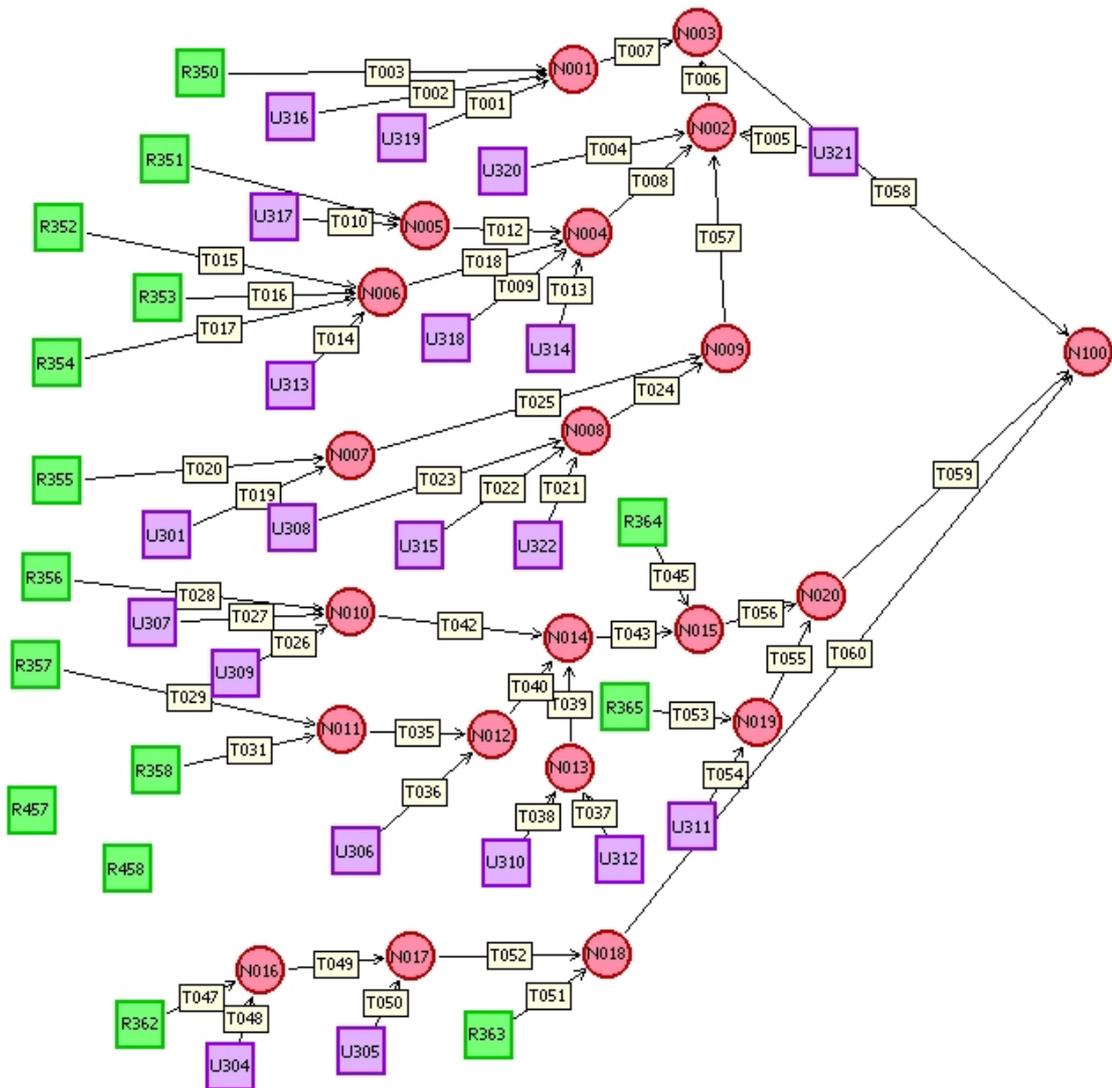


Figura 47. Topología de cálculo en modelo ARHYMO del Escenario N°4

Los resultados de las corridas del modelo ARHYMO, ya calibrado, en el Nodo 100 se pueden apreciar en los valores característicos del escurrimiento de la Tabla 22 y en los hidrogramas de la Figura 48.

Como última restricción se consideró que el porcentaje directamente conectado de las cuencas urbanas sea nulo (la escorrentía de la cuenca urbana desagua e infiltra totalmente en la parte permeable de la misma)

Tabla 22. Resumen de los resultados de la modelación hidrológica para el Escenario N°4

TR2	Qp (m³/s)	24.71
	Tp (hs)	0.74
	V (Hm³)	0.061
TR5	Qp (m³/s)	51.27
	Tp (hs)	0.72
	V (Hm³)	0.117
TR10	Qp (m³/s)	69.49
	Tp (hs)	0.71
	V (Hm³)	0.153

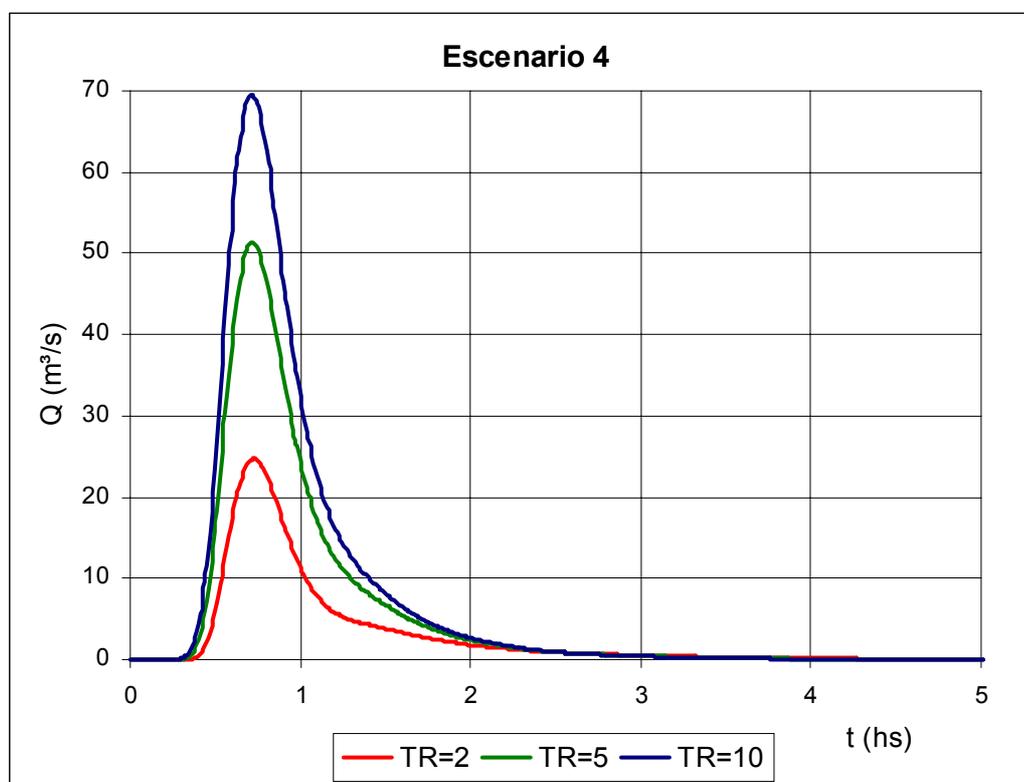


Figura 48. Hidrogramas de TR= 2, 5 y 10 años en el Nodo 100 para el Escenario N°4

5.3.6 Escenario N° 5

Este escenario surge debido a que con las restricciones realizadas para el Escenario N°4 no se logra alcanzar la sustentabilidad hidrológica.

Se lograron reducir los caudales pico considerando 11 embalses de retención, ubicados estratégicamente (Figuras 49 y 50) dentro de los límites del loteo, los cuales fueron dimensionados con ARHYMO mediante la analogía de boca de tormenta considerando caudal pasante y caudal derivado (este último es el que ingresa al embalse).

En la Tabla 23 figuran las dimensiones de los embalses de retención necesarios para cumplir el criterio de que para TR= 5 años el caudal máximo correspondiente al Escenario N°5 sea igual al caudal máximo correspondiente al Escenario N°1 ($Q_{p5_{TR=5}} = Q_{p1_{TR=5}}$).

Tabla 23. Dimensiones de los embalses

Embalse Nro	Area [Ha]	Vol [Hm ³]	h nec [m]
1	0.50	0.005	0.99
2	0.18	0.002	1.11
3	0.46	0.005	1.10
4	0.66	0.007	1.07
5	0.39	0.005	1.30
6	0.11	0.001	0.95
7	0.15	0.002	1.30
8	0.14	0.002	1.43
9	0.74	0.009	1.22
10	0.18	0.002	1.13
11	0.25	0.003	1.18

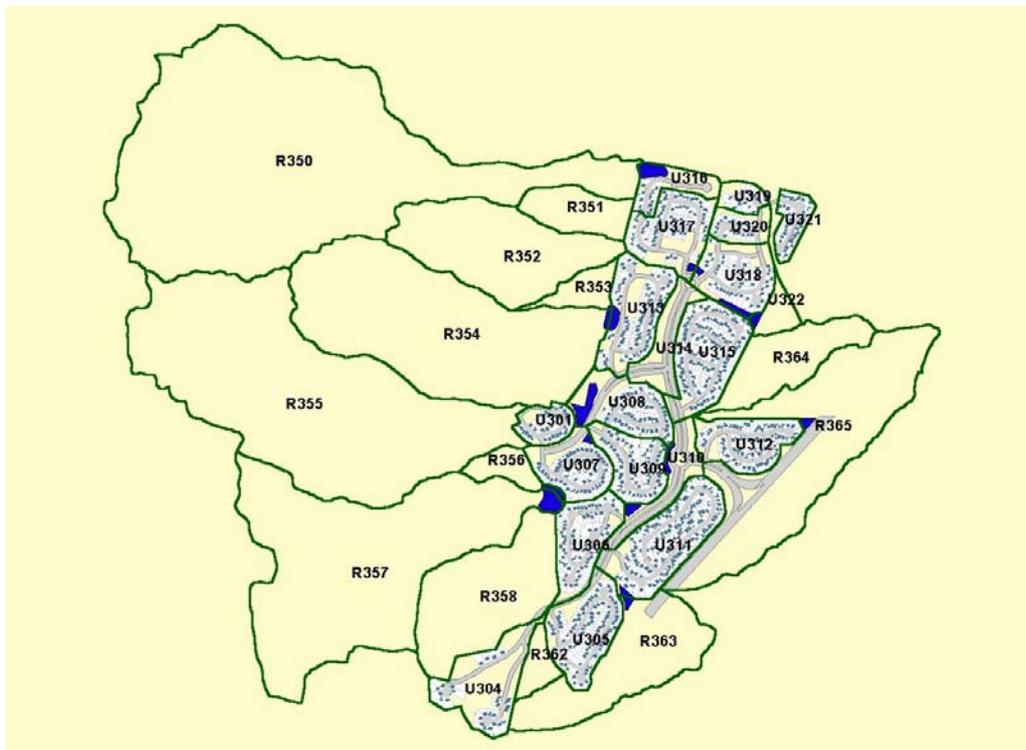


Figura 49. Cuencas rurales y urbanas del Escenario N°5 con embalses de retención (Lámina 10)

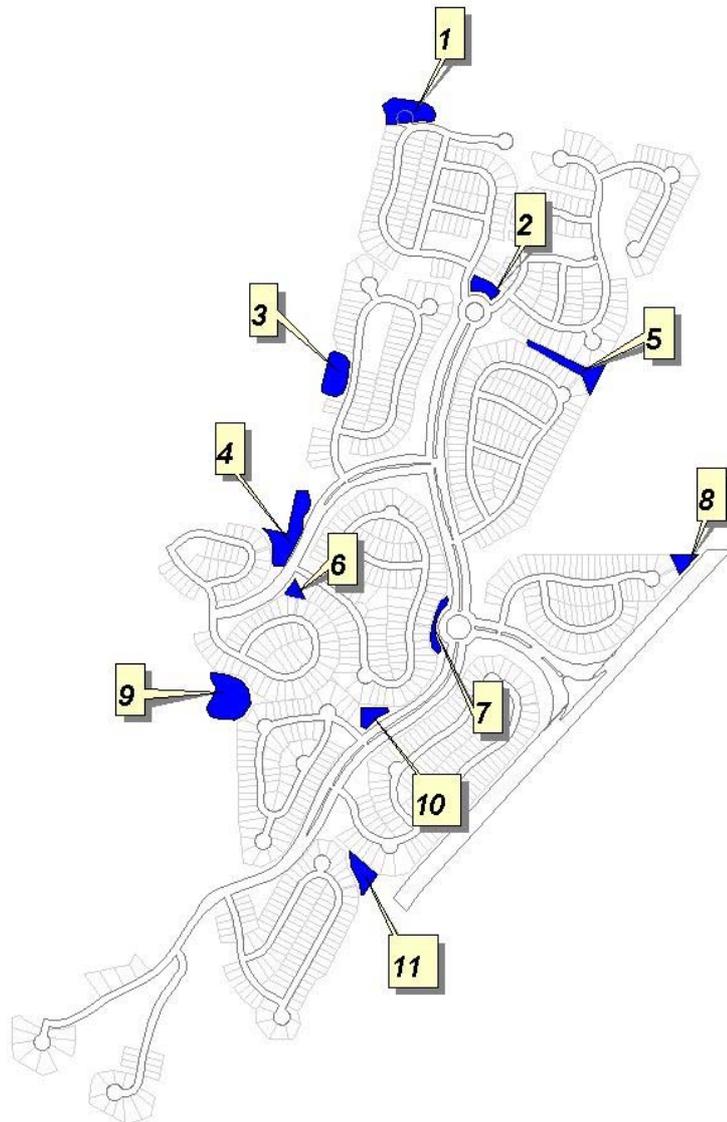


Figura 50. Ubicación de embalses de retención

Con los parámetros morfométricos iguales a los del Escenario N°4 y con las tormentas de TR= 2, 5 y 10 años se corrió el modelo ARHYMO bajo el siguiente esquema de modelación (Figura 51).

