



Universidad Austral de Chile
Facultad de Ciencias Forestales

Generación de caudales y producción de sedimentos en cuencas en la Cordillera de la Costa, IX Región

Patrocinante: Sr. Anton Huber J.

Trabajo de Titulación presentado
como parte de los requisitos para optar
al Título de **Ingeniero Forestal**

YURY MAURICIO RODRIGUEZ TRUJILLO

VALDIVIA
2003

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Anton Huber Jaeger	5,7
Informante:	Sr. Andrés Iroumé Arrau	5,3
Informante :	Sr. Rubén Peñaloza Wineken	6,5

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados e el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Anton Huber J.

AGRADECIMIENTOS

Al Proyecto Fondecyt Impacto de las Plantaciones Forestales sobre el Recurso Hídrico.

Dr. Antón Huber, por haberme aceptado como alumno tesista y por todas las facilidades entregadas para el desarrollo del presente trabajo.

Prof. Andrés Iroumé, por todos los consejos y conocimientos entregados sobre el trabajo en cuencas hidrográficas.

Prof. Rubén Peñaloza, por la gran disponibilidad y conocimientos entregados sobre el manejo de las plantaciones forestales en Chile.

Prof. Ramiro Trecaman, gracias por todos los consejos acertados, la gran cantidad de conocimientos entregados y comentarios realizados en el desarrollo del trabajo, y por sobre todo al distendido ambiente que se formó a la hora de atender las consultas sobre este y otros temas.

A Jah por la gran familia y amigos entregados, quién fue y será mi gran apoyo espiritual en esta y mi próxima vida.

Nena y Chito (mis viejos), por todo el apoyo y fuerza entregada tanto en los momentos difíciles como en los buenos, que hicieron de esta aventura una realidad.

A Karin por haberme enseñado lo que es el verdadero e incondicional amor, por su fundamental apoyo y por haber entendido que el tiempo no entregado a ella fue para hacer siempre algo "productivo".

A Javier, Ana, Ingrid y Roly (mis hermanos), que gracias a sus sinceros deseos y apoyo entregado durante toda mi carrera, hicieron concluir exitosamente mi objetivo. A mis cuñados por todos los buenos consejos y favores realizados.

A mis queridos sobrinos, por todo el amor y cariño desprendido, que me enseñaron con sus pequeños rostros lo bueno que es sonreír en la vida, aún en los momentos más difíciles.

A Francis, Javier, Tatún, Chino, Lucho y JC (mis otros hermanos), gracias por todas las buenas vibras y conversaciones entabladas, por su incondicional amistad y afectividad entregada. A Tono, Churra, Chispa, Tatóo, Guarén, Chico y Chelo (que aunque ya no está con nosotros), gracias por la amistad y apoyo dado.

A mis socios forestales Pato, Andrés, Porota, Alfredo, Dundo, Yety, Darían, Checha, Ale, Foca, Loco, Dani, R. Hernández, Lagarto, Fio, Iriti, Karla, Thienel, Culo, DJ Larva, Chan, Buca, Tino, Cochino, Gonzalo, y todos aquellos personajes del gremio que hicieron más placentera mi estadía en Valdivia, GRACIAS TOTALES!!!!

*"A mis padres, que gracias a su
incondicional apoyo y esfuerzo,
hicieron mi sueño realidad"*

INDICE

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Conceptos Generales	3
2.1.1 <i>Ciclo hidrológico</i>	3
2.1.2 <i>Balance hídrico</i>	3
2.1.3 <i>Precipitación</i>	4
2.1.4 <i>Intercepción</i>	4
2.1.5 <i>Evapotranspiración</i>	4
2.1.6 <i>Escorrentía</i>	5
2.2 Cuencas hidrográficas	6
2.3 Importancia de una cuenca como unidad de estudio	7
2.4 Parámetros y representaciones geomorfológicas	7
2.4.1 <i>Índice de compacidad o de Gravelius</i>	8
2.4.2 <i>Rectángulo equivalente</i>	8
2.4.3 <i>Pendiente promedio de la cuenca.</i>	8
2.4.4 <i>Altitud media</i>	8
2.4.5 <i>Coefficiente orográfico</i>	8
2.4.6 <i>Densidad de drenaje</i>	9
2.4.7 <i>Frecuencia de corrientes y coeficientes de torrencialidad</i>	9
2.4.8 <i>Tiempo de concentración</i>	9
2.4.9 <i>Curvas de distribución e hipsométricas</i>	9
2.5 Impacto de la cosecha forestal en la producción de agua	9
2.6 Efecto de las prácticas silvícolas sobre las pérdidas de suelo.	10
2.6.1 <i>Cosecha forestal</i>	10
2.6.2 <i>Caminos Forestales</i>	11
2.6.3 <i>Zonas de Protección</i>	12
2.7 Transporte de sedimentos en los caudales	13
3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	16
3.1 Material	16
3.1.1 <i>Área de estudio</i>	16
3.1.2 <i>Antecedentes generales</i>	16
3.1.3 <i>Pluviógrafo</i>	17
3.1.4 <i>Vertedero tipo Thompson</i>	17
3.1.5 <i>Características de las Plantaciones</i>	18
3.2 Metodología	18
3.2.1 <i>Período de estudio</i>	18
3.2.2 <i>Tratamiento</i>	18

3.2.3	<i>Antecedentes del raleo</i>	19
3.2.4	<i>Caracterización Morfológica de las cuencas</i>	19
3.2.5	<i>Determinación de caudales</i>	20
3.2.6	<i>Registro del caudal</i>	20
3.2.7	<i>Sedimentos en suspensión</i>	20
3.2.8	<i>Arrastre de fondo</i>	21
3.2.9	<i>Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión (CSS) / Caudal medio</i>	21
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1	Caracterización morfológica de las cuencas	22
4.2	Determinación de precipitaciones y generación de caudales	25
4.3	Producción de sedimentos	30
4.4	Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión / Caudal medio	35
5.	CONCLUSIONES	38
6.	BIBLIOGRAFÍA	40
	ANEXOS	45
1.	<i>Abstract and keywords</i>	
2.	Cuencas Experimentales Etruria 1 y Etruria 2	
3.	Fórmulas de Parámetros y Representaciones Geomorfológicas	
4.	Metodología de Análisis en Laboratorio para sedimentos en suspensión y arrastre de fondo	
5.	Curvas Hipsométricas	
6.	Datos de precipitación y caudales	
7.	Análisis Estadístico	
8.	Producción de Sedimentos	
9.	Datos de Concentración de Sedimentos en Suspensión y Caudales	

Resumen Ejecutivo

Se evaluó el efecto de un raleo (50% de la densidad inicial) a una plantación de *Pinus radiata* D. Don de 12 años de edad sobre la generación de caudales y producción de sedimentos en una cuenca experimental de 34,72 ha. El estudio presentó una duración de 24 meses, correspondiendo los 16 primeros a la etapa de calibración, mientras que los 8 meses restantes midieron el efecto de la intervención, en donde se comparó la cuenca intervenida (E2) con la cuenca testigo (E1).

El estudio se ubicó en el predio "Nueva Etruria" propiedad de Forestal Tornagaleones S. A., distante a 41 km al oeste de la ciudad de Pitrufquén, IX Región.

La caracterización morfológica demostró que no existen diferencias importantes entre ambas cuencas. De acuerdo al perfil de la curva hipsométrica E1 se asoció un río joven, mientras que E2 se relacionó a uno maduro, el cual se destaca por ser una curva intermedia que es característica de las cuencas en equilibrio.

La generación de caudales entre E1 y E2 no presentó diferencias significativas para un 95% confiabilidad. Sin embargo, la respuesta en la cuenca E2 fue superior en un 16% con respecto a los caudales producidos por la cuenca E1, luego de realizada la intervención.

El análisis estadístico no presentó diferencias significativas en la producción de sedimentos totales entre las cuencas. A pesar de esto, al comparar la producción de sedimentos en la cuenca E2 antes y después del raleo, el análisis estadístico encontró diferencias significativas. Esta baja diferencia se debió al sistema de cosecha utilizado, ya que al trabajar con tracción animal el impacto en el recurso suelo es bastante menor que el producido por faenas de alta mecanización.

La producción de sedimentos en suspensión para la cuenca E2 fue mayor en un 64,5% con respecto a la producción de E1 luego de realizada la intervención. Mientras que la producción por acarreo no presentó grandes diferencias entre las cuencas, ni tampoco en la cuenca intervenida entre los períodos de pre y post-raleo.

Al determinar la relación entre concentración de sedimentos en suspensión y el caudal el coeficiente de determinación (r^2) resultó ser bastante bajo, lo que se debió al método por el cual fueron tomadas las muestras.

Finalmente se concluye que la reducción en un 41% del área basal no presentó diferencias significativas en la generación de caudales. El mayor impacto de esta intervención estuvo enfocado en la producción de sedimentos al momento de comparar el período de pretratamiento con el de postratamiento.