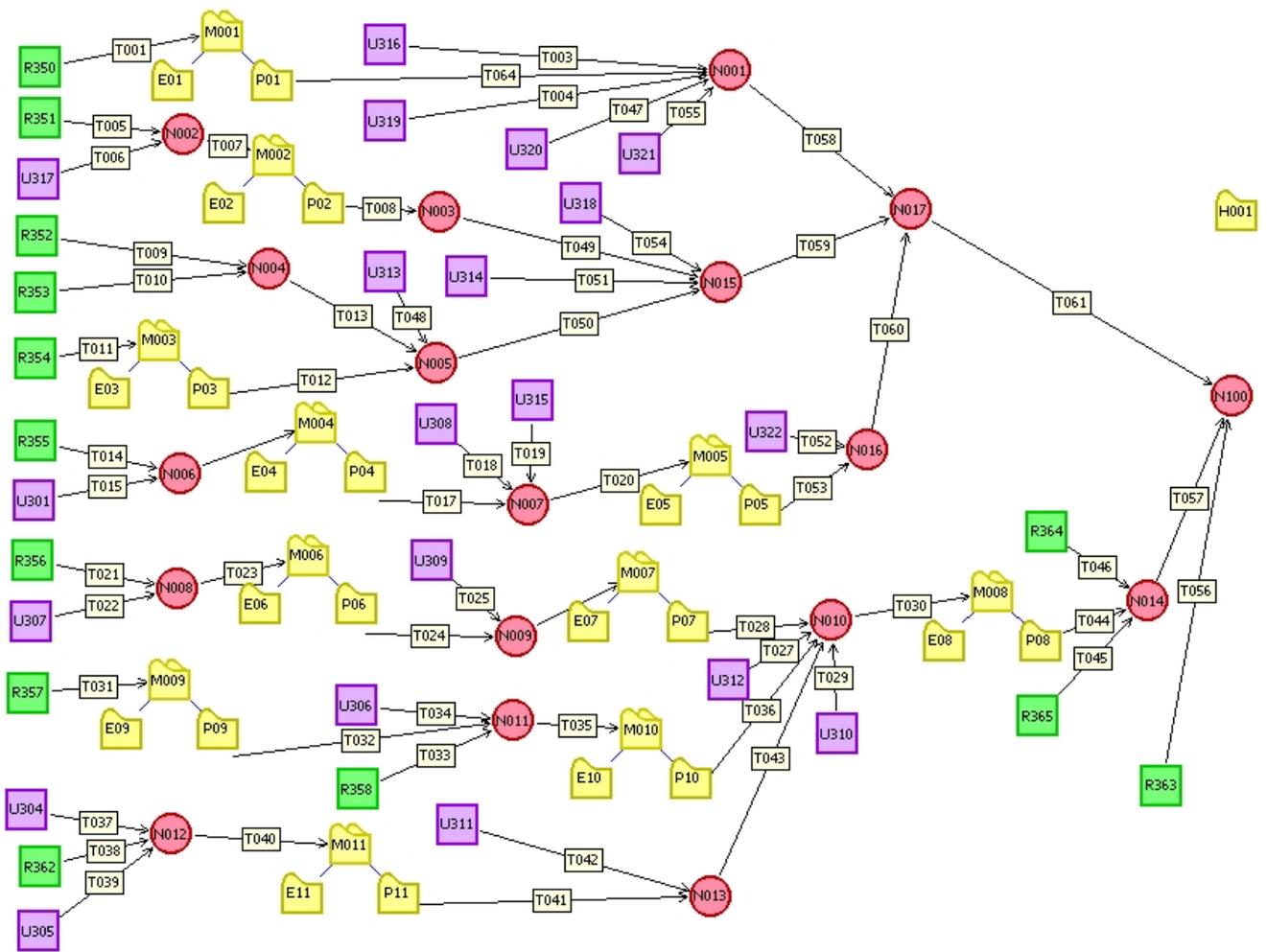


Figura 51. Topología de cálculo en modelo ARHYMO del Escenario N°5

Los resultados de las corridas del modelo ARHYMO, ya calibrado, en el Nodo 100 se pueden apreciar en los valores característicos del escurrimiento de la Tabla 24 y en los hidrogramas de la Figura 52.

Tabla 24. Resumen de los resultados de la modelación hidrológica para el Escenario N°5

TR2	Qp (m ³ /s)	13.80
	Tp (hs)	0.74
	V (Hm ³)	0.024
TR5	Qp (m ³ /s)	40.05
	Tp (hs)	0.72
	V (Hm ³)	0.068
TR10	Qp (m ³ /s)	58.40
	Tp (hs)	0.71
	V (Hm ³)	0.101

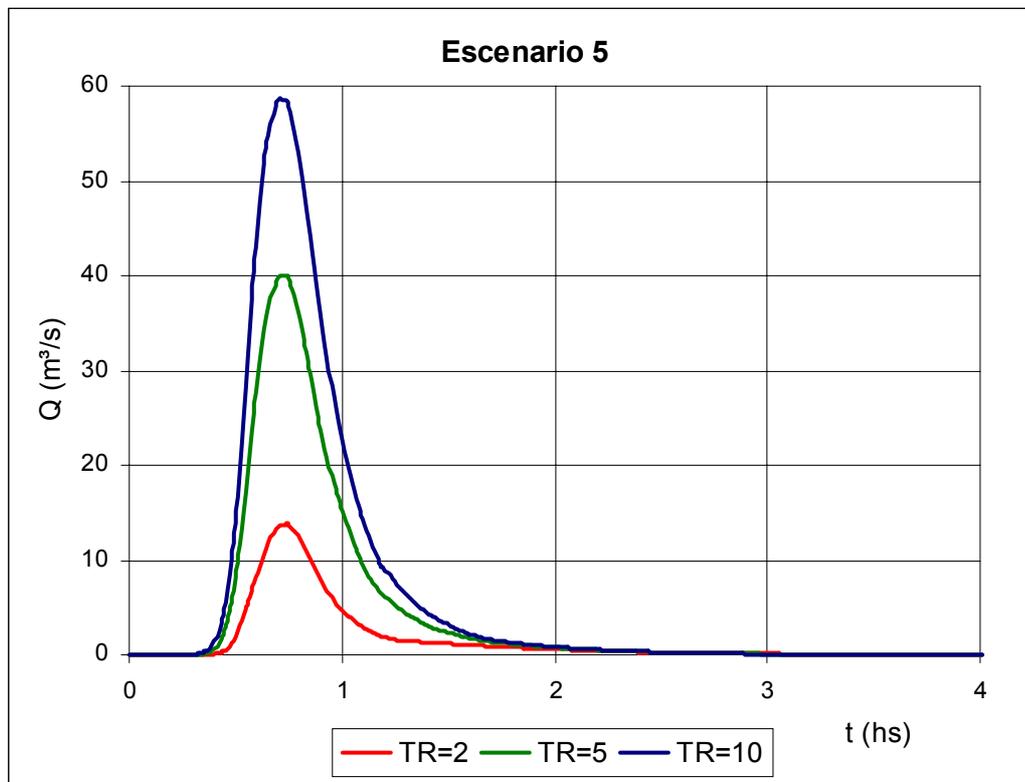


Figura 52. Hidrogramas de TR= 2, 5 y 10 años en el Nodo 100 para el Escenario N°5

6. CONCLUSIONES

Se ha podido verificar el elevado impacto hidrológico que produce una urbanización convencional sobre el terreno natural ($Q_{p3_{TR=5}}$ es 87.5% mayor que $Q_{p1_{TR=5}}$) (Figura 54).

Se ha comprobado que urbanizaciones del tipo del Escenario N°2 tienden a disminuir el riesgo hidrológico aguas abajo ($Q_{p2_{TR=5}}$ es 30% mayor que $Q_{p1_{TR=5}}$) (Figura 54), pero que no es suficiente para que se logre un escurrimiento que no afecte la infraestructura del sistema de drenaje de aguas abajo.

Las modificaciones introducidas en el marco del Escenario N°4 no tienen un gran impacto en la disminución del escurrimiento ($Q_{p2_{TR=5}}$ es 5% mayor que $Q_{p4_{TR=5}}$) (Figura 54) debido a que el escurrimiento generado en los sectores rurales, que fueron anteriormente urbanos, tienen un tiempo de concentración que, en combinación con el resto de las cuencas, produce caudales pico mayores.

La solución de los embalses de retención considerada en el Escenario N°5 ha resultado eficiente para alcanzar el criterio de sustentabilidad hidrológica aumentando ínfimamente el costo de la urbanización (son excavaciones con una pequeña obra de alivio a efectos de conducir ordenadamente los excedentes ya que no hay terraplén que defender).

Son de resaltar las siguientes comparaciones, como se pueden apreciar en las Figuras 53, 54 y 55 los hidrogramas de escurrimiento en el Nodo 100 (punto de recolección de todas las cuencas involucradas):

- para TR= 5 años $Q_{p5_{TR=5}} = Q_{p1_{TR=5}}$.
- para TR= 2 años $Q_{p5_{TR=2}}$ es 30% menor que $Q_{p1_{TR=2}}$
- para TR= 10 años $Q_{p5_{TR=10}}$ es 9% mayor que $Q_{p1_{TR=10}}$
- para TR= 2, 5 y 10 años es notable la diferencia del Escenario N°3 con respecto a los otros escenarios considerados

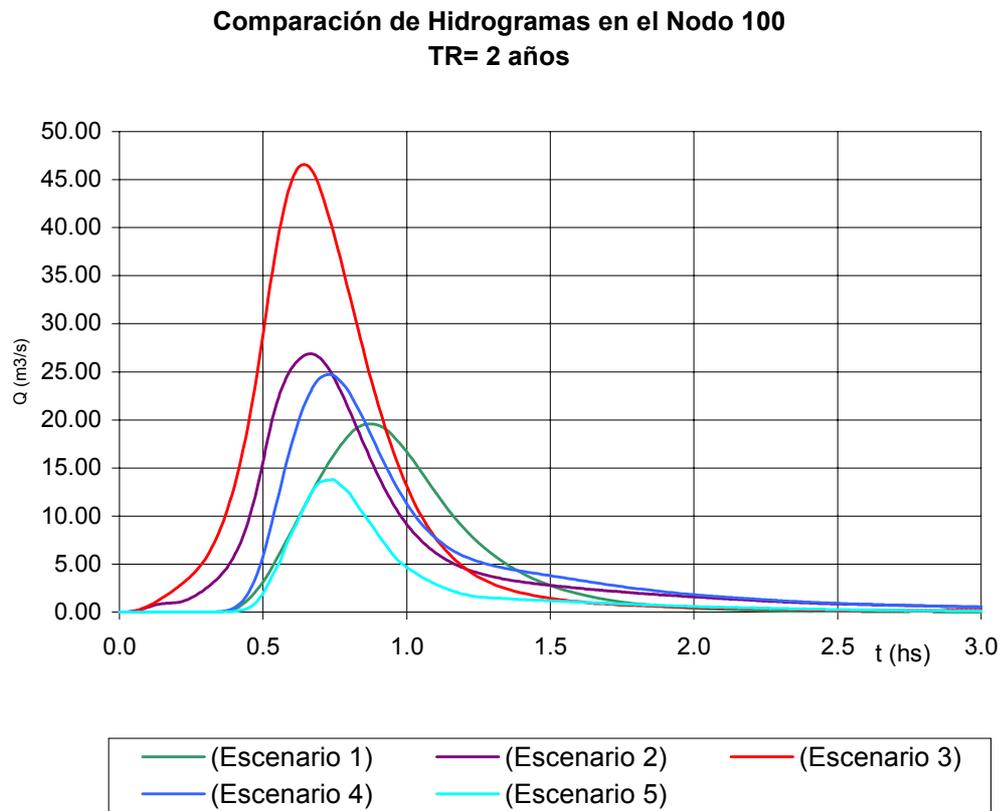


Figura 53. Comparación de hidrogramas de distintos escenarios para TR= 2 años

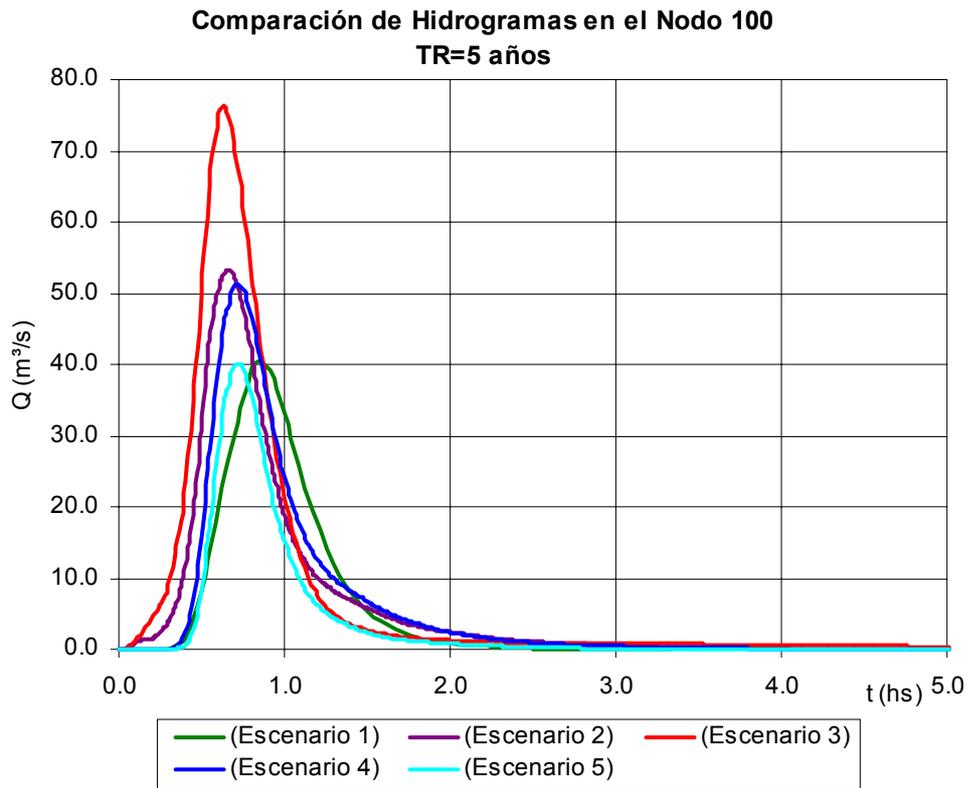


Figura 54. Comparación de hidrogramas de distintos escenarios para TR= 5 años

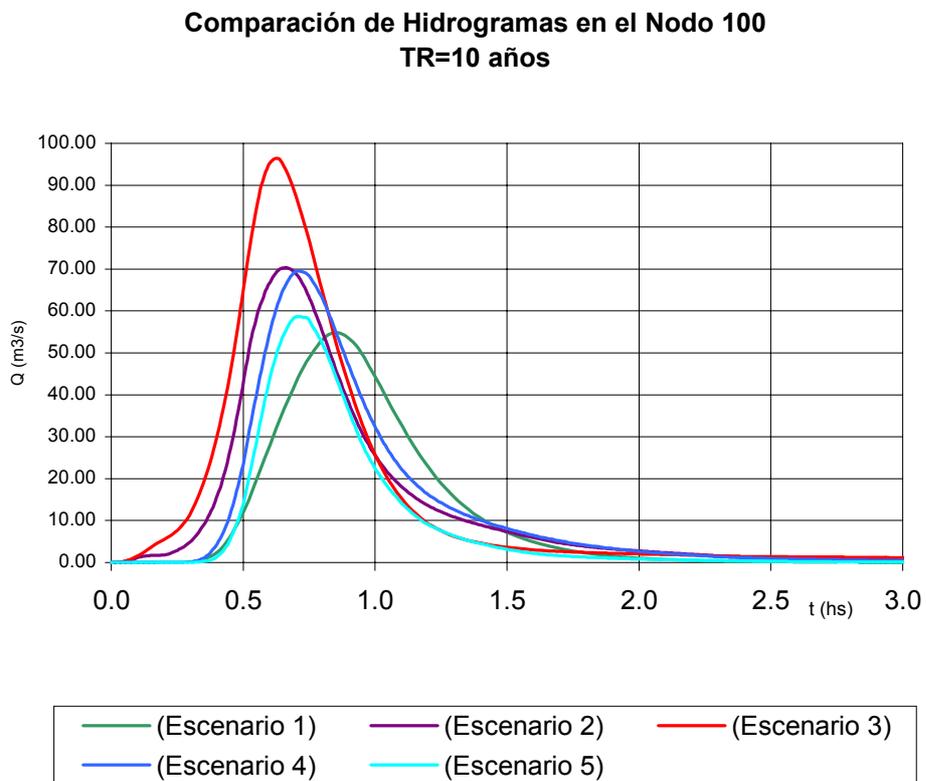


Figura 55. Comparación de hidrogramas de distintos escenarios para TR= 10 años

Para poder alcanzar la condición de sustentabilidad hidrológica ha sido necesario realizar una serie de acciones que confluyen a que la urbanización minimice su impacto sobre el terreno natural. Tales acciones también contribuyen a una acentuada aproximación a la sustentabilidad de otros, no menos importantes, aspectos ambientales (flora, fauna, etc.).

7. BIBLIOGRAFÍA ANTECEDENTE Y DE CONSULTA

- **Arnold, C.L., C.J. Gibbons** "*Impervious surface coverage. The emergence of a key environmental indicator*". Journal of the American Planning Association, Vol. 62, N° 2, Chicago, U.S.A.,1996
- **Bosque S. J., Escobar F.J., García E., Salado M.J.,** "*Sistemas de Información Geográfica: Prácticas con ARC/INFO e IDRISP*", Addison-Wesley Iberoamericana., 1994
- **Brena Zepeda, J.E. y González Verdugo, J.A** "*Manejo digital de información geográfica para el apoyo a planeación de los recursos en cuencas hidrográficas*" Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2000
- **Burgues S.J., M.S. Wigmosta, J.M. Meena** "*Hydrological effects of land-use change in a zero-order catchment*". ASCE, Journal of Hydrological Engineering, Vol. 3, N° 2, April, 1998
- **Cazorzi, Federico** "*Woditem HyGrid2k2 – Guida de riferimento*". Università degli studi di Udine, 2002
- **Domínguez Cortazar et al.** "*Los sistemas de información geográfica y su utilización en la modelación hidrológica*" Universidad Autónoma de Querétaro, México, 1999
- **Dourojeanni, A., A. Jouravlev** "*Gestión de cuencas y ríos vinculados con centro urbanos*". CEPAL,LC/R 1948, Santiago de Chile, diciembre de 1999
- **Felicísimo, Angel Manuel.** "*Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*". 220 p. Pentalfa Ediciones, Oviedo, 1994
- **Felicísimo, Angel Manuel** "*Descripción y análisis del relieve*" "*Simulación de procesos: cuencas hidrológicas y cuencas visuales*" Cap. 4 y 5, 1997
- **Fornero, Luis,** Aldo Pavese, Jorge Maza, Diego Vega "*Actualización del modelo hidrológico ARHYMO*". Congreso Nacional del Agua, Carlos Paz, Córdoba, 2002
- **Gibbons, J.** "*Addressing imperviousness in plans, site design and land use regulations*". Nonpoint Education for Municipal Officials (NEMO), Univ. of Connecticut, Technical Paper No 1, 1999
- **Gómez Garzón, Alfredo,** "*Caracterización del medio físico de la cuenca del río Tembembe empleando Sistemas de Información Geográfica*" Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje, 1999
- **Hydrologic Engineering Center** HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension, (2000) "*User's Manual*" US Army Corps of Engineers .
- **Jansle Vieira Rocha** "*El sistema de informaciones Geográficas (SIG) en los contextos de planificación del medio físico y de las cuencas hidrográficas*". Trabajo presentado en el II curso internacional de aspectos geológicos de protección ambiental, Cap. 7 pag 102-113, 2000
- **Martínez Álvarez et al** "*Modelos hidrológicos distribuidos para la determinación de la escorrentía superficial en pequeñas cuencas no aforadas*" Departamento de Proyectos y Planificación Rural, Universidad Politécnica de Madrid. España, 1998

- **Maza, Jorge** "*Apuntes de Hidrología Urbana*". Trabajo en cumplimiento del Curso CE-695 (Estudio Independiente en Hidrología Urbana) de la Universidad del Estado de Colorado, Fort Collins, Colorado EEUU. Año 1986
- **Maza, Jorge; L. Fornero; C. Litwin y P. Fernández.** , "*ARHYMO. Manual del Usuario. INCyTH-CRA. Mendoza*" , 1993
- **Maza, J.; P. Fernández** "*Desagües Pluviales Urbanos y Criterios para la Extensión Edilicia en la Zona Pedemontana de Mendoza*" pág. 119 a 123 en "Mendoza en el 2000. Proyecto de Ordenamiento Territorial para la Provincia". Ed. por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, 1994.
- **Maza, J.** "*Propuesta de Manual Municipal de Drenaje Urbano*" Resumen publicado en XV Jornadas de Investigaciones y III Jornadas Regionales de Investigación. Universidad Nacional de Cuyo. 7-11 de agosto de 1995.
- **Maza, J.; P. Fernández; A. Vargas A.; L. Fornero; D. Trípodí; H. Yañez; M. Nuñez** "*Estudios Hidrológicos e Hidráulicos para el Ordenamiento Territorial de una Cuenca*". pág. 31 a 44 de la Revista INGENIERIA del AGUA N° 1 Vol. 2 (Valencia, España). 1995.
- **Maza, J.** "*Recopilación de Pautas y Aspectos Estructurales y No Estructurales para la Solución del Drenaje Pluvial Urbano*". Publicado en Documentos del Curso Desarrollo y Gestión de Cuencas Hidrográficas. págs 89 a 97. I.I.L.A. Italia, Roma, 1996
- **Maza J.A., L. Nanía** "*Sustentabilidad Hidrológica en el Desarrollo Urbano Pedemontano*" Libro de Resúmenes del I Seminario de Drenaje Urbano del MERCOSUR, pags.223-228. Porto Alegre, Brasil, julio de 2001
- **Maza J.A., L. Nanía** "*Necesidad de Sustentabilidad Hidrológica en el Desarrollo Urbano del Piedemonte del Gran Mendoza, Argentina*" Libro de Resúmenes del IV Diálogo Interamericano de Gerenciamiento de Aguas, pág. 175 y en CD Trabajo N° 56. Foz do Iguacu, Paraná, Brasil, setiembre de 2001.
- **Nania, Leonardo S.** "*Métodos de transformación lluvia-escorrentía y de propagación de caudales*" Apuntes de Clase de Hidrología Superficial y Subterránea de la Universidad de Granada. ETS de Ingenieros. de caminos, canales y puertos, 2002
- **Olshansky, R.B.** "Planning for Hillside Development". American Planning Association, Planning Advisory Service, Report N° 466, U.S.A., 1996
- **Olshansky, R.B.** "*Planning for Hillside Development*". American Planning Association, Planning Advisory Service, Report N° 466, U.S.A., 1996
- **Ponte, J. R.** "*Mendoza, aquella ciudad de barro*". Editado por la Municipalidad de la Ciudad de Mendoza, Argentina, 1987
- **Tarboton, David y Ames, Daniel** "*Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data*" Paper submitted for presentation at the World Water and Environmental Resources Congress, May 20-24,2001, Orlando, Florida, 2001
- **Vich, A.I., A. Pedrani, E. Grünwald et al.** "*Programa de Investigación y Desarrollo. Manejo Ecológico del Piedemonte*". pág. 125 a 138 en "Mendoza en el 2000. Proyecto de Ordenamiento Territorial para la Provincia". Ed. por la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, 1994.

APÉNDICES

APÉNDICE I. Propuesta de pautas de sustentabilidad hidrológica para la urbanización del pedemonte del Gran Mendoza

APÉNDICE II. Tormenta de proyecto para el área del Gran Mendoza

APÉNDICE I

PROPUESTA DE PAUTAS DE SUSTENTABILIDAD HIDROLOGICA PARA LA URBANIZACION DEL PEDEMONTES DEL GRAN MENDOZA

“Nosotros hacemos nuestras ciudades, luego, ellas nos hacen a nosotros”

Winston Churchill

INTRODUCCIÓN

Como desafortunadamente los objetivos de seguridad, estética y protección ambiental pueden ser conflictivos entre si, una cuidadosa planificación puede tener un rol importante en el desarrollo de la información básica, analizando los inconvenientes e identificando los requerimientos y valores de la comunidad.

El Pedemonte del Gran Mendoza es un sistema de delicado equilibrio ecológico, donde una de las manifestaciones de su alteración, que afectan a los habitantes de aguas abajo, son las crecidas aluvionales.

Para evitar que el Pedemonte del Gran Mendoza se continúe desarrollando sin tener en cuenta los necesarios conceptos de urbanización en áreas con pendientes pronunciadas sobre la base de:

- los antecedentes mencionados anteriormente,
- la experimentación hidrológica realizada en el presente trabajo y
- la experiencia del INA-CRA en estudios de hidrología urbana en diversas partes de la región andina del país

se realiza esta propuesta de pautas que tienen como objetivo:

- que el diseño de cada urbanización sirva para proteger o restaurar la hidrología natural del lugar protegiendo la integridad ecológica de la cuenca
- crear un paisaje “hidrológicamente” funcional utilizando a la hidrología como base de diseño.

Es por lo expresado que los proyectos de urbanización en áreas de pedemonte deben emplear técnicas que reducen el impacto en las superficies, disminuyen la cantidad de calles y pavimentos, maximizan el espacio abierto y minimizan la reestructuración del sistema de drenaje natural

METODOLOGÍA

Estudios básicos

Para el diseño de la urbanización se deberá contar con el siguiente material cartográfico georeferenciado:

- Plano de mensura del sitio de la urbanización
- Planialtimetría general en escala 1:5.000 y equidistancia 5m
- Restitución aerofotogramétrica en escala 1:2.500
- Imagen satelital digital de resolución mínima (píxel) 10x10m
- Relevamientos topográficos de detalle en el sitio de la urbanización de apoyo a la restitución aerofotogramétrica

El material señalado deberá ser procesado en el marco de un S.I.G. y un M.D.E. con la finalidad de conocer:

- La delimitación de cuencas que afectan e involucran al terreno de la urbanización
- Los parámetros morfométricos y red de drenaje de tales cuencas
- La distribución espacial de las pendientes y altitudes (hipsometría)

La imagen satelital digital deberá ser procesada adecuadamente a efectos de obtener la distribución espacial de la cobertura vegetal y del tipo de suelo lo que podrá ser apoyado con la fotografía aérea y con relevamientos a campo.