Palabras claves: Cuenca, raleo, caudales, sedimentos en suspensión, arrastre de fondo.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del sector forestal, existen prácticas silviculturales que de una u otra forma pueden llegar provocar un impacto negativo en el medio ambiente, sobretodo si no se ha planificado con la adecuada responsabilidad y conocimientos. Entre ellas se cuentan la cosecha y el raleo, tanto en plantaciones como en bosques nativos. Estos manejos silvícolas, juntos con la deforestación a orillas de los cauces y la construcción de caminos que cambian el flujo natural de los cursos de agua, compactan y erosionan el suelo, lo que puede afectar considerablemente la disponibilidad y calidad de las aguas.

Debido a la gran importancia que ha alcanzado hoy en día el sector forestal en la economía del país, es indispensable conocer los posibles efectos no deseados producto de las actividades silvícolas, de manera de alcanzar una producción sustentable tanto a nivel de pequeños propietarios como de grandes empresas relacionadas.

De esta manera, se entiende la importancia del cuidado de los recursos renovables en general, y de los recursos agua y suelo en particular, los cuales son el sustento del desarrollo forestal.

Las cubiertas boscosas, cumplen un papel insustituible en el control de la erosión superficial, en la conservación y regulación del recurso hídrico de buena calidad, brindándole a las zonas de cauces que confluyen a una cuenca la estabilidad necesaria para su equilibrio natural.

Es así como las cubiertas vegetacionales cumplan un rol fundamental en la transformación de la precipitación, puesto que controla la acción y el movimiento del agua a través de la intercepción de ésta, infiltración, almacenamiento y evapotranspiración. De ahí, que la relación de la cubierta vegetal y su densidad estén fuertemente ligadas sobre el balance hídrico del sitio, existiendo una relación causa – efecto sobre éste (Best *et al*, 2003).

Las investigaciones sobre el efecto de las intervenciones silvícolas a nivel de cuencas hidrográficas en el sur de Chile son más bien escasas, lo cual destaca la necesidad de estudios hídricos a nivel de cuencas experimentales, tal que permitan determinar el efecto sobre la calidad del agua por un determinado esquema de manejo de la masa boscosa.

El objetivo general de este trabajo de titulación es determinar el efecto del raleo al cincuenta por ciento de la densidad inicial, en la generación de caudales y en la producción de sedimentos en una cuenca, comparándose estos efectos con una cuenca sin intervención alguna. La investigación se llevó a cabo en el predio “Nueva Etruria” propiedad de Forestal Tornagaleones S. A., ubicado aproximadamente a 41 km al oeste de la ciudad de Pitrufquén, IX Región.

Los objetivos específicos de este trabajo de titulación son:

- Caracterizar morfológicamente cada cuenca en estudio, identificando parámetros y representaciones geomorfológicas.
- Determinar los aportes de precipitación durante el periodo de estudio, sobre las cuencas experimentales.
- Cuantificar la producción de agua, mediante la medición del caudal para la cuenca con intervención, comparándose este volumen de agua con el volumen de la cuenca testigo.
- Cuantificar la producción de sedimentos en ambas cuencas en estudio.
- Relacionar la concentración de sedimentos en suspensión con la medición de caudales medios producidos durante la época de estudio.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos Generales

2.1.1 Ciclo hidrológico

Para Lee (1980), el ciclo hidrológico es un modelo de circulación general, en donde el agua se encuentra en constante movimiento desde un lugar a otro y transformándose de un estado a otro.

Para Martínez de Azagra y Navarro (1996), el ciclo hidrológico corresponde a un sistema de circulación continua, en donde la energía para generar este flujo se genera por medio de la radiación solar. Aunque los elementos esenciales de este ciclo son la precipitación y evaporación, de acuerdo a ciertos criterios es posible identificar otros como son los procesos de almacenamiento y transporte del agua líquida (López y Blanco, 1976).

Según López y Blanco (1976), durante el ciclo hidrológico gran parte de la precipitación que cae al suelo se devuelve a la atmósfera (por la evapotranspiración de las especies vegetales), mientras que la otra fracción alcanza los cursos de agua escurriendo por sobre el suelo o a través de éste. Sin embargo, parte importante de esta agua se evapora regresando a la atmósfera, sin alcanzar a formar parte de los océanos.

2.1.2 Balance hídrico

Un balance hídrico corresponde a un análisis de los distintos componentes del ciclo hidrológico, que toma en consideración las relaciones existentes entre las entradas de agua, las salidas y las variaciones de las reservas en la zona donde se plantea (Martínez de Azagra y Navarro, 1996; Putuhena y Cordery, 2000).

Los mismos autores señalan que el balance hídrico surge así como un método cuantitativo de investigación, basado en que durante un intervalo de tiempo, la suma algebraica de todos los componentes del flujo puede ser igualada a cero, cuando los aportes y las pérdidas de agua se dan en signos opuestos. La diferencia entre las entradas y las salidas están condicionadas por la variación del volumen de agua almacenado en el suelo (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

A nivel de cuencas hidrográficas el balance hídrico se expresa de la siguiente forma (Cicco, 1989):

$$P = ET + Q \pm \Delta S/\Delta T$$

Donde:

P: Precipitación

ET: Evapotranspiración

Q: Caudal

$\Delta S/\Delta T$: Variación de almacenamiento de humedad

Según López y Blanco (1976), los componentes de este balance surgen y se hacen ausentes transitoriamente dependiendo de la variabilidad en las condiciones edafoclimáticas. Por otro lado, son modificados por la existencia y el tipo de estructura vegetal y por la acción antrópica sobre las características de ésta.

2.1.3 Precipitación

López y Blanco (1976) definen a las precipitaciones como todas las aguas meteorológicas líquidas o sólidas que provienen de la humedad atmosférica y que caen en forma vertical. Por medio del uso de pluviógrafos o pluviómetros, se pueden determinar la mayor parte de cantidad de agua que éstas aportan a la superficie del suelo.

Dado al modo en que se produce la precipitación del agua se encuentran dos grandes grupos: las primeras son las precipitaciones verticales, entre las que se encuentran la lluvia, llovizna, chubasco, nevada y granizo; y el otro gran grupo la comprenden las precipitaciones secundarias, perteneciendo a ella los rocíos, las escarchas y las nieblas (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

La cantidad de agua que llega al interior de una masa forestal depende de distintos factores, entre los que destacan el tipo de precipitación y sus características tales como frecuencia, duración e intensidad, además de parámetros propios del bosque como densidad, cobertura de dosel y edad (Ulloa, 2000).

2.1.4 Intercepción

Cuando parte de la precipitación es detenida o interceptada por el follaje de los árboles y devuelta a la atmósfera en forma de vapor, se produce el fenómeno conocido como intercepción (Huber y Oyarzún, 1984).

La intercepción va a depender de las características de la vegetación tales como cobertura y estratificación del dosel, ángulo de convergencia de las ramas y densidad del bosque (Scatena, 1990).

Según Lee (1980), los factores que regulan la cantidad de agua interceptada por el bosque son la capacidad de retención del agua, la cantidad de agua que se puede evaporar desde el follaje durante una lluvia y el tipo de precipitación. Para esta última según Huber y Oyarzún (1984), el agua interceptada por el bosque depende también de la intensidad y duración de las precipitaciones y de la intensidad de los vientos durante la lluvia.

2.1.5 Evapotranspiración

Según Best *et al* (2003), la evapotranspiración es el total de los procesos de transferencia del agua desde una superficie cubierta con vegetación hacia la

atmósfera. Se compone de las pérdidas por intercepción, la transpiración de los vegetales y la evaporación del suelo.

Los montos de la evapotranspiración van a depender principalmente de las condiciones climáticas, las características del suelo y, especialmente, del tipo de vegetación que presente una determinada superficie (Wittenberg y Sivapalan, 1999). Entre las particularidades que presenta esta última se cuentan: la capacidad para reflejar la radiación solar incidente, el porcentaje de cobertura y la extensión vertical y horizontal del sistema radical (López y Blanco, 1976).

Dentro de las condiciones climáticas la evapotranspiración va a depender de factores como la energía disponible para la evaporación del agua, déficit de saturación de la atmósfera, temperatura del aire, la velocidad y turbulencia del viento (Kramer, 1974).

2.1.6 Escorrentía

Martínez de Azagra y Navarro (1996) definen escorrentía como la fracción de la precipitación que nutre los cursos de agua de una cuenca. Este caudal es variable en el tiempo y depende, de las características geomorfológicas de la cuenca, del cauce de la vegetación de la cuenca y del régimen de las precipitaciones (Témez, 1978). Estas corrientes de agua tienen la facilidad de ser medidas y controladas con precisión, entregando una cifra de la cantidad, regularidad y la frecuencia de ésta.