Con la información así procesada se requerirá la determinación de los hidrogramas de escurrimiento generados por las Tormentas de Proyecto para el Gran Mendoza (INA, 1997) con tiempos de retorno de 2, 5 y 10 años sobre las cuencas en su estado natural que afectan e involucran al terreno de la urbanización.

Se determinará un Índice de Fragilidad (F) para cada píxel basado en la siguiente expresión:

$$F = \frac{(100 - CN) + (100 - D) + S}{3}$$

donde:

F = Índice de Fragilidad (de 0 a 100)

CN= N° de Curva de la metodología del U.S. Soil Conservation Service (actualmente U.S. Natural Resources Conservation Service) que es función del tipo y densidad de la cobertura vegetal, del tipo de suelo y de la condición de humedad antecedente

D = Distancia a red hidrográfica (cauce natural) de cada píxel (m)

S = Pendiente del terreno, en %

Diseño de la urbanización

Teniendo en cuenta la distribución espacial del F, pendientes en el terreno a urbanizar y ubicación de la red natural de drenaje se podrán individualizar las superficies aptas para la

delimitación de los lotes. Se propone no urbanizar en áreas donde: $F > 50$ y/o $D < 30\text{m}$ (cauces de orden 1) y/o $S > 35\%$.

Para cauces de orden superior a 1 se deberá verificar mediante un estudio hidrológico e hidráulico la línea de inundación correspondiente a $TR = 100$ años con la finalidad de comprobar la condición $D < 30\text{m}$.

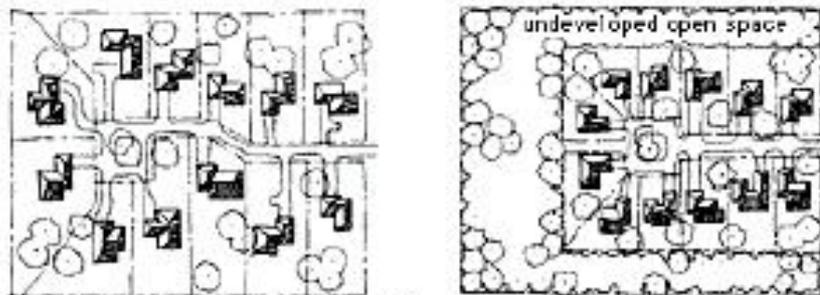
A efectos de verificar que se ha dejado una superficie libre de alteraciones (naturales) se propone aplicar:

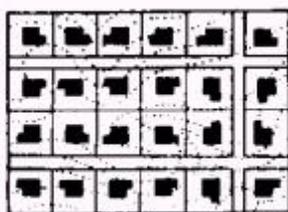
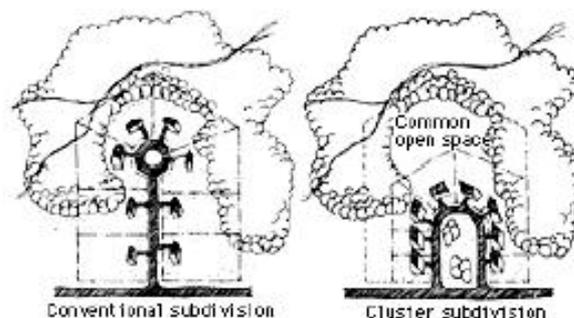
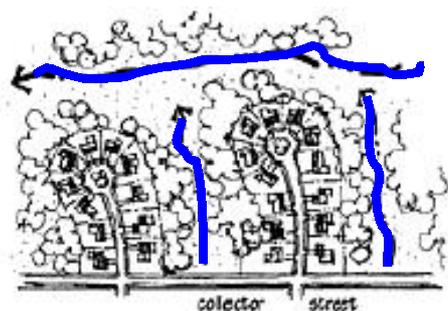
$$\text{Máxima área alterada (\%)} = 74.5 - 1.7 * S(\%) \quad \text{para } 15\% < S < 35\%$$

luego se adoptará la situación de mínima área alterada.

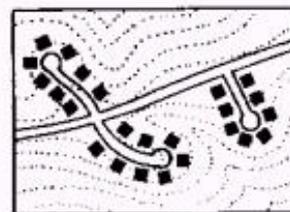
Se propone que se facilite y se incentiven loteos que implementen urbanizaciones con divisiones en forma de *cluster* de manera tal de que existan espacios abiertos (inalterados) comunes (“propiedad de división vertical”), permitiendo así una gran flexibilidad de acomodamiento de las viviendas en función de los accidentes naturales del terreno (pendientes, cauces, áreas vegetadas).

La subdivisión *cluster* (Figura I-1) permite, además de la disponibilidad de espacios abiertos comunes, optimizar el desarrollo de calles y minimizar nivelaciones del terreno.





24 viviendas en una división convencional



24 viviendas en una división tipo "cluster"

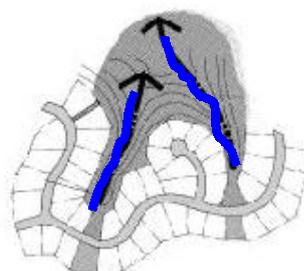


Figura I-1. Ejemplos de aplicación de la división *cluster*

El diseño de la urbanización en la superficie a alterar se realizará contemplando que:

$$N^{\circ} \text{ lotes} / \text{ha} = 14 * e^{-0.024 * S(\%)} \quad \text{para } 15\% < S \leq 35\%$$

donde S= pendiente.

y considerando que para S>35% no se admite urbanización.

En la Figura I-2 se puede observar gráficamente la relación propuesta.

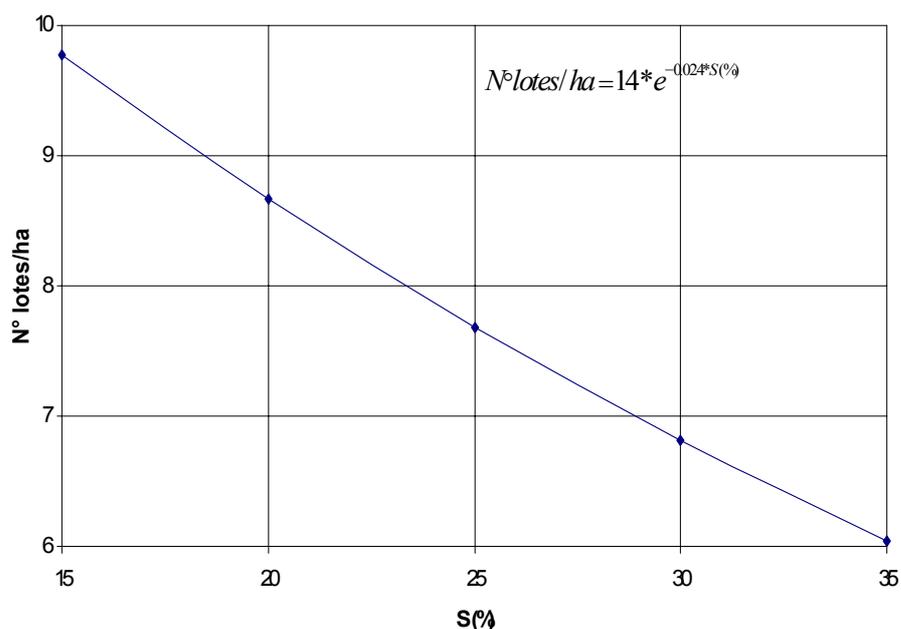


Figura I-2. Relación de N° de lotes/ha con la pendiente natural del terreno

En base a la distribución espacial de pendientes se podrá tener un mapa, en las áreas aptas para urbanizar, de cantidad de lotes por ha, lo cual permitirá, luego, avanzar en el diseño de la urbanización.

Los sectores urbanizables se conectarán a través de calles cuyos desarrollos deberán verificar que:

- Pendiente máxima de calles=12%
- Pendiente máxima de calles en intersecciones=5%
- Las calles deben seguir los contornos naturales (Figura I-3).

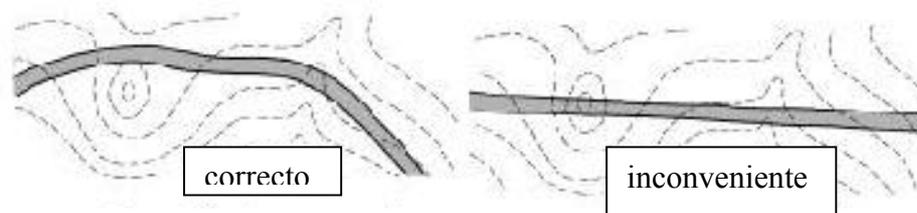


Figura I-3. Ejemplo de trazado de calles en pedemonte

- La cantidad máxima de superficie impermeable de calle debe ser el 20% de la urbanización total.

A modo de ejemplo se muestra en la Figura I-4 como se puede disminuir el desarrollo de calles prestando el mismo servicio de interconexión para una misma área:

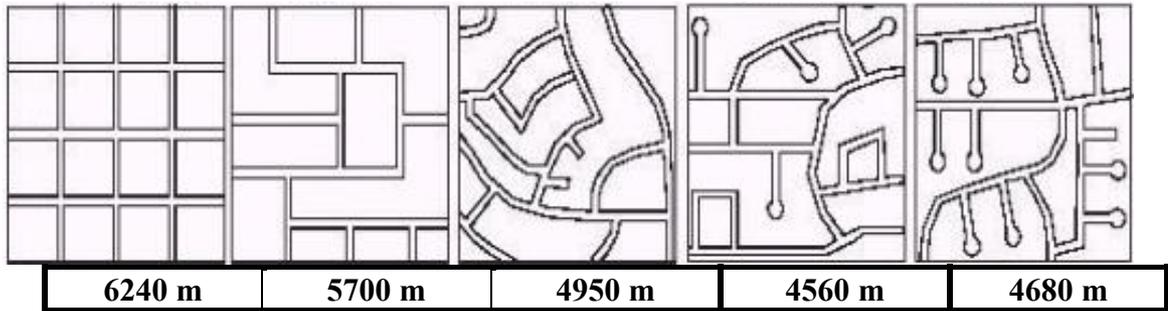


Figura I-4. Ejemplo de disminución de longitud de calles en igual área

Aspectos hidrológicos

Se propone que la sustentabilidad hidrológica se verifique si el caudal máximo del hidrograma de escurrimiento generado por la cuenca con urbanización no supera al del estado natural para TR= 5 años.

A tal efecto se podrán implementar soluciones estructurales como:

- que el escurrimiento generado por las superficies impermeables de cada lote drene hacia las áreas permeables del lote para su infiltración y/o retardo
- la utilización de dispositivos de retardo y/o infiltración del escurrimiento, para minimizar el incremento de volumen y caudal pico debido a la urbanización. A efectos de disminuir riesgos y los consecuentes costos se propone que tales embalses se implementen en base a excavaciones, evitándose así la construcción de terraplenes potenciales de fallas.

El urbanizador deberá presentar los resultados de la modelación matemática que permitieron en distintas etapas optimizar el diseño y la verificación del funcionamiento para tiempos de retorno de 2 y 10 años.

Diseño edilicio

A efectos de que la disrupción visual del paisaje natural sea mínima se proponen las siguientes pautas:

- El diseño arquitectónico de las viviendas, los materiales de construcción y los colores de pintura deben proveer una suave transición entre las viviendas y los alrededores.
- Todo proyecto debe ubicarse en promedio a 90 m horizontalmente desde una cumbre (Figura I-5).

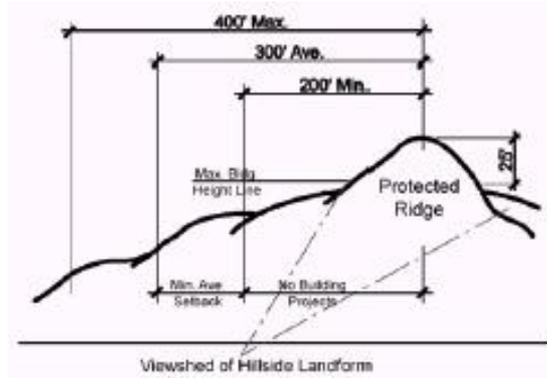


Figura I-5. Distancia mínima de edificación a cumbre

- Se deberá tener en cuenta que los lotes podrán ser nivelados verificando que no se supere:

$$Vol_{\text{movtierra}} (m^3) = \left[\frac{[4 - 10 * S(m/m)] * 4 + 16.2}{19.06} \right] * A_{\text{lote}} (m^2)$$

- Los desniveles naturales del terreno se tendrán en cuenta para el diseño arquitectónico (Figura I-6).