Según el camino que sigue el agua hasta alcanzar la red de drenaje podemos distinguir entre (Martínez de Azagra y Navarro, 1996; Ward y Robinson, 1989):

- Escorrentía Superficial: Corresponde al agua que no se infiltra en ningún momento, producto de la mayor intensidad de la precipitación con respecto a la capacidad de infiltración del suelo, y que alcanza la red de drenaje moviéndose por la superficie del terreno bajo la acción de la gravedad.
- Escorrentía Subsuperficial: Se debe a la saturación de los horizontes edáficos inferiores y corresponde a la fracción de la precipitación que penetra en el suelo y se mueve lateralmente por los horizontes superiores. El límite entre ésta y la escorrentía superficial es confuso, ya que el agua que circula bajo la superficie puede reaparecer al aire libre e incorporarse a la escorrentía superficial y viceversa.
- Escorrentía Subterránea: Es la fracción de la precipitación que se infiltra hasta alcanzar la napa freática, y que circula en régimen laminar a través de los acuíferos hasta desembocar en la red de drenaje superficial.

Toda el agua involucrada en este flujo, aparece sumada en el caudal medible en la cota más baja de la altura de la cuenca. Los mismos autores señalan que la importancia de este elemento del ciclo hidrológico radica en varios aspectos tales como:

- Alimenta a las corrientes de ríos y arroyos.

- Se aprovecha en el período de estiaje mediante su almacenamiento en represas.
- Se emplea su energía potencial para la creación de energía eléctrica.
- La escorrentía provocada por fuertes intensidades es la responsable de inundaciones, crecidas y deslizamientos.
- Provoca procesos erosivos tanto superficiales como subterráneos.
- Condiciona la calidad de las aguas.

Martínez de Azagra y Navarro (1996), señalan que la escorrentía superficial se encuentra ligada fuertemente algunos factores relevantes, como son:

- El suelo: La escorrentía por tanto es menor en los suelos arenosos y mayor en los compactos; en realidad, es inversamente proporcional a la capacidad de infiltración del terreno.
- La vegetación: Este factor actúa positivamente reduciendo la escorrentía superficial, al frenar la velocidad de la lámina de agua, aumentando el tiempo de oportunidad de infiltración. También mantiene el perfil edáfico por debajo de su capacidad de campo durante una mayor cantidad de tiempo, mejora mediante la incorporación de materia orgánica la textura y estructura del suelo y estabiliza los agregados del suelo frente al agua.
- Orientación: La exposición de las laderas es importante. Se produce una mayor escorrentía en aquellas exposiciones asoleadas (N, NE). La razón se debe a la mayor oxidación y descomposición que experimentan los restos vegetales en las orientaciones más cálidas. Por otro lado, una cuenca orientada hacia el sentido de avance de la tormenta, sufrirá una mayor escorrentía que una cuyo eje sea transversal al aguacero debido a que las precipitaciones serán mayores en el primer caso.
- Precipitación: En especial, la intensidad del aguacero influye en la generación de escorrentía superficial. Siempre que dicha intensidad sea mayor que la velocidad de infiltración se estará produciendo lluvia neta, es decir, flujo superficial.

2.2 Cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica corresponde al territorio definido por los límites de la zona de escurriendo de las aguas superficiales, que convergen hacia un mismo cauce. Del mismo modo, una cuenca, sus recursos y sus habitantes, poseen determinadas condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales, que les confieren características comunes (MIDEPLAN, 1998).

En los climas húmedos, las secciones altas de las cuencas hidrográficas suelen estar ocupadas por bosques y, por lo tanto, es ahí donde han de comenzar los trabajos de desarrollo de éstas (FAO, 1986).

En el proceso de gestión de cuencas es necesario tener siempre presente el uso sustentable de ella; es decir, tener un mejor aprovechamiento de sus recursos de manera de conducir al crecimiento económico, con este fin se deben realizar manejos adecuados para conservarlos o protegerlos, considerando además la equidad social que se pueda obtener en la medida que los sistemas de gestión sean participativos con las comunidades cercanas a los límites de la cuenca en cuestión (Fattorelli *et al.*, 1996).

2.3 Importancia de una cuenca como unidad de estudio

Los estudios en cuencas independientes de su clasificación, tienen como objetivo de investigación la predicción y estimación cuantitativa de las relaciones físicas y matemáticas existentes entre los distintos componentes del ciclo hidrológico (Toebe y Ouryvaev, 1970).

Según Toebe y Ouryvaev (1970), las cuencas utilizadas en investigación se definen en dos grupos:

- Cuencas representativas cuya finalidad es la investigación intensiva sobre problemas específicos del ciclo hidrológico o parte de él, siempre que las condiciones naturales se mantengan en forma relativamente estables.
- Cuencas experimentales, cuyo propósito es el estudio de los efectos que se producirán en ella, al modificar deliberadamente una o varias de sus características naturales.

En cuencas experimentales, para realizar un adecuado estudio se requiere que éstas posean una cierta homogeneidad en cuanto a sus características de suelo y vegetación, presentando características uniformes. Con el propósito de lograr una medida de aforo adecuada, así como la mayor homogeneidad de la cuenca se recomienda que esta no exceda de 4 km² de superficie (Toebe y Ouryvaev, 1970).

Los estudios realizados en cuencas experimentales, para determinar el rol que cumple el bosque en la hidrología, sirven para determinar la variación de los caudales bajo la influencia de éste, considerando además el efecto de la reforestación y/o la cosecha (Best *et al.*, 2003; Kozarik, 1989).

2.4 Parámetros y representaciones geomorfológicas

El ciclo hídrico de una cuenca depende fundamentalmente de las características de la vegetación (especie dominante, estructura y densidad), de la topografía y

características del suelo (principalmente de la textura), y de la frecuencia, intensidad y duración de las precipitaciones (Gayoso *et al.*, 2000).

León (1996), señala que las relaciones entre las características físicas, morfométricas e hidrológicas de una cuenca hidrográfica son complejas y recíprocas, debido a que las características físicas de una cuenca influyen sobre sus respuestas hídricas y éstas a su vez dan origen a dichas características. Por medio del análisis de este tipo de relaciones se pueden determinar formulaciones matemáticas y geométricas, las que son útiles en la tarea de caracterizar una cuenca mediante un análisis objetivo.

2.4.1 Índice de compacidad o de Gravelius

Este índice relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una circunferencia que tuviese la misma superficie. El valor arrojado por este índice puede dar una idea que tan redonda o alargada puede ser una cuenca, pudiéndose determinar la posible influencia sobre el escurrimiento del agua (López y Blanco, 1976; Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.4.2 Rectángulo equivalente

Martínez de Azagra y Navarro (1996), establecieron el concepto de rectángulo equivalente, el cual consiste en una transformación geométrica de la cuenca en un rectángulo del mismo perímetro, teniendo el mismo coeficiente de Gravelius y la misma distribución hipsométrica. La utilidad de este método se basa en comparar cuencas desde el punto de vista de la influencia sobre los escurrimientos (López y Blanco, 1976).

2.4.3 Pendiente promedio de la cuenca.

Este parámetro es de importancia pues da un índice de la velocidad media de la escorrentía, su poder de arrastre y de la erosión sobre la cuenca (López y Blanco, 1976).

2.4.4 Altitud media

La altitud media, es la elevación promedio referida al nivel de la estación de aforo de la boca de la cuenca (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.4.5 Coeficiente orográfico

El coeficiente orográfico es un indicador utilizado para definir la condición del relieve de la cuenca, se basa en la relación entre la altura media, que influye sobre la energía potencial del agua, y su pendiente, que actúa sobre la escorrentía (López y Blanco, 1968; Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.4.6 Densidad de drenaje

Densidad de drenaje de una cuenca es el cociente entre la longitud total de los canales de flujo pertenecientes a su red de drenaje y la superficie de la cuenca. Este parámetro es, en cierto modo, un reflejo de la dinámica de la cuenca, de la estabilidad de la red hidrográfica y del tipo de escorrentía de superficie, así como de la respuesta de la cuenca a un chubasco (López y Blanco, 1976; Vélez y Vélez, 2003).

2.4.7 Frecuencia de corrientes y coeficientes de torrencialidad

Según López y Blanco (1976), la frecuencia de corrientes corresponde al número total de cursos de agua de la cuenca medidas por unidad de superficie. Además los mismos autores señalan que el coeficiente de torrencialidad se utiliza para realizar estudios sobre las máximas crecidas, expresando el número de cursos de agua identificados como de orden 1 por unidad de superficie de la cuenca.

2.4.8 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración se conoce como el tiempo en que tarda una partícula de agua caída en el punto de la cuenca más alejado (según el recorrido de drenaje) del desagüe en llegar a éste. Esto no corresponde con el fenómeno real, pues puede haber puntos de la cuenca en los que el agua caída tarde más en llegar al desagüe que el más alejado. Además, debe tenerse claro que el tiempo de concentración de una cuenca no es constante; ya que puede depender de la intensidad del chubasco, aunque muy rara vez (Vélez y Vélez, 2003)

2.4.9 Curvas de distribución e hipsométricas

La repartición hipsométrica de una cuenca, se refiere a las fracciones o los porcentajes de la superficie total comprendida entre curvas de nivel. Las formas de estas curvas entregan una idea que permite cualificar el relieve, por lo tanto, la madurez de una cuenca en función del basamento geológico (López y Blanco, 1976, Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

2.5 Impacto de la cosecha forestal en la producción de agua

La cubierta de los bosques se caracterizan por tener una mayor capacidad de interceptación de las copas y presentar mayores montos de evapotranspiración, debido a que sus raíces alcanzan una mayor profundidad en el suelo aprovechando de esta forma un mayor volumen de las reservas de agua (Calder, 1992).

La remoción de la masa boscosa (cosecha o raleo) produce generalmente un aumento en el rendimiento hídrico de una cuenca superando los niveles registrados antes del disturbio (Ruprecht y Stoneman, 1993; Lane y Mackay, 2001). Este incremento se ve reflejado en el aumento de la escorrentía superficial, mientras que

el movimiento del agua se hace continuo en el perfil del suelo, produciéndose además una disminución de la interceptación y evapotranspiración (Keenan y Kimmins, 1993; Lewis, 1998).

Cuando los montos de evapotranspiración se ven disminuidos por la cosecha forestal, se puede esperar un aumento en la producción de agua, caudales medios y caudales *peak* de la cuenca intervenida (Jones y Grant, 1996; Chang y Watters, 1984). Según Keenan y Kimmins (1993), la duración del aumento de la escorrentía va a depender del tiempo en que el terreno cosechado se vuelva a reforestar.

El aumento en la producción de agua en una cuenca se produce porque disminuyen las pérdidas por interceptación y evapotranspiración producto de la remoción de la vegetación, existiendo una mayor disponibilidad de agua para llegar a los cauces (Troendle, 1983; Fahey, 1994). Sin embargo, en zonas donde existen baja frecuencia de precipitación, las entradas importantes de agua están dadas por la condensación de la neblina y posterior goteo por parte del dosel superior, esto se debe a que los árboles atrapan de manera más eficiente el vapor de agua en comparación a la vegetación menor, en este caso la cosecha podría disminuir la producción neta de agua (Keenan y Kimmins, 1993).

2.6 Efecto de las prácticas silvícolas sobre las pérdidas de suelo.

2.6.1 Cosecha forestal

De todos los tipos de actividades silviculturales, la inadecuada planificación en la cosecha forestal, el uso de *Skidders*, la preparación del sitio para reforestar, y la mala construcción y mantención de los caminos forestales, son la principal materia de discusión en la actualidad, ya que este tipo de operaciones producen impacto negativo en el recurso suelo y agua, transformándose esto en serios problemas de erosión y sedimentación en los cauces (Waters, 1995; FAO, 1989).

El daño provocado en las cuencas hidrográficas no es el resultado del raleo de los árboles, sino el método por el cual son removidos del bosque. En numerosos estudios, todos los árboles en una cuenca hidrográfica han sido cortados y han quedado sobre el terreno, sin incrementar significante la erosión. En general, el disturbio del suelo y el potencial de erosión aumentan con el número de troncos o volumen removido por unidad de superficie (Rothwell, 1978).

El período de tiempo que transcurre entre la eliminación de la cobertura vegetal y el reestablecimiento de una nueva cobertura puede ser relativamente breve, es decir, de uno a tres años, dependiendo de la severidad de la alteración. Sin embargo, en este lapso se produce el mayor porcentaje de pérdidas de suelo y producción de sedimentos en los cauces que pueden ocurrir durante una rotación (Iroumé *et al*, 1989).

La cantidad de erosión que se produce después de la cosecha forestal es dependiente (hasta cierto punto) de la cantidad del suelo desnudo que finalmente queda expuesto a las condiciones climáticas, y esto varía considerablemente con el sistema de cosecha utilizado. (Gilmour, 1977)

Según Iroumé (2003), la mayor parte de la producción total de sedimentos es transportada en forma de suspensión, y los volúmenes que acceden a los cauces están vinculados a los procesos de erosión superficial que ocurren en el interior de las cuencas.

En las llanuras costeras al sudeste de Estados Unidos se realizó una simulación en un bosque de coníferas cosechado, en donde las condiciones de pendiente eran 10, 20 y 30%, y las intensidades de lluvias registradas fueron de 70 y 102 mm/hr, considerándose dos repeticiones en cada condición. La producción de sedimentos promedio para el período de estudio fue de 48 kg/ha. Este bajo valor obtenido se pudo deber a la mantención de los troncos y sus raíces en el sitio, además de la baja intensidad en la quema aplicada, lo que facilitó a los altos niveles de infiltración en el sitio. Posteriormente, se realizó un estudio comparativo para evaluar el efecto de la intensidad de la quema en un sitio cosechado, los resultados obtenidos mostraron que la producción de sedimentos fue de 560 kg/ha para el sitio con baja intensidad en la quema y de 1390 kg/ha para el sitio que estuvo sometido a una alta intensidad en la quema (Robichaud *et al*, 1993).

Pizarro y Sangüesa (2002), determinaron que las pérdidas de suelo en un cuenca abastecedora de agua potable al pueblo de Florida VIII Región, donde se talara un bosque de *Pinus radiata* para aumentar el caudal, con quema de desechos y con sobrepastoreo posterior, eran del orden de 158,1 ton/ha/año en promedio, para tres años de observaciones.

2.6.2 Caminos Forestales

La falla de los caminos y la erosión de las superficie pueden ejercer un impacto tremendo en los recursos naturales, ya que causan pérdidas económicas serias por el bloqueo de los cursos de agua, además de la degradación del agua, puentes y caminos destruidos, sitios afectados por la depositación del volumen sedimentado, disminuyendo así la fertilidad del suelo, y por ende el valor económico de la propiedad (FAO, 1989).

Los impactos en el suelo debido a la construcción de caminos forestales son muchos. Entre los más directo se encuentran la construcción misma del camino, la excesiva remoción y erosión producida en el suelo, además del cambio en el flujo natural de los cursos agua. Menos obvio, pero a menudo lo más importante, es el movimiento de material erosionado fuera del sitio (Megahan, 1977). Todas estas alteraciones pueden causar un aumento en la producción de sedimentos en los cursos de agua creando un daño excesivo en la cantidad y calidad del agua, afectando negativamente tanto al hábitat como a la sociedad (Waters, 1995).

Según Gayoso *et al* (2000), la construcción de caminos de madereo y acceso pueden acelerar la erosión superficial y el movimiento de masas. Los derrames del excedente de tierras consecuencia de la técnica constructiva de caminos “bote al lado” y el no empleo de técnicas de estabilización de taludes constituyen la principal fuente de producción de sedimentos.

Según Waters (1995), la densidad y el largo de los caminos de cosecha forestal pueden ser factores principales en determinar el nivel de producción del sedimento en una cuenca. Las mayores acumulaciones de sedimentos finos en los cauces se producen cuando el área ocupada por los caminos exceden un 2,5% de la superficie total de una cuenca. Cuando el largo total de los caminos forestales es superior a los 2,5 km/km² en una cuenca, la producción de sedimentos es cuatro veces mayor que los rangos producidos naturalmente.

Un estudio en la región del Noroeste Pacífico de los Estados Unidos evaluó el impacto de la intensidad del tráfico sobre los caminos forestales en la movilización de sedimentos considerándose una precipitación anual de 3900 mm. Los resultados del estudio demostraron que aunque en algunos segmentos del camino exista un alto tráfico, correspondiente a un uso del 6% de la longitud total de los caminos construidos en la cuenca, el 70 % de la producción total de los sedimentos estarían siendo generados en esos segmentos altamente utilizados en algunos períodos del año (FAO, 1989).

La pérdida de suelos a partir de los caminos forestales, según el tipo de suelo, la pendiente del camino y la longitud del tramo, puede alcanzar valores medios anuales del orden de 1,6 a 11 kg/m² de superficie de camino, o bien extrapolando a un área forestal con una densidad de caminos de 16 a 30 m/ha, de 370 a 1600 kg/ha/año (Gayoso *et al.*, 2000).

En general, la producción de sedimentos puede alterar la calidad físico-química del agua, aumentando la turbidez y disminuyendo la concentración de oxígeno disuelto, lo cual puede tener efectos perjudiciales en las poblaciones de fauna y flora acuáticas y la disminución de la calidad de su hábitat (Gayoso e Iroumé, 1995; Keenan y Kimmins, 1993).