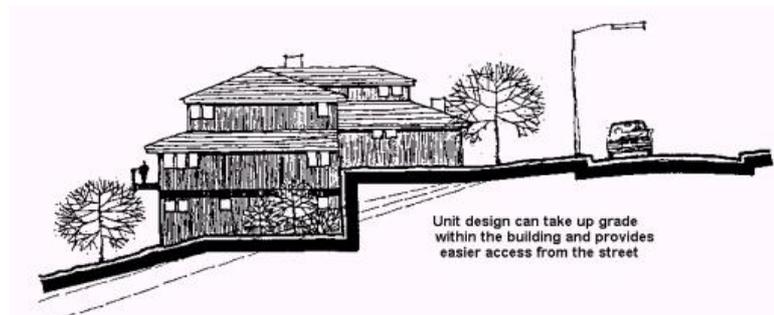


Figura I-6. Ejemplo de acomodamiento del diseño arquitectónico a la topografía

APÉNDICE II



Instituto Nacional del Agua
Centro Regional Andino

TORMENTA DE PROYECTO EN BASE A MEDICIONES EN EL PEDEMONTE DEL GRAN MENDOZA

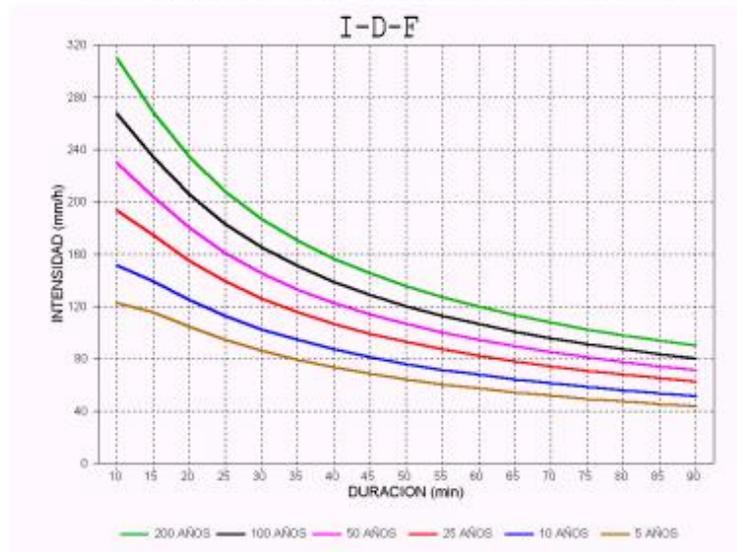


TABLA AREA-LAMINA

AREA [km ²]	LAMINA MEDIA EN % DEL MAXIMO
0 - 1	100
1 - 5	88,9
5 - 10	81,4
10 - 15	77,8
15 - 20	74,3
20 - 25	71,6
25 - 50	66,0
50 - 75	60,6
75 - 100	55,5
100 - 200	55,4
200 - 300	44,7
300 - 500	40,9
500 - 600	36,6
600 - 700	35,6
700-1000	31,1

DISTRIBUCION TEMPORAL

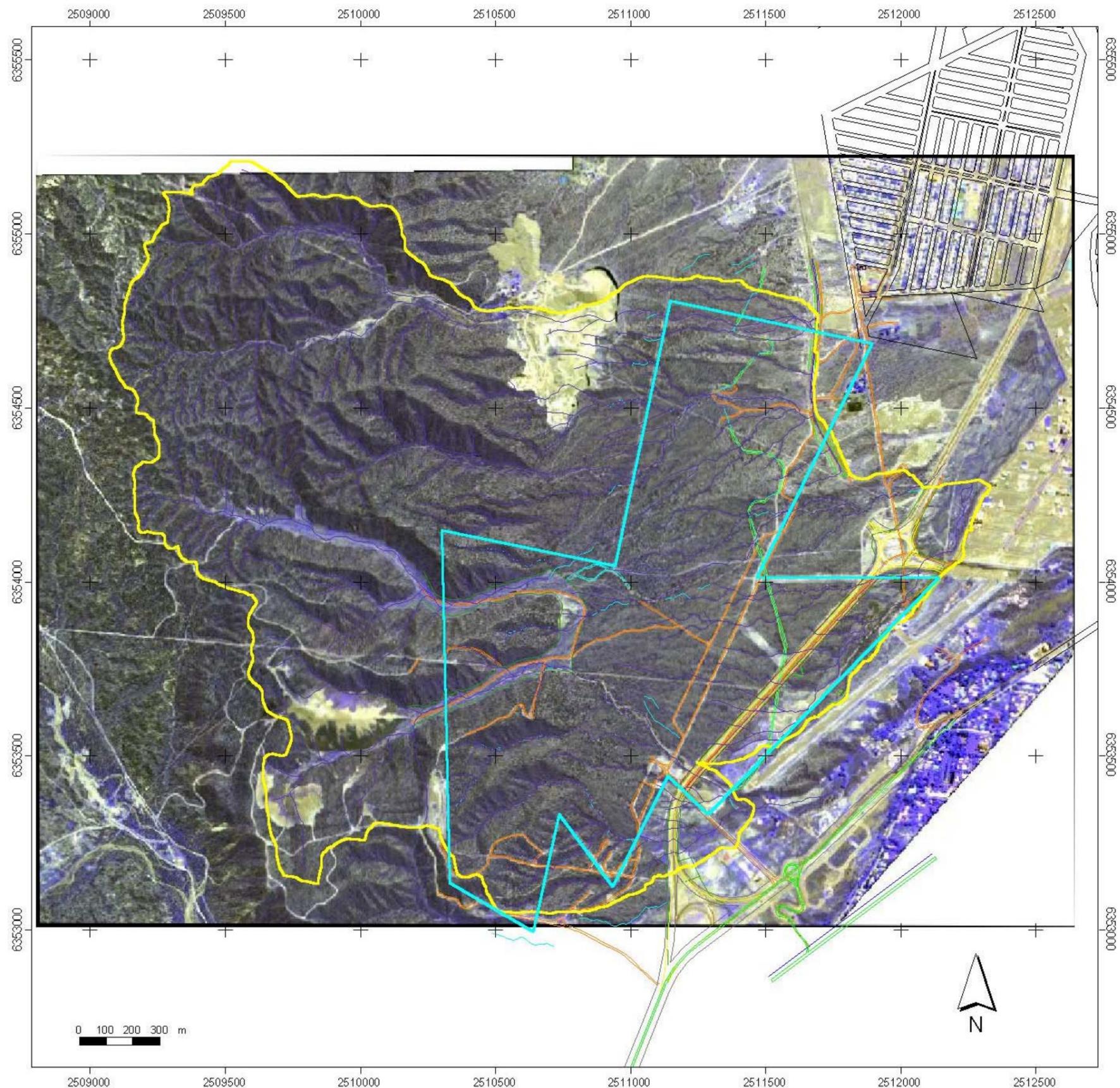
Período (min)	5	10	15	20	25	30
Distribución (%)	10.1	27.3	41.5	15.4	4.8	0.9

Período (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
Distribución (%)	4.1	2.4	8.7	15.4	20.9	28.8	11.9	5.5	1.6	0.5	0.1	0.1

Período (min)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Distribución (%)	2.9	0.2	0.1	3.4	4.2	6.3	7.2	8.6	18.0	10.4	16.2	12.9	4.7	1.8	1.8	2.0	0.2	0.1

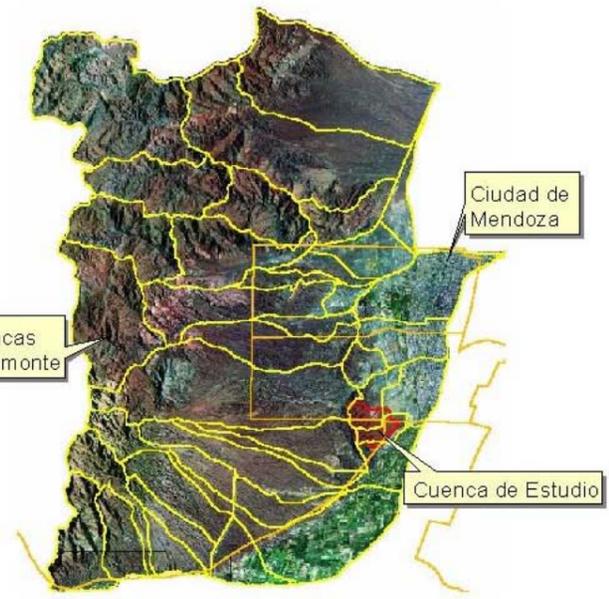
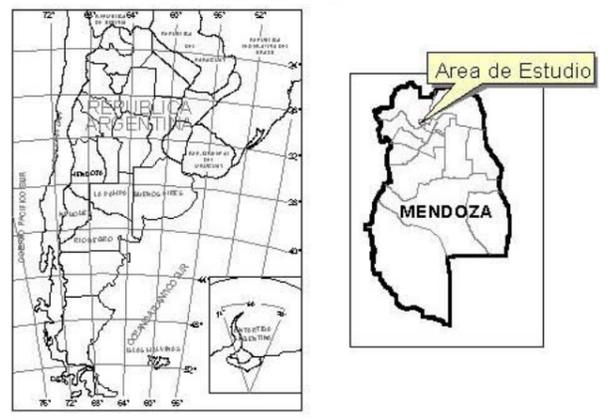
Con la financiación de CONICMEN y CONICET

Mendoza, agosto 1997



Cuenca de estudio

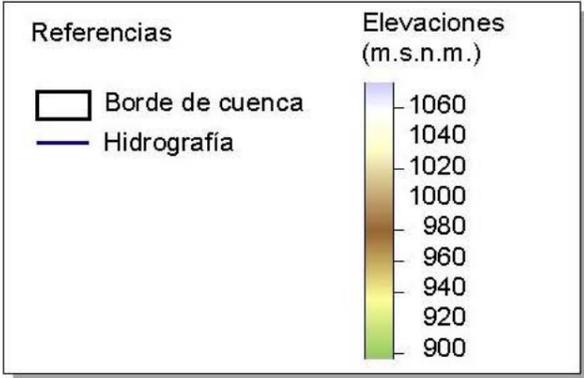
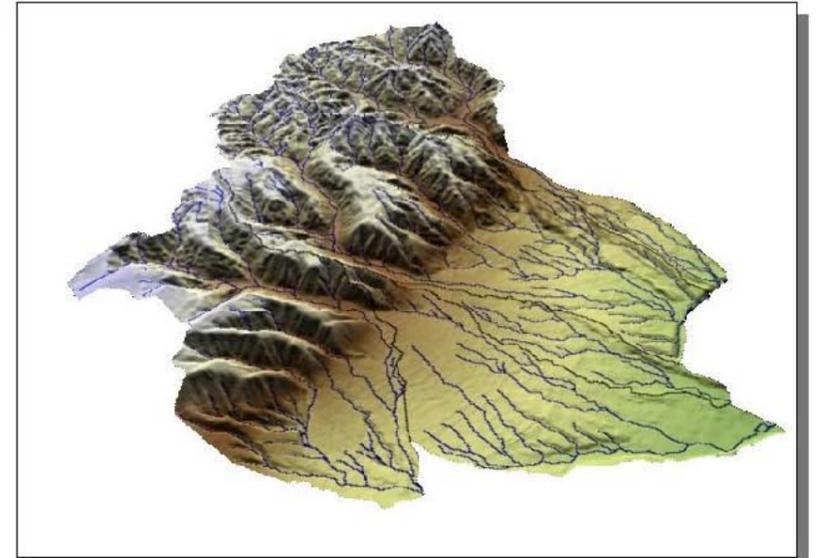
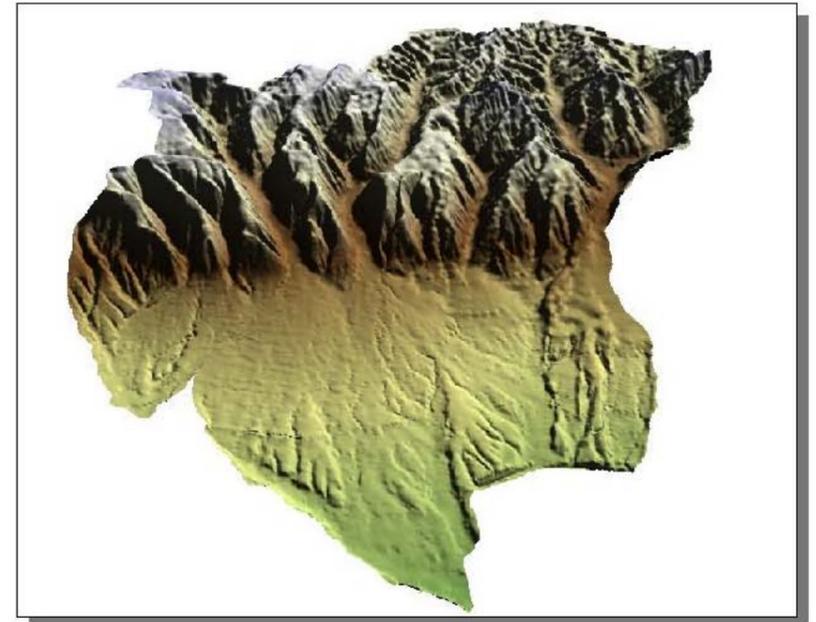
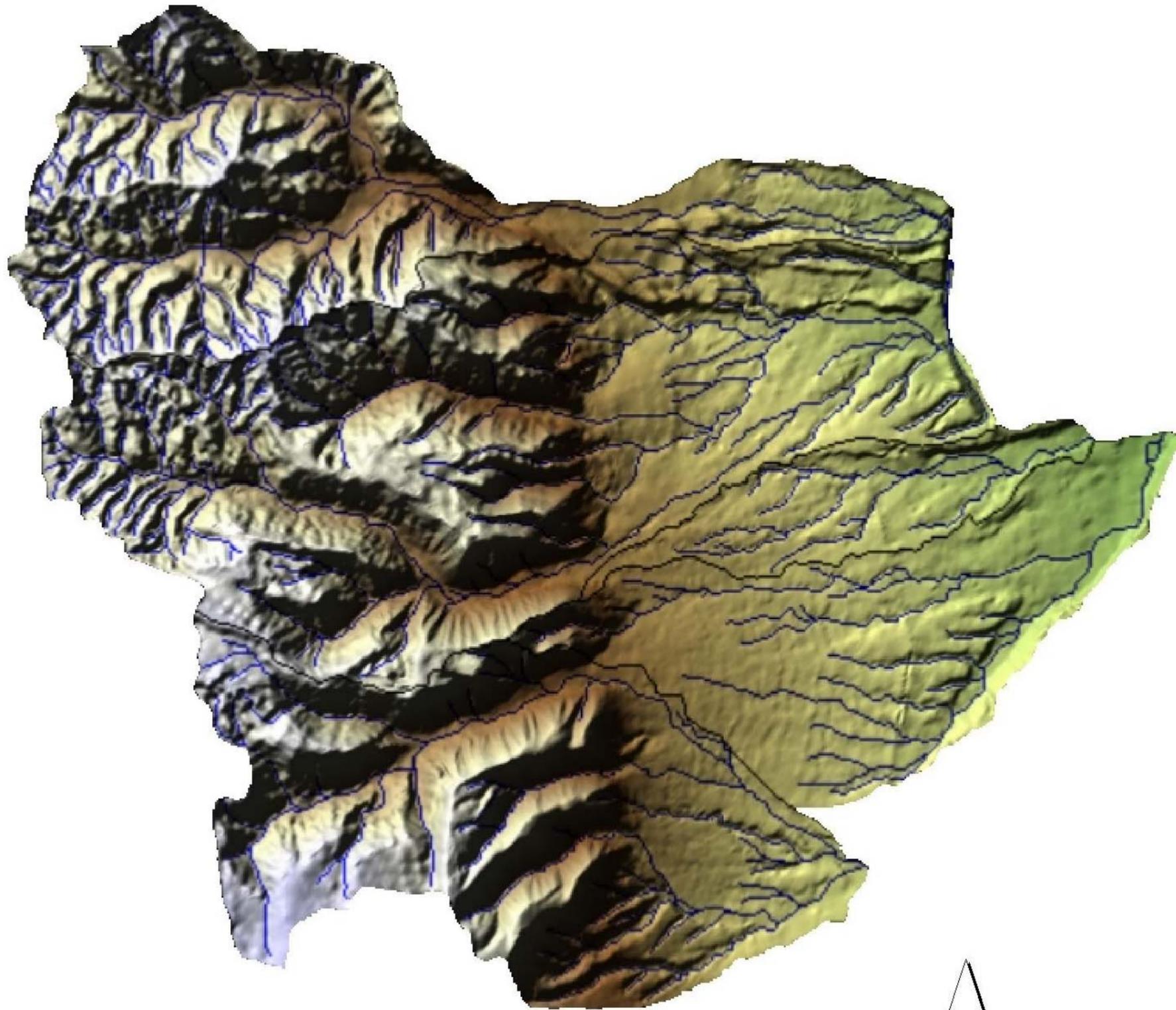
Ubicación Relativa