2.6.3 Zonas de Protección

Las Zonas de Manejo de Cauces (ZMC) son herramientas de manejo que intentan proveer una amortiguación a los cursos de agua en contra de la contaminación producto de las actividades agrícolas, de urbanización o silviculturales. En muchos estados se han incluidos las ZMC como componentes voluntarios u obligados en las Mejores Prácticas de Manejos en los programas de agricultura y en el desarrollo forestal. Muchos ZMC son franjas de anchos fijos adyacentes para cauces donde la intensidad de manejo es reducida. Sin embargo, la efectividad de este sistema puede variar por la topografía, material parental del suelo, y la hidrología (Keim *et al*, 1999).

El ecosistema ribereño son en la mayoría reconocidos por encontrarse en zonas de quebradas, áreas de inundación y en los bancos de los cauces. Son excepcionalmente caracterizados por la combinación de alta diversidad y densidades de especies, y alta eficiencia. Las continuas interacciones ocurren entre la ribera acuática y los ecosistemas terrestres adyacentes a través de los cambios de energía, nutrientes, y especies (William *et al*, 1981; Naiman *et al* 1998.)

Los sedimentos son los contaminantes más importantes en las superficies boscosas. Las ZMC han pretendido prevenir el transporte de sedimentos y nutrientes en los cauces por el flujo de la escorrentía superficial durante las precipitaciones. Éstas tienen como expectativas disminuir la escorrentía superficial durante las tormentas manteniéndose en el piso del bosque, lo cual provee una ruta más rugosa para el flujo en comparación a lo que ofrece el suelo mineral. El propósito de éstas son disminuir la velocidad para provocar una mayor infiltración o provocar la reducción de la escorrentía que afecta considerablemente al transporte de sedimentos en suspensión (Keim *et al*, 1999).

Según Keim *et al.* (1999), además de hacer más pequeña la entrega de sedimentos por las pendientes elevadas, las ZMC poseen también el propósito de mejorar la calidad del agua reduciendo la cantidad de disturbio en la zona ribereña. Las ZMC pueden prevenir el aumento en la producción de sedimentos por la cosecha forestal debido a la exclusión de las áreas alteradas tales como los caminos y huellas de madereos fuera del área que abarca la red de drenaje de una cuenca. Estos bosques son capaces de extraer el nitrato, el fósforo adherido a los sedimentos, y el fósforo disuelto en el agua subterránea que se mueve hacia las corrientes (Robles y Navas, 1998).

2.7 Transporte de sedimentos en los caudales

El transporte de sedimentos es un proceso que esta compuesto de dos etapas, las que se encuentran relacionadas con el desprendimiento y el comienzo del movimiento de las partículas individuales de la masa del suelo y el transporte propiamente tal, causado por los agentes de transporte como las corrientes de agua y viento. En el momento en que la energía de estos agentes no es suficiente para transportar las partículas, se produce una tercera fase que corresponde a la depositación (Morgan, 1997).

La fricción o choque del agua con los elementos terrosos de la superficie del suelo, conjuntamente con el impacto de la gota de lluvia y los diferentes procesos de meteorización, constituyen la primera fase de la erosión y la formación de elementos susceptibles de ser transportados (López y Blanco, 1976).

Según Gore (1996), la capacidad de transporte de sedimentos depende del poder o volumen de agua que presente el caudal, lo cual se puede ver acentuado a medida que la pendiente del cauce aumenta.

Los montos de sedimentos que son transportados en el interior de la red de drenaje por la pendiente u otra parte de la superficie son erodables por los sistemas fluviales que pueden cambiar enormemente entre cuencas hidrográficas debido a los numerosos factores que se encuentran involucrados en los procesos erosivos. Entre estos factores se incluyen el clima (regímenes de precipitación y temperatura), la topografía (pendiente del terreno), la vegetación (tipo y densidad de la vegetación) y la geología (características del material parental). Además, se suman las perturbaciones humanas y las prácticas de manejo que afectan a las cuencas hidrográficas y a los sistemas de los cauces pudiendo alterar de forma considerable las tasas naturales de erosión y la producción de sedimentos (Beschta, 1996).

Según Beschta, (1996) los sedimentos se caracterizan por presentar dos modos de transporte:

- **Suspensión:** Las partículas transportadas por suspensión en los cauces presentan tamaños típicamente menores a 0,1 mm de diámetro y consisten en partículas de limo y arcillas en su mayoría. Las partículas de sedimentos en suspensión son transportadas esencialmente en las partes bajas de los cauces donde la velocidad de transporte esta dada por la velocidad que presente el caudal. Las concentraciones de sedimentos en suspensión aumentan generalmente durante los períodos donde aumenta el flujo de caudal por efecto de las precipitaciones o el derretimiento de las nieves. Al representar esta forma de transporte una medida de calidad del agua se expresa en miligramos por litro principalmente.
- **Arrastre de fondo:** Las partículas transportadas por este modo son de mayor tamaño (mayor a 1 mm diámetro) y correspondiendo en su mayoría a arena gruesa, gravas o guijarros. La velocidad de transporte es menor que la velocidad del torrente, lo que produce que las partículas rueden o se deslicen sobre el fondo. El transporte de sedimentos de fondo no se expresan en términos de concentración, ya que no son un indicador de la calidad del agua.

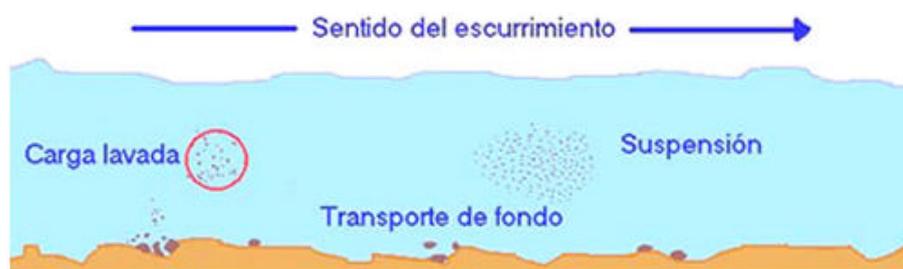


Figura 1. Tipos de transporte de partículas sólidas (Salgado, 2004)

Además Schulz (2000) incorpora otra forma de transporte denominado “Saltación”, donde los materiales avanzan a saltos sucesivos, describiéndose trayectorias discontinuas tanto en el espacio como en el tiempo.

Las cantidades relativas de sedimentos que avanzan en suspensión y el arrastre de fondo varían considerablemente. Cuando el sedimento es procedente de un suelo

grano fino como limo depositado por el viento, o una arcilla aluvial, el sedimento puede estar casi en su totalidad en suspensión. Por otro lado, una corriente de montaña limpia y rápida puede tener cantidades insignificantes de materia en suspensión y casi la totalidad del movimiento de la grava, los guijarros y las piedras se produce en el lecho de la corriente (FAO, 1997).

La cantidad de sedimentos que salen de una cuenca hidrográfica es menor que la removida de las secciones más escarpadas de las laderas, debido a la deposición de material en la base de éstas y en las llanuras anegables. Cuando la salida de sedimentos en una cuenca como carga en suspensión en los ríos es superior al desprendimiento de las laderas, la diferencia procede de la erosión de las riberas del río (Morgan, 1997).

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Material

3.1.1 Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el predio Nueva Etruria propiedad de Forestal Tornagaleones S. A., ubicado a 41 km al Oeste de la ciudad de Pitrufquén en la IX Región, este predio posee una superficie total de 7.500 ha, donde se desarrollan monocultivos de *Pinus radiata* D. Don principalmente, las cuales dado al escaso control de malezas presenta un abundante sotobosque. El predio se sitúa en un sector montañoso de la Cordillera de la Costa, con vertientes forestales y un valle de relieve plano que atraviesa el predio en forma transversal, en el que se encuentran vegas y terrenos inundados, dominados principalmente por especies de Mirtáceas como *Myrceugenia exsucca*, *Blepharocalix cruckshanksii*, *Amomyrtus luma* y *Luma apiculata*.

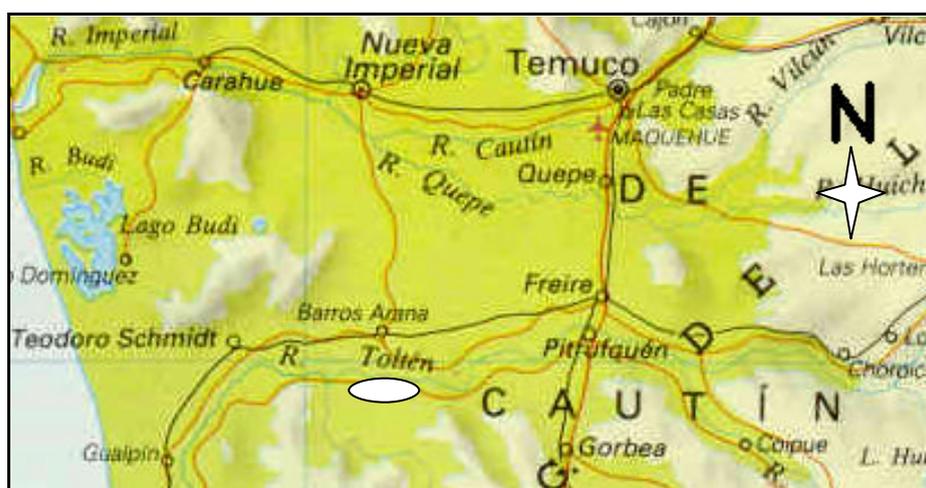


Figura 2. Ubicación del área de estudio (zona blanca)

Las cuencas consideradas para la realización del presente trabajo de titulación son dos; la primera denominada *Etruria 1 (E1)* de 19,29 hectáreas de superficie y la segunda *Etruria 2 (E2)* de 34,72 hectáreas de superficie (ver Anexo 2).

3.1.2 Antecedentes generales

El clima de la zona corresponde a Templado Cálido con estación seca corta, presentando una precipitación promedio anual de aproximadamente 1.800 mm y una temperatura media anual de 12° C (Fuenzalida, 1971). Las lluvias presentan una distribución temporal muy marcada durante el año, con los máximos aportes entre los meses de mayo y agosto, y los mínimos aportes en verano (Dirección General de Aguas, 1987).

Según Tosso (1985), el tipo de suelo corresponde a la serie Lastarria. Estos son relativamente delgados, generados a partir de cenizas volcánicas depositadas sobre un lecho de esquistos metamórficos ricos en micas y cuarzo, que presentan un avanzado estado de meteorización. Existen afloramientos rocosos de este material parental en diversos sectores del Predio.

3.1.3 Pluviógrafo

Los pluviógrafos utilizados para la medición de las precipitaciones, corresponden a un equipo tipo *Tipping buckets* (marca HOBBO Event), conectados a un *datalogger* que permite llevar el registro instantáneo. Estos pluviógrafos se encuentran ubicados en praderas libres de vegetación arbórea cercanas a cada cuenca en estudio.



Figura 3. Pluviógrafo HOBBO Event y Totalizador

3.1.4 Vertedero tipo Thompson

Para la determinación continua de caudales efluente de cada cuenca se cuenta con un vertedero triangular de pared delgada (tipo Thompson) con un ángulo en "V" de 60°. Este vertedero presenta la ventaja de adecuarse a la medida de caudales pequeños por la amplitud de la carga hidráulica.



Figura 4. Vertedero tipo Thompson

3.1.5 Características de las Plantaciones

Ambas cuencas en estudio presentan en el total de su superficie plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, destacándose además una alta presencia de sotobosque compuesto principalmente por *Arsitotelia chilensis*, *Rubus constrictus*, *Ugni molinae* y abundantes trepadoras como *Lapageria rosea*, que cumplen un efecto protector para el suelo ya que disminuyen el poder erosivo del impacto de las gotas de lluvias, sirviendo además como filtro para el transporte de los sedimentos hasta los cursos de agua.

3.2 Metodología

3.2.1 Período de estudio

El período de toma de datos comprende desde octubre del año 2001 hasta octubre del año 2003. Los primeros datos obtenidos desde octubre del año 2001 hasta enero del año 2003, tuvieron como propósito calibrar ambas cuencas, de manera tal de estandarizar la metodología de medición para el desarrollo del estudio (Chaves, 1994; Kozarik, 1989), estos datos fueron proporcionados por el Proyecto Impacto de las Plantaciones Forestales sobre el Recurso Hídrico. Durante el tiempo restante del estudio (febrero – octubre) se midió el efecto de la intervención silvicultural sobre la generación de caudales y producción de sedimentos en la cuenca experimental (E2).

3.2.2 Tratamiento

La cuenca *Etruria 1*, presenta una plantación de *P. radiata* establecida el año 1988. Esta fue designada como testigo y no presentó intervención alguna durante el período de estudio. La cuenca *Etruria 2* presenta una plantación *P. radiata* establecida en el año 1991, la cual fue intervenida posterior a la etapa de calibración con un raleo al 50% de la densidad inicial

Cuadro 1. Parámetros Dasométricos de ambas cuencas en estudio

Cuenca	Año Plantación	Densidad(N/ha)	DMC (cm)	G (m ² /ha)	Altura (m)	Cobertura (%)
E1	1988	517	27,9	31,6	23,7	64
E2	1991	897	22,3	35,0	16,3	86
E2*	1991	449	24,1	20,5	18,4	47

(*): Parámetros dasométricos posterior al raleo

En el cuadro 1 se observan los parámetros dasométricos para las cuencas E1 y E2, se puede apreciar que la cuenca testigo presenta menor área basal con respecto a la cuenca a intervenir, debido al menor número individuos. Por otro lado, se aprecia la disminución en la cuenca E2 en los parámetros de área basal y cobertura de copas producto de la intervención silvícola.

3.2.3 Antecedentes del raleo

Para facilitar el traslado de los camiones dentro del predio y en la cuenca, se realizó un mejoramiento en las condiciones de los caminos ya existentes, utilizando como maquinaria una retroexcavadora Ford 655 DT 4X4. De esta forma, en la superficie de la cuenca a intervenir se mejoraron 837 m de camino.

La labor de maderero desde la zona de volteo hasta las canchas de acopio (orilla de camino) se realizó utilizando dos yuntas de bueyes. El transporte de las trozas se desde la zona del raleo hasta los centros de consumo se realizó con un camión con grúa autocargable.

3.2.4 Caracterización Morfológica de las cuencas

➤ Determinación de superficies, curvas de nivel y cursos de aguas

En la caracterización de ambas cuencas, se trabajó con fotografías aéreas y una carta base proporcionada por Forestal Millalemu, en donde se delimitó ambas zonas de estudio. Con éstas se actualizaron y determinaron las superficies, perímetros, exposición, curvas de nivel y los cursos de agua presentes en cada una de las cuencas en análisis. De esta forma, se obtuvo una georeferenciación de ambas zonas mediante el uso del software Arc View 3.2[®], facilitándose así el cálculo de los parámetros morfológicos de E1 y E2.

➤ Parámetros Morfológicos

La obtención de los parámetros y representaciones geomorfológicos (Índice de Compacidad, Rectángulo Equivalente, Índice de Pendientes, Altitud Media, Coeficiente Orográfico, Densidad de Drenaje entre otros) se desarrolló utilizando las fórmulas presentadas en el Anexo 3.

➤ Curvas Hipsométricas y Curvas de Distribución

Esta información se obtuvo utilizando la metodología propuesta por Martínez de Azagra y Navarro (1996).

La Curva Hipsométrica muestra una visión del relieve y altimetría de las cuencas. Estas se obtuvieron en base a los datos de superficies existentes entre cada cota de ambas cuencas, de esta forma las superficies calculadas se asignaron al eje de las abscisas y la altitud en metros fueron situadas en el eje de las ordenadas.

Las Curvas de Distribución se calcularon en base al porcentaje de superficie total de la cuenca comprendida entre dos curvas de nivel, las que fueron ubicadas en el eje de las ordenadas.

3.2.5 Determinación de caudales

La determinación de caudal que midieron las estaciones de aforo, se obtuvo utilizando la siguiente fórmula:

$$Q = C * \tan \frac{b}{2} * h_1^{5/2} \quad (1)$$

Donde:

C: Coeficiente de descarga.

b: Angulo en "V" (°).

h₁: Carga hidráulica del vertedero (m).

Al no considerar la velocidad de llegada del agua y al ser el ángulo en "V" de 60°, la ecuación se reduce a la siguiente expresión:

$$Q = 0,762 * h_1^{2,47} * 3600 \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (2)$$

La aplicabilidad de esta ecuación es posible gracias al diseño del vertedero (ángulo en "V" de 60°)

3.2.6 Registro del caudal

Para llevar el registro del caudal de cada cuenca se confeccionaron limnógrafos, activados por 4 pilas de 1,5 volts. Éstos registraron la carga hidráulica con una frecuencia de lectura programable. Para determinar de mejor manera la reacción del caudal efluente frente a aportes importantes de agua por las precipitaciones, se determinó que la frecuencia con que se realizaron los registros de los limnógrafos fue cada 10 minutos. Estos datos eran registrados en un *datalogger*, capturándose la información de un mes por personal calificado en el tema.

3.2.7 Sedimentos en suspensión

➤ Toma de muestras de agua

La obtención de muestras de agua para el análisis de sedimentos que se encontraban en suspensión en el caudal, estuvo a cargo de un equipo electrónico que permitía extraer del efluente una muestra de agua cuya cantidad fuese proporcional al caudal del momento. Esta unidad era activada desde el limnógrafo con una frecuencia que puede ser programable, ocupándose en este estudio el ritmo de muestreo de 60 minutos. Para extraer el agua hacia un recipiente de 50 litros ubicado a un costado del vertedero se utilizó una minibomba cuya activación estaba dada por una batería de 12 Volts. Este recipiente y el instrumental electrónico se encuentran resguardo en una pequeña caseta ubicado junto al vertedero.