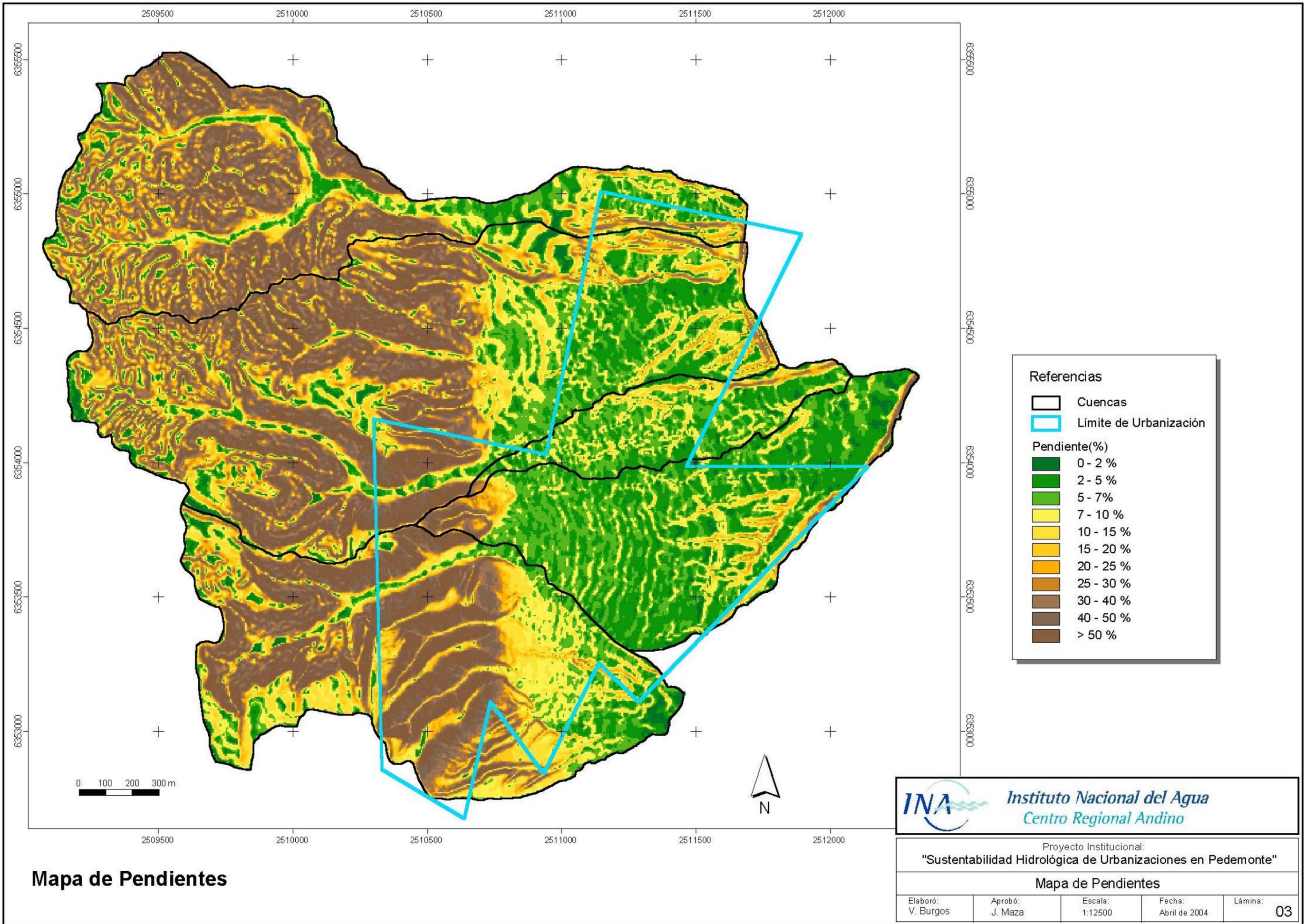
Referencias

- Borde de Cuenca de Estudio
- Límite de Urbanización
- Hidrografía
- Picadas y caminos de tierra

Instituto Nacional del Agua Centro Regional Andino				
Proyecto Institucional: "Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"				
Cuenca de estudio y límites de urbanización				
Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:17500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 01



Modelo Digital de Elevaciones (MDE)



Referencias

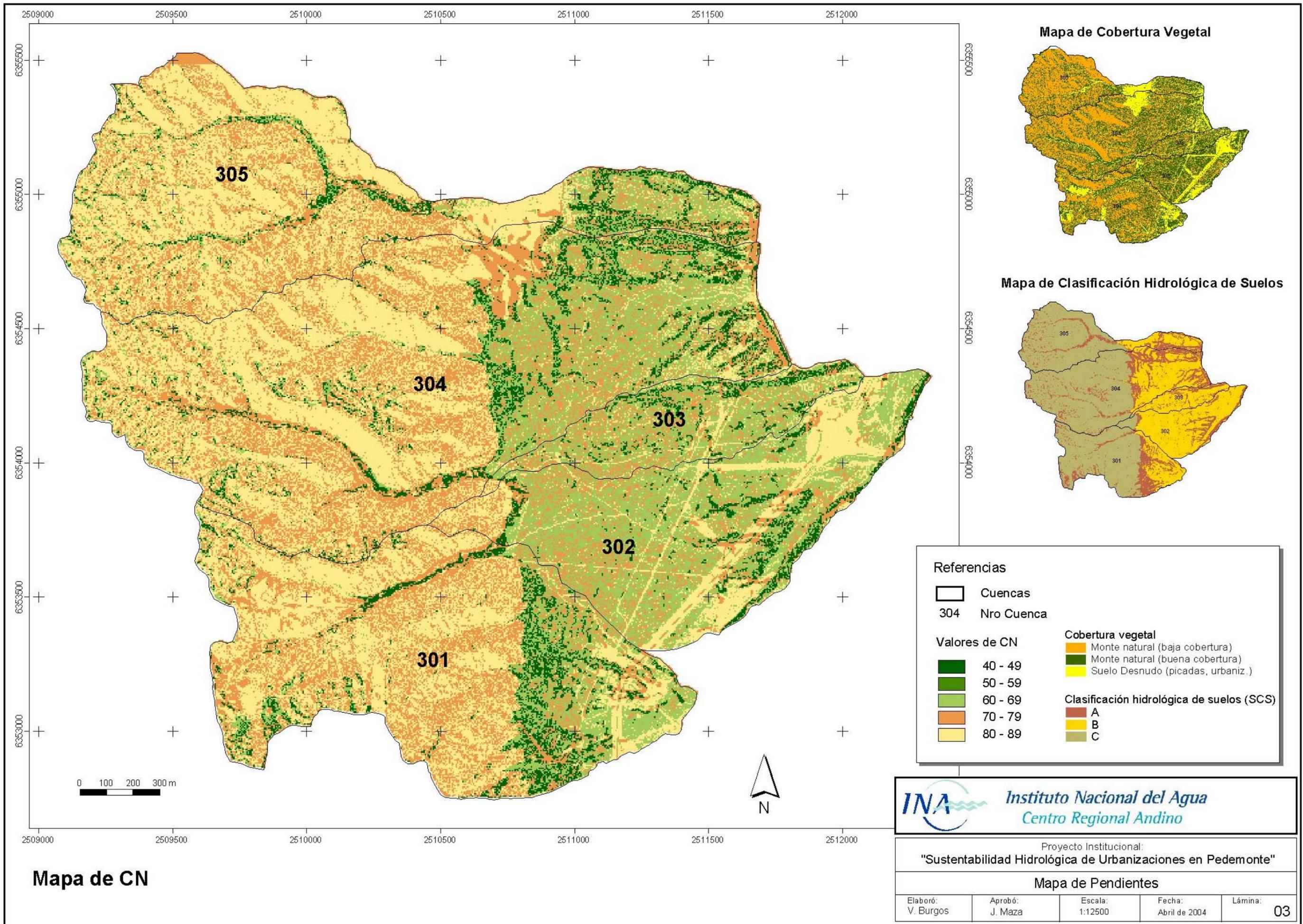
- Cuencas
- Límite de Urbanización

Pendiente(%)

- 0 - 2 %
- 2 - 5 %
- 5 - 7 %
- 7 - 10 %
- 10 - 15 %
- 15 - 20 %
- 20 - 25 %
- 25 - 30 %
- 30 - 40 %
- 40 - 50 %
- > 50 %

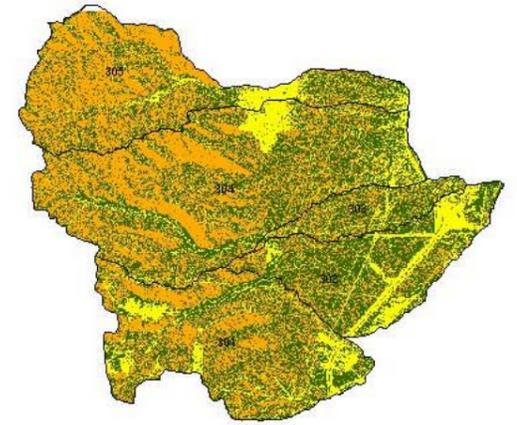
Mapa de Pendientes

Instituto Nacional del Agua Centro Regional Andino				
Proyecto Institucional: "Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"				
Mapa de Pendientes				
Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:12500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 03

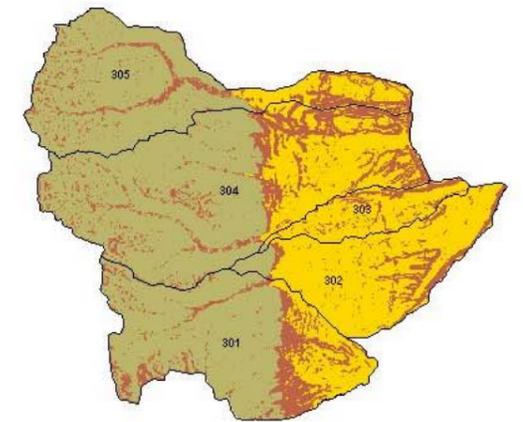


Mapa de CN

Mapa de Cobertura Vegetal



Mapa de Clasificación Hidrológica de Suelos



Referencias

- Cuencas
- 304 Nro Cuenca

Valores de CN

- 40 - 49
- 50 - 59
- 60 - 69
- 70 - 79
- 80 - 89

Cobertura vegetal

- Monte natural (baja cobertura)
- Monte natural (buena cobertura)
- Suelo Desnudo (picadas, urbaniz.)