Mensualmente se extrajo una muestra representativa (integrada) de lo acumulado en el recipiente de 50 litros, esta muestra se homogenizaba revolviendo el contenido del recipiente para así poder obtener 3 muestras independiente de 2 litros agua, la cual

era envasada y etiquetada con el nombre de la cuenca y fecha de recolección, para su posterior análisis en laboratorio.

➤ Análisis de laboratorio

El análisis de los sedimentos fue realizado en el laboratorio del Instituto de Geociencias, en la Universidad Austral de Chile, Valdivia.

La metodología utilizada para el análisis de sedimentos fue la propuesta por Byers *et al.* (1978), la cual se basa en la diferencia entre peso seco del material (depositado en el papel filtro) menos el peso del papel filtro, obteniéndose así el peso total del material en suspensión, expresado en miligramos por litro (Anexo 4).

3.2.8 Arrastre de fondo

➤ Toma de muestras

Las tres muestras para el análisis de los sedimentos depositados por el arrastre de fondo, se recedtaban de manera de representar el total de sedimentos acumulados en el fondo del vertedero, las cuales eran extraídas mensualmente en bolsas plásticas etiquetadas con el nombre de la cuenca y fecha de recolección. Una vez extraídas las muestras, el fondo y las paredes del vertedero eran lavados para esperar una nueva sedimentación para el período de acumulación siguiente.

➤ Análisis en laboratorio

Para determinar la cantidad de sedimentos que se acumulan en el fondo del vertedero mensualmente producto del arrastre, se utilizó la metodología propuesta por Byers *et al.* (1978), la cual se obtiene mediante la siguiente relación (Anexo 4).

$$\frac{\text{Superficie muestra (m}^2\text{)} \otimes \text{Peso muestra (kg)}}{\text{Superficie vertedero (m}^2\text{)} \otimes X} \quad (3)$$

3.2.9 Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión (CSS) / Caudal medio

Para determinar esta relación se utilizaron los resultados obtenidos de la CSS y los datos obtenidos del caudal medio para cada período en que fueron obtenidas las muestras integradas de sedimentos. En este caso se utilizó una relación simple de transporte según Müller y Förstner (1968; citado por Iroumé, 1990):

$$CSS = a * Q^b \quad (4)$$

Donde:

CSS: Concentración de Sedimentos en Suspensión (mg/l)

Q: Caudal medio (l/h)

a, b: Parámetros

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las cuencas en estudio, los cuales se desarrollaron en función de los objetivos específicos planteados.

4.1 Caracterización morfológica de las cuencas

El cuadro 2 muestra la superficie, perímetro e Índice de Compacidad o Gravelius para las cuencas Etruria 1 y Etruria 2 respectivamente.

Cuadro 2. Superficie, Perímetro e Índice de Compacidad para ambas cuencas.

Cuenca	Superficie (km ²)	Perímetro (km)	I. Compacidad
E1	0,193	2,102	1,28
E2	0,347	2,710	1,40

En el cuadro 2 se observa que la cuenca E2 posee una superficie mayor (34,72 ha) que la cuenca E1 (19,29 ha), existiendo una diferencia entre ellas de 15,4 has. Este antecedente permite concluir que en el presente estudio es necesario realizar los análisis de la generación de caudales y producción de sedimentos al nivel de hectárea, de manera que éstos sean comparados en una misma unidad territorial. El perímetro de la cuenca E2 es 600 m mayor que la cuenca E1, situación que está en relación con su mayor tamaño.

Según el Índice de Compacidad, y de acuerdo a la categorización propuesta por Martínez de Azagra y Navarro (1996), ambas cuencas presentan una forma ovalada, por lo tanto, las aguas circulan por más cauces secundarios y su tiempo de concentración será mayor que en otro tipo de cuencas como las alargadas.

En el cuadro 3, se aprecia el valor del ancho y el alto del Rectángulo Equivalente. Los valores que presenta la cuenca E2 son más elevados que los valores de la cuenca E1, debido a la mayor superficie que presenta la primera con respecto a la segunda. En ambas cuencas las curvas de nivel se transforman en líneas rectas paralelas al lado menor del rectángulo, y el desagüe de la cuenca, que es un punto, queda convertido en el lado menor del rectángulo

Cuadro 3. Valores del ancho (L) y alto (l) del Rectángulo Equivalente para E1 y E2

Cuenca	L (km)	l (m)
E1	0,814	0,237
E2	1,012	0,343

Los parámetros relativos al relieve son muy importantes ya que la condición que presente una cuenca puede tener más influencia sobre la respuesta hidrológica que la forma misma de la cuenca.

Cuadro 4. Parámetros morfométricos para las cuencas E1 y E2

Parámetro	E1	E2
I. Pendiente	0.31	1.48
A. Mínima (m)	60	110
A. Máxima (m)	270	300
A. Media (m)	179.59	193.86
C. Orográfico (m/km ²)	74134.20	22183.75

En el cuadro 4 se puede observar que la cuenca E2 presenta un mayor valor que la cuenca E1 en el Índice de Pendientes y en la Altitud Media, con lo cual se puede deducir que la cuenca E2 presentaría un tiempo de respuesta menor que la cuenca E1 ante un evento de tormenta. Además se expone que la cuenca E2 se encuentra a una mayor altitud sobre el nivel del mar, ya que tanto su altitud mínima como máxima sobrepasan a la alturas que presenta E1.

Por otro lado, se aprecia que las cuencas E1 y E2 presentan valores del Coeficiente Orográfico muy superiores que al valor de referencia (6) que limita a un tipo de relieve de otro. Por lo tanto, queda demostrado claramente que el relieve de ambas cuencas en estudio es accidentado.

Cuadro 5. Densidad de Drenaje, Coeficiente de Torrencialidad y Tiempo de Concentración para las cuencas E1 y E2

Parámetro	E1	E2
D. Drenaje (km/km ²)	15,96	4,13
C. Torrencialidad (l/km ²)	25,92	14,40
T. Concentración (h)	0,35	0,34

El cuadro 5 muestra que los valores de Densidad de Drenaje son relativamente bajos lo que generalmente se asocian con regiones de alta resistencia a la erosión, muy permeables y de bajo relieve. Al observar los valores del Coeficiente de Torrencialidad se ve que la cuenca E1 presenta un mayor valor que la cuenca E2, esta diferencia en el valor estaría dada por la mayor superficie que existe entre una cuenca y otra, ya que tanto la cuenca E1 como la cuenca E2 presentan el mismo número (5) de cursos de orden 1 (Anexo 2). Además, se observa que el tiempo de concentración de la cuenca a intervenir es menor que la cuenca testigo, con lo cual se puede afirmar que E2 reacciona de forma más rápida ante un evento de tormenta.

La figura 5 muestra la Curva Hipsométrica tanto para la cuenca testigo como para la cuenca intervenida, se puede apreciar que tanto la cuenca E1 como la cuenca E2 presentan la mayor parte de su superficie en las partes más bajas de cada una de ellas. De acuerdo con lo propuesto por Martínez de Azagra y Navarro (1996) ambas cuencas en estudio corresponderían al tipo de cuenca de valle aluvial. También se puede apreciar que la cuenca E2 presenta una mayor pendiente y alcanza una mayor altitud que la cuenca testigo.

Las curvas hipsométricas también han sido asociadas con las edades de los ríos de las respectivas cuencas (Vélez, 2003). Por lo tanto, dado al perfil que presenta la cuenca E1 se podría asociar a un río joven, mientras que la cuenca E2 se podría relacionar a un río maduro, el cual se destaca por ser una curva intermedia que es característica de las cuencas en equilibrio (Anexo 5).

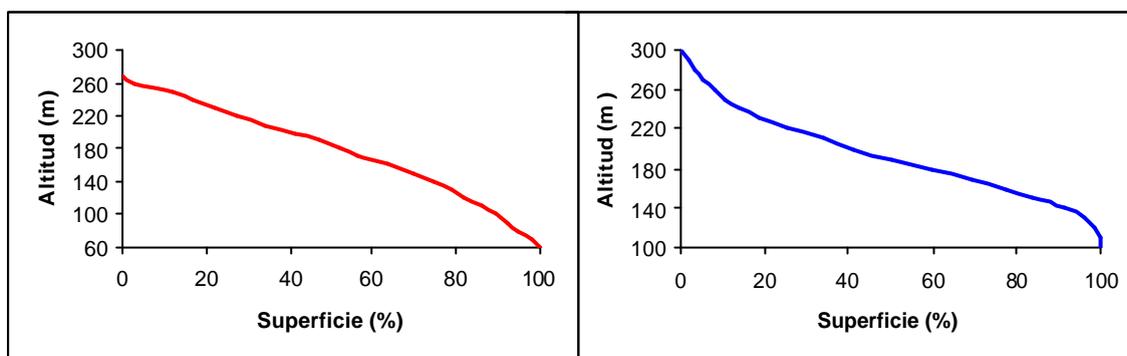


Figura 5. Curvas Hipsométricas para las cuencas Etruria 1 (Izq.) y Etruria 2 (Der.)