Clasificación hidrológica de suelos (SCS)

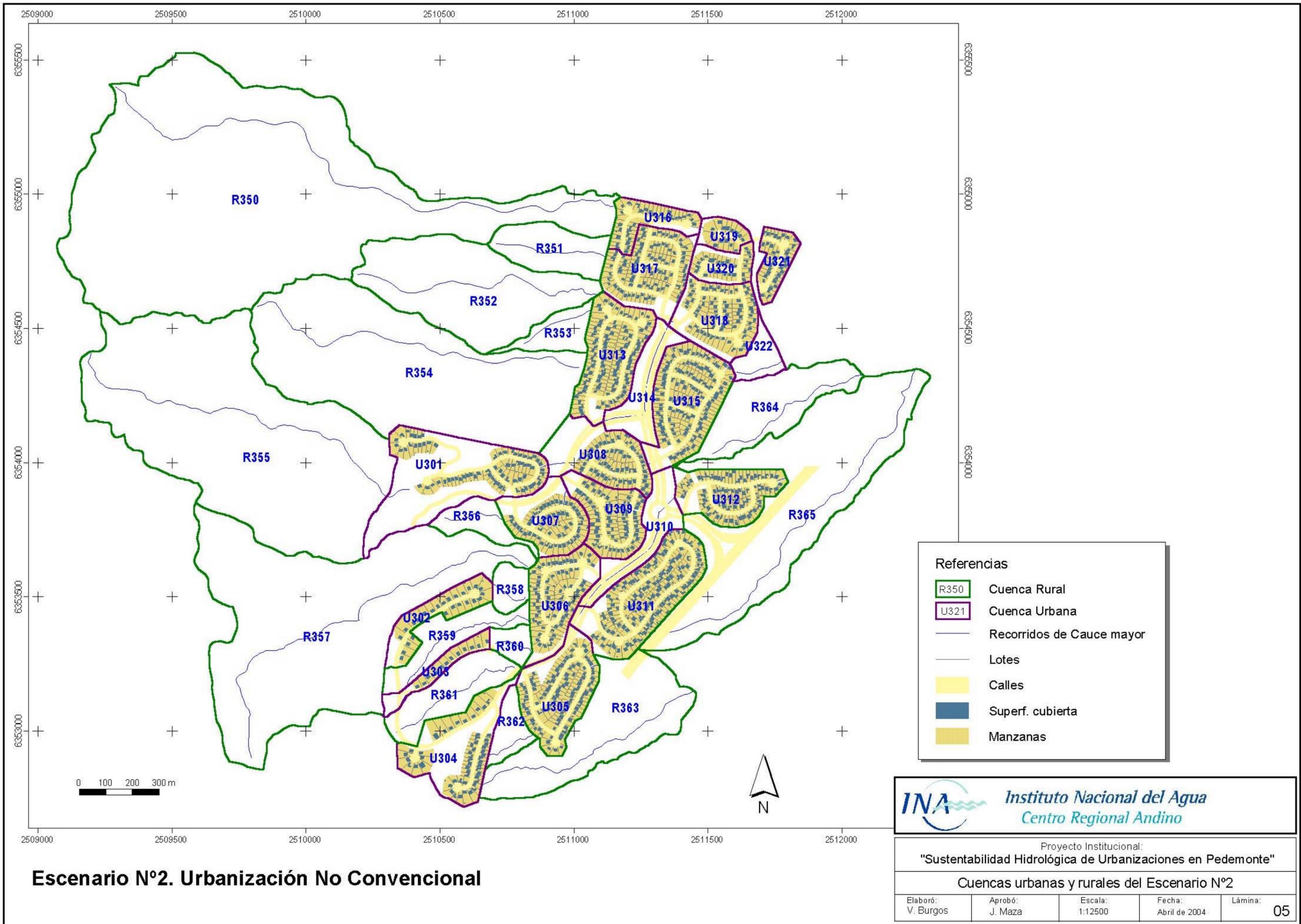
- A
- B
- C



Proyecto Institucional:
"Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"

Mapa de Pendientes

Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:12500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 03
-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------------	---------------



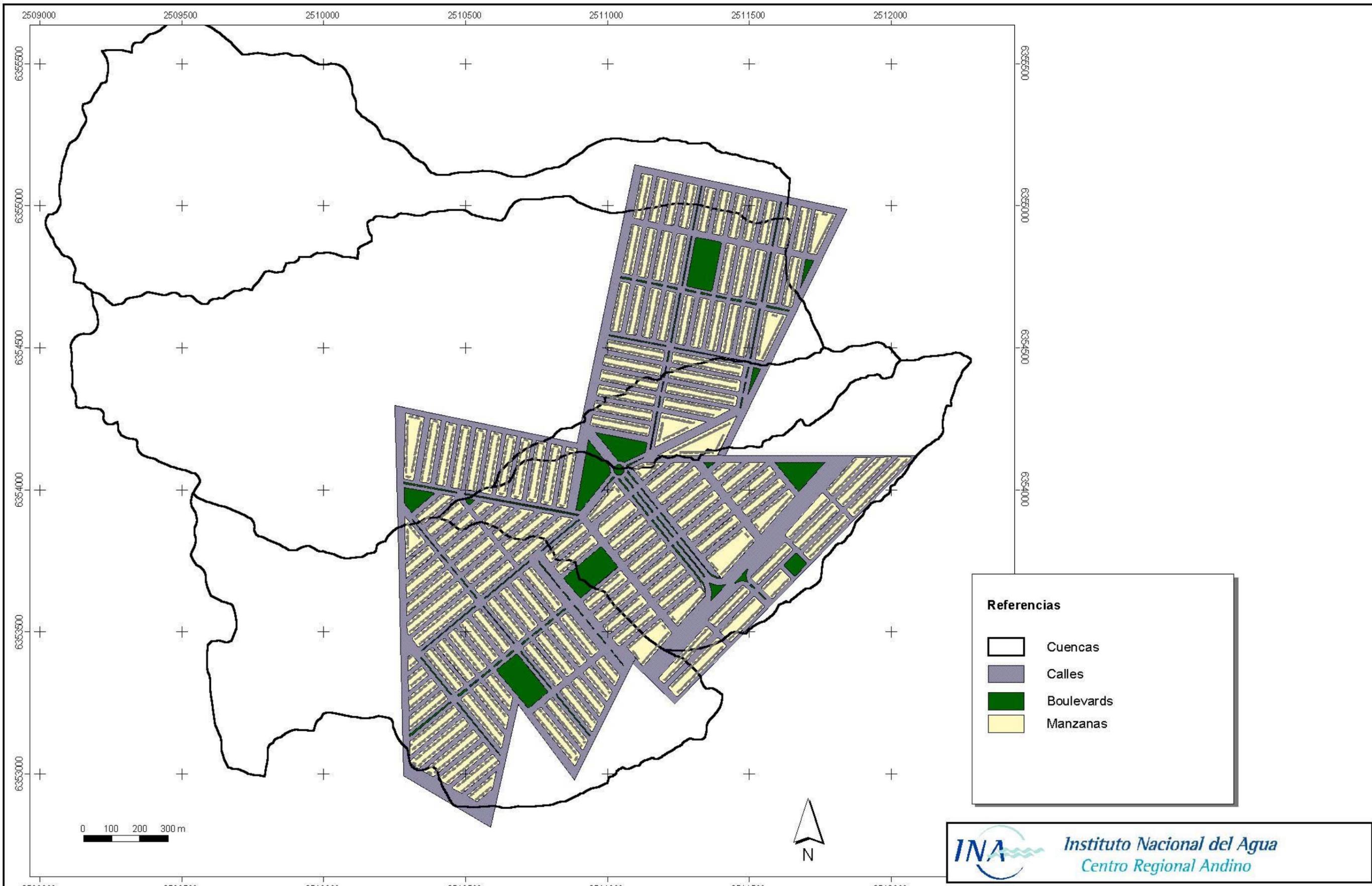
Escenario N°2. Urbanización No Convencional



Proyecto Institucional:
"Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"

Cuencas urbanas y rurales del Escenario N°2

Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:12500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 05
-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------------	---------------



Referencias

-  Cuencas
-  Calles
-  Boulevards
-  Manzanas

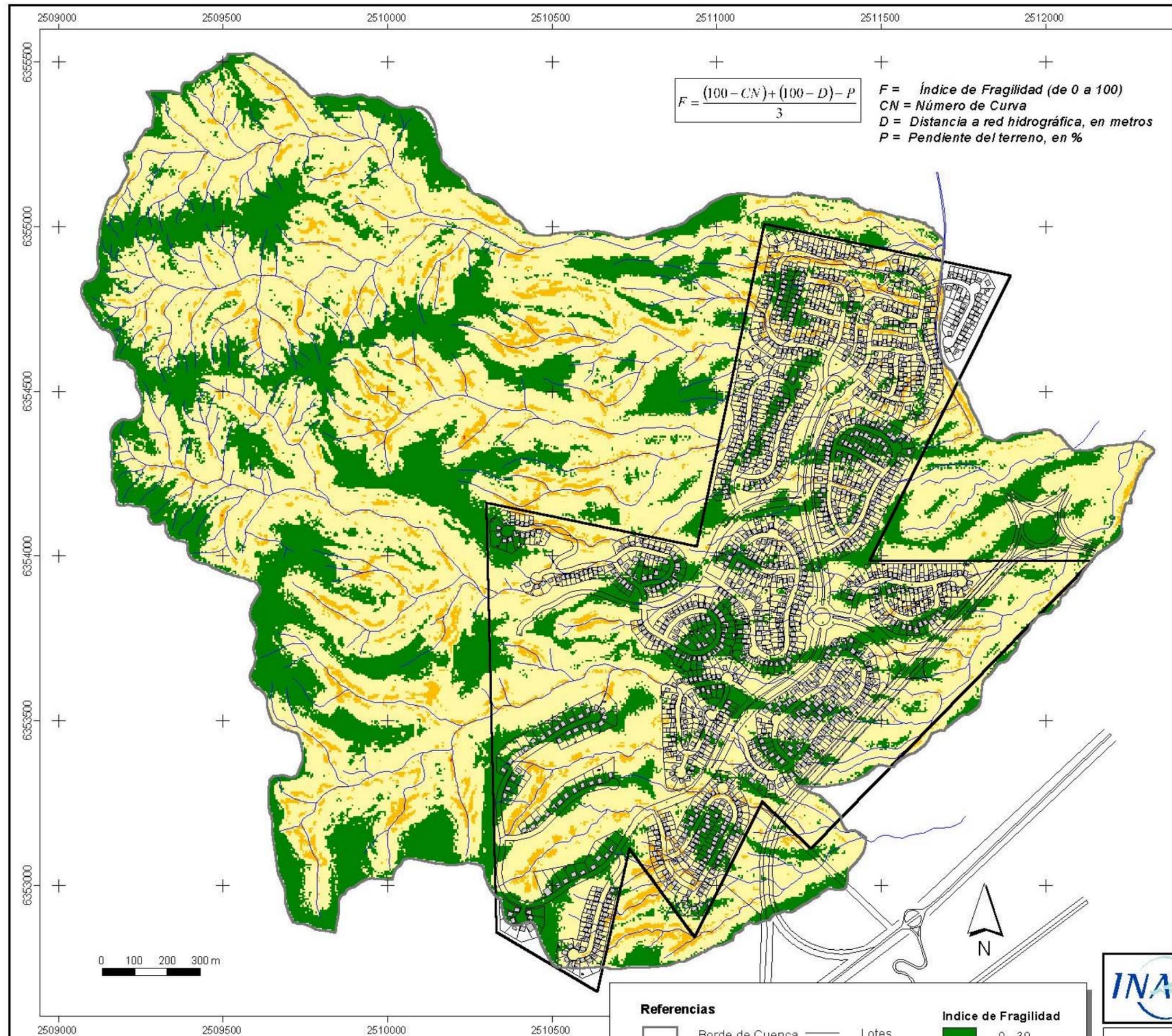
INA Instituto Nacional del Agua
Centro Regional Andino

Proyecto Institucional:
"Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"

Escenario N°3 Urbanización Convencional

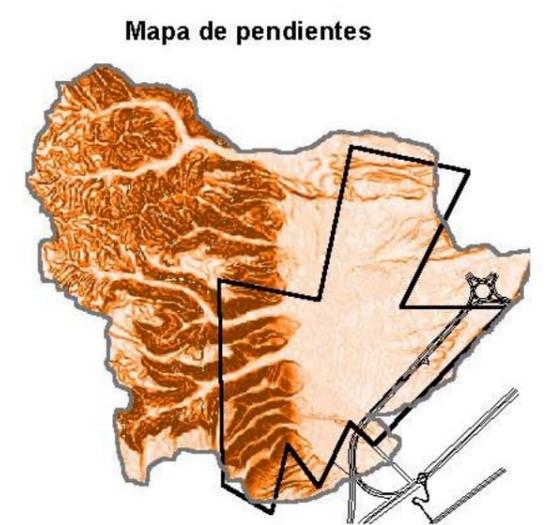
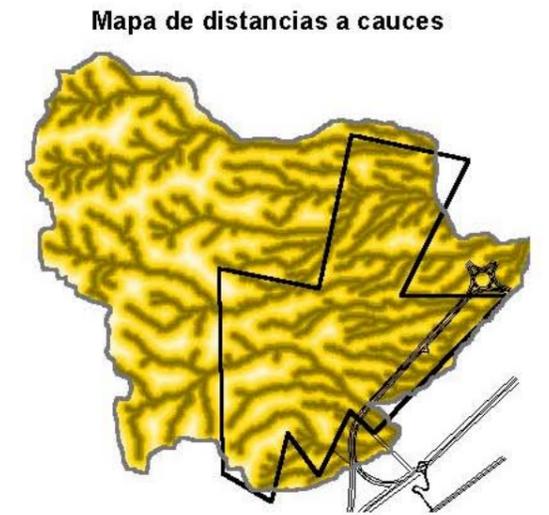
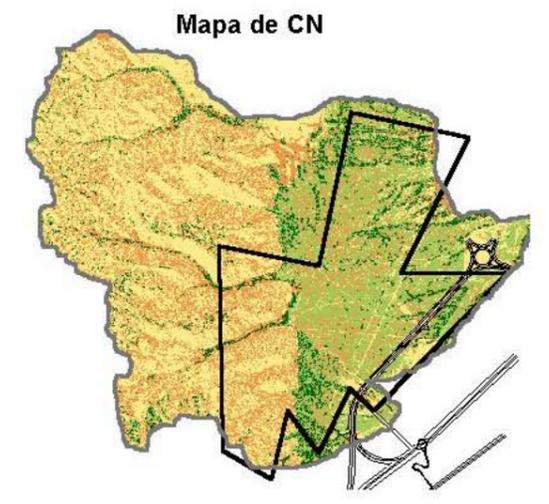
Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:12500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 06
-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------------	---------------

Escenario N°3 Urbanización Convencional



$$F = \frac{(100 - CN) + (100 - D) - P}{3}$$

F = Índice de Fragilidad (de 0 a 100)
 CN = Número de Curva
 D = Distancia a red hidrográfica, en metros
 P = Pendiente del terreno, en %



Mapa de Fragilidad

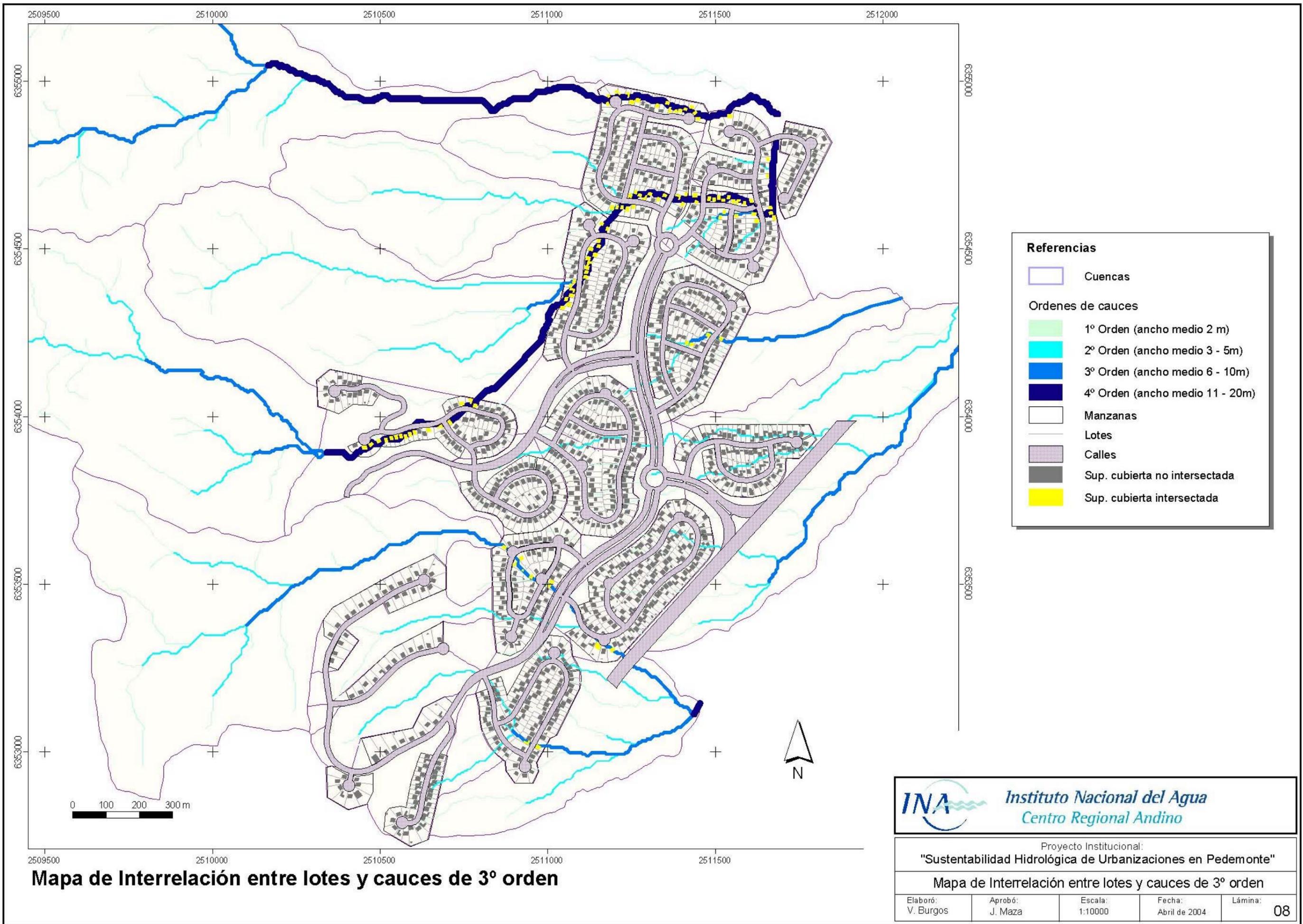
Referencias		Indice de Fragilidad
	Borde de Cuenca	0 - 30
	Límite de loteo	30 - 50
	Calles	50 - 70
	Lotes	70 - 100
	Sup. cubierta	
	Hidrografia	

INA Instituto Nacional del Agua
 Centro Regional Andino

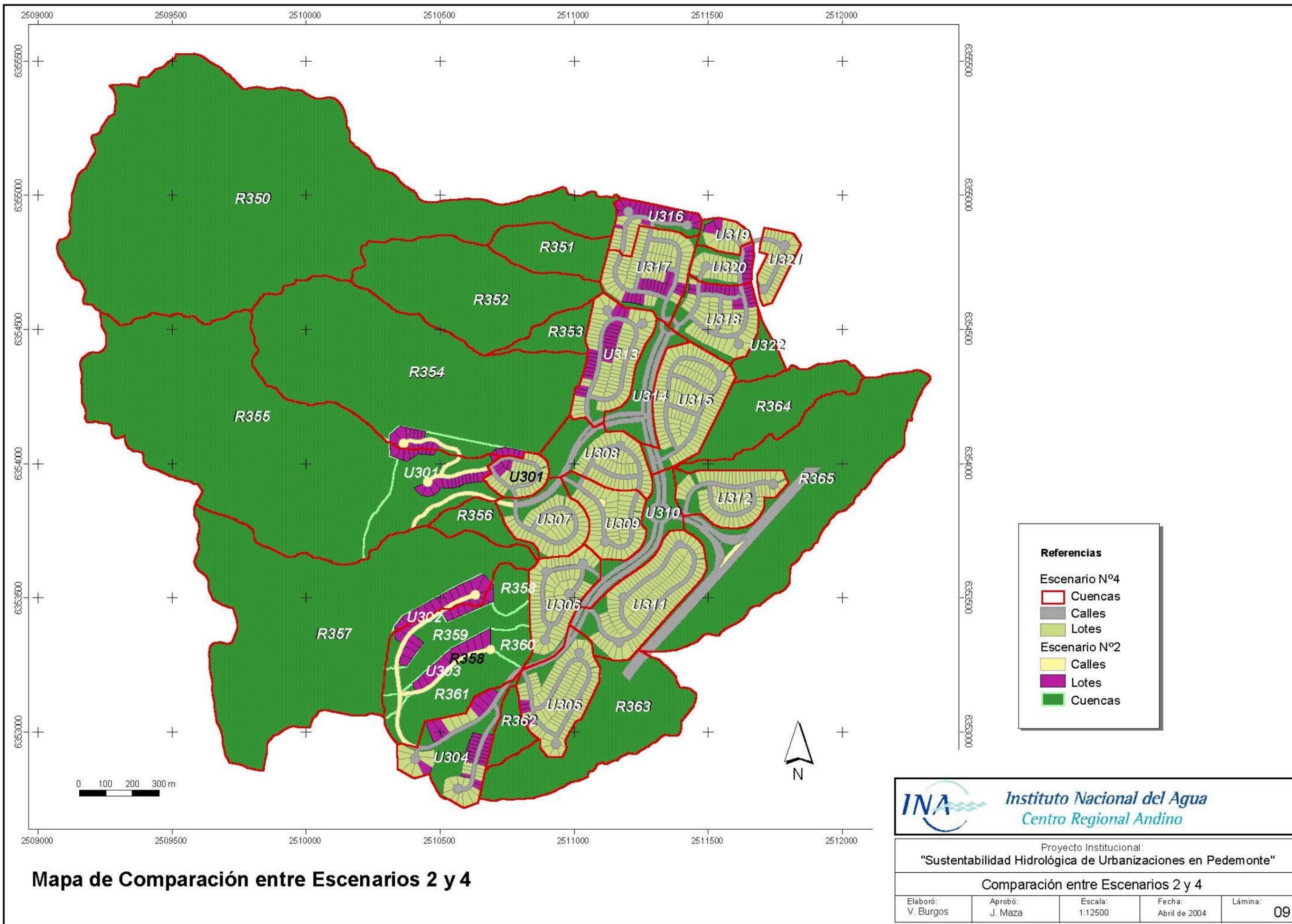
Proyecto Institucional:
 "Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"

Mapa de Fragilidad del territorio y Escenario N° 2

Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:12500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 07
-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------------	---------------

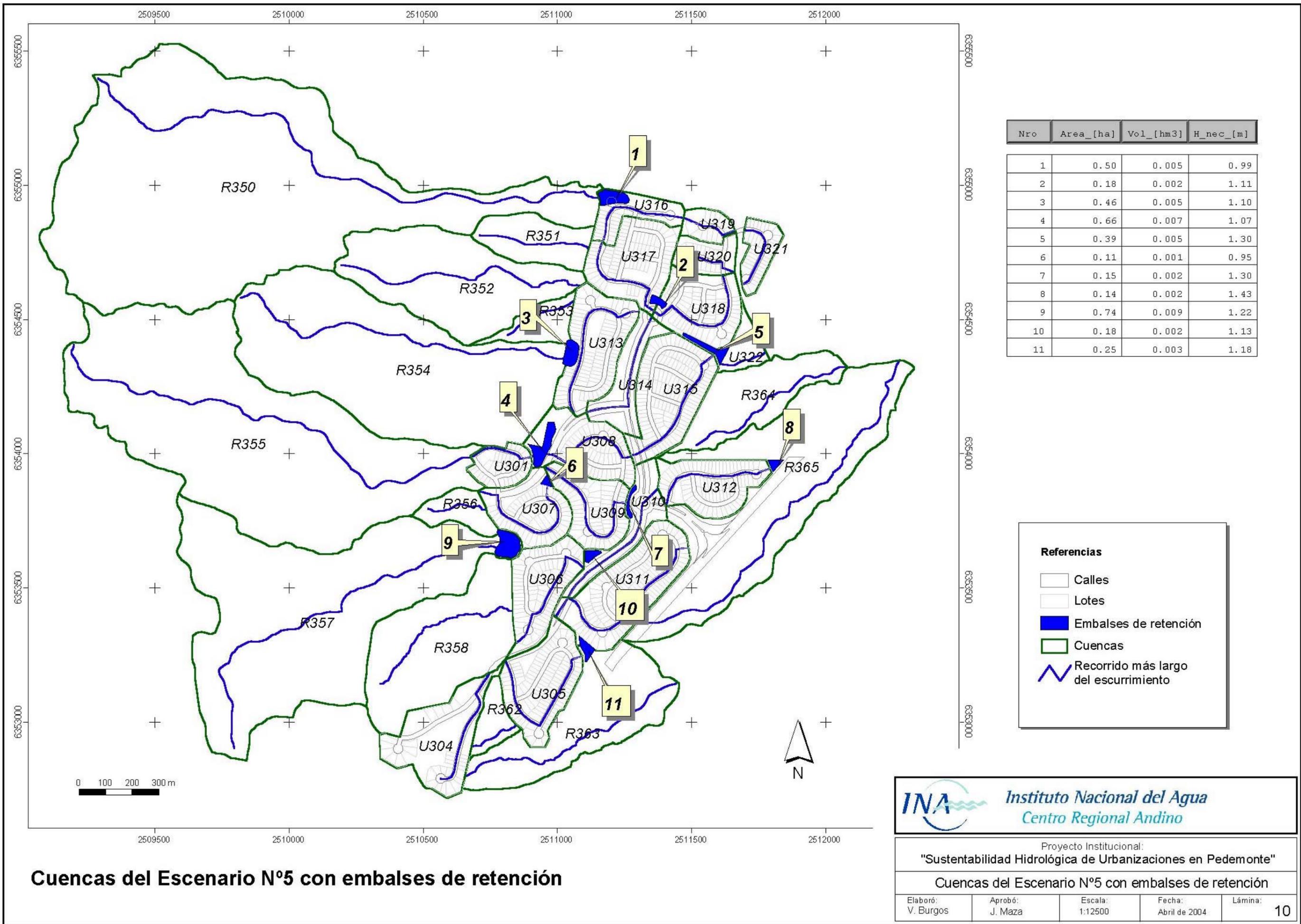


Mapa de Interrelación entre lotes y cauces de 3º orden



Mapa de Comparación entre Escenarios 2 y 4

 Instituto Nacional del Agua Centro Regional Andino				
Proyecto Institucional: "Sustentabilidad Hidrológica de Urbanizaciones en Pedemonte"				
Comparación entre Escenarios 2 y 4				
Elaboró: V. Burgos	Aprobó: J. Maza	Escala: 1:12500	Fecha: Abril de 2004	Lámina: 09



Nro	Area_[ha]	Vol_[hm3]	H_nec_[m]
1	0.50	0.005	0.99
2	0.18	0.002	1.11
3	0.46	0.005	1.10
4	0.66	0.007	1.07
5	0.39	0.005	1.30
6	0.11	0.001	0.95
7	0.15	0.002	1.30
8	0.14	0.002	1.43
9	0.74	0.009	1.22
10	0.18	0.002	1.13
11	0.25	0.003	1.18

Referencias

- Calles
- Lotes
- Embalses de retención
- Cuencas
- Recorrido más largo del escurrimiento

Cuencas del Escenario N°5 con embalses de retención