En la figura 6 se observa la curva de distribución para la cuenca testigo, se aprecia que su cota más baja se encuentra en los 60 m alcanzando una altura máxima de 270 m. También se puede destacar que dicha cuenca presenta el máximo porcentaje de superficie en el rango de cota 250-260 m, mientras que el menor valor del porcentaje de superficie se presenta en el rango de cota en donde se encuentra la estación de aforo. Entre el rango de cotas 130-140 m hasta el rango de cotas 230-240 m se aprecia la mayor parte de la superficie de la cuenca presentando un porcentaje de superficie entre el 4% al 6% de ésta.

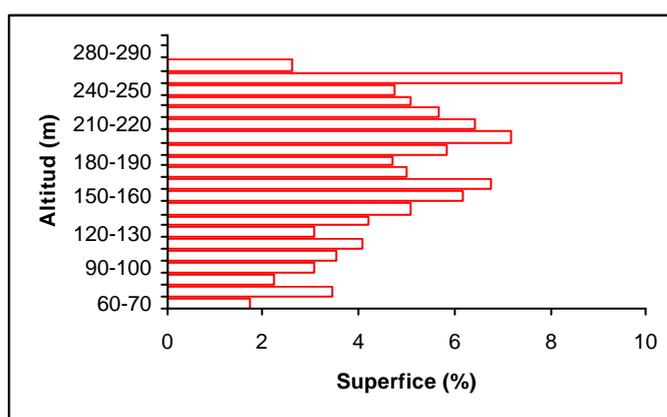


Figura 6. Curva de Distribución para la cuenca Etruria 1

La figura 7 muestra la Curva de Distribución para la cuenca a intervenir, se puede observar que la estación de aforo se encuentra en el rango de cota 100-110 m, aportando un bajo porcentaje de superficie (0,02%), mientras que la altura máxima que alcanza la divisoria de aguas es a los 300 m. El máximo porcentaje de superficie

(9,7%) es aportado por el rango de cotas 180-190 m, a partir de éste se observa que la participación en el porcentaje de superficie comienza a disminuir paulatinamente a medida que se asciende en altura. Además, se destaca que entre el rango de cotas 140-150 m hasta el rango de cotas 220-230 m la participación en el porcentaje de la superficie de la cuenca es superior al 6 %.

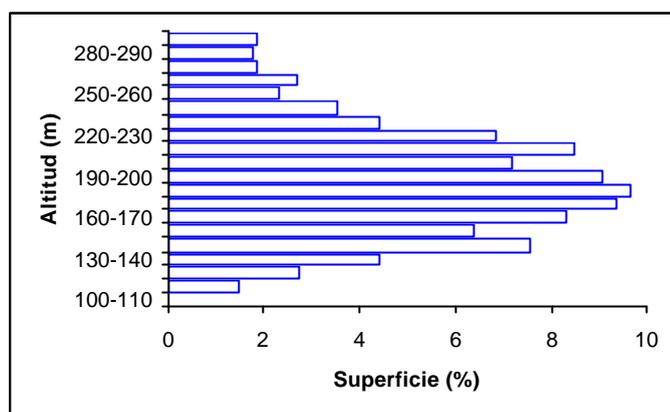


Figura 7. Curva de Distribución para la cuenca Etruria 2

La cuenca E2 presenta, por su relación superficie/perímetro (representada a través del Índice de Compacidad) y por las características de las pendientes, aparentemente una mayor velocidad de reacción frente a eventos de lluvia. Sin embargo, lo reducido de su red de drenaje puede indicar cierta lentitud para desplazar agua desde las partes más altas de la cuenca.

En definitiva, desde el punto de vista geomorfológico, no habría diferencias importantes en la posibilidad de que los caudales de ambas cuencas reaccionen frente a eventos de lluvia. Sin embargo, debido a la diferencia que existe entre las superficies de ambas, hace necesario analizar los resultados en una misma unidad territorial (hectárea).

4.2 Determinación de precipitaciones y generación de caudales

A continuación se presentan los valores de precipitación y generación de caudales, analizados a una escala mensual y evaluándose la reacción de las cuencas ante un evento de tormenta.

La precipitación registrada para los tres últimos meses del año 2001 fue de 119,3 mm, mientras que para el año 2002 los montos de precipitación alcanzaron los 2.058,4 mm, y para los 10 meses restantes del estudio las precipitaciones fueron del orden de 1.641 mm. De acuerdo con Fuenzalida (1971), las precipitaciones registradas durante el año 2002 estarían por sobre la precipitación media anual (1.800 mm) de la zona, superándolas en un 14,3%. Por otro lado, las precipitaciones

registradas hasta el mes de octubre del año 2003, están bajo en un 8,8% con respecto a la precipitación media anual.

Al determinar la precipitación mensual para cada año se obtiene que el promedio para el año 2002 fue de 171,5 mm y para el año 2003 fue de 164,1 mm, resultando un 4,5% mayor la precipitación caída en el primer período con respecto al segundo.

Para el año 2002 la precipitación media mensual más alta, se registró en octubre con 559,5 mm representando el 27,2% de la precipitación total, mientras que la precipitación media mensual más baja se registro en enero con 4,1 mm correspondiendo al 0,2% de la precipitación total para dicho año. La precipitación media mensual más alta durante los meses correspondientes al año 2003, se midió en el mes de junio con 556,7 mm aportando un 33,9% de la precipitación total, mientras que la precipitación media mensual más baja se registró en febrero con 9,3 mm correspondiendo a un 0,6% de la precipitación total para dicho período.

La figura 8 muestra la generación de caudales mensuales a nivel de hectárea para la cuenca testigo y la cuenca experimental. Se aprecia que durante la etapa de calibración (octubre del 2001 hasta enero del 2003) la cuenca E1 presentó mayor es caudales. Este antecedente fue como base para evaluar el efecto del raleo sobre la producción de agua. Posteriormente esta situación se ve revertida cuando es ejecutada la labor silvícola en el mes de febrero del año 2003, presentándose una clara diferencia en los meses de junio y julio en donde E2 sobrepasó la generación de caudales de E1 (224 m³/ha promedio), lo que es atribuible al impacto del raleo en el comportamiento del recurso hídrico.

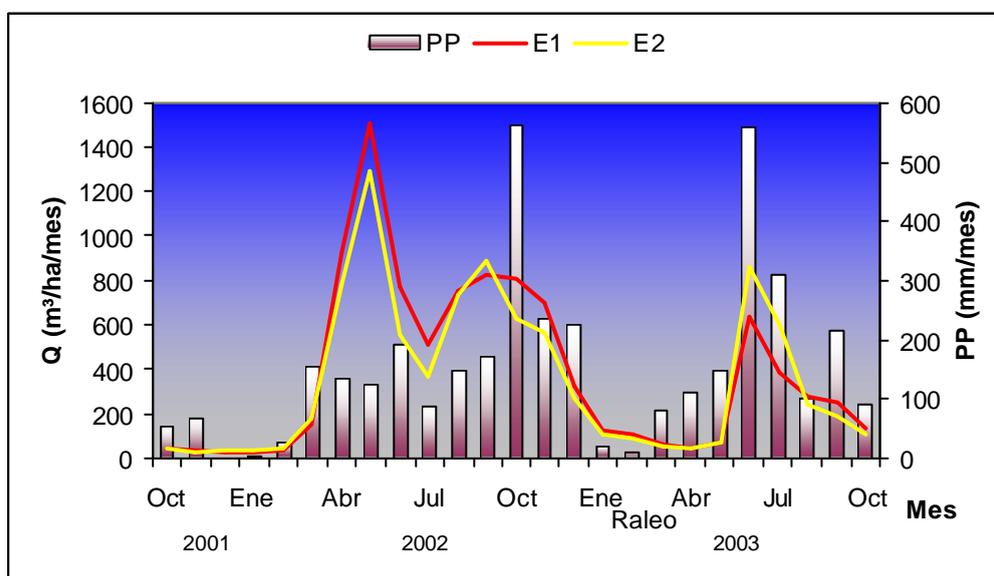


Figura 8. Comparación en la generación de caudales en las cuencas E1 y E2

En la figura 9 se puede apreciar la Curva de Doble Masas para los caudales mensuales acumulados, en la cual se compara la producción de agua entre la cuenca testigo y la cuenca intervenida.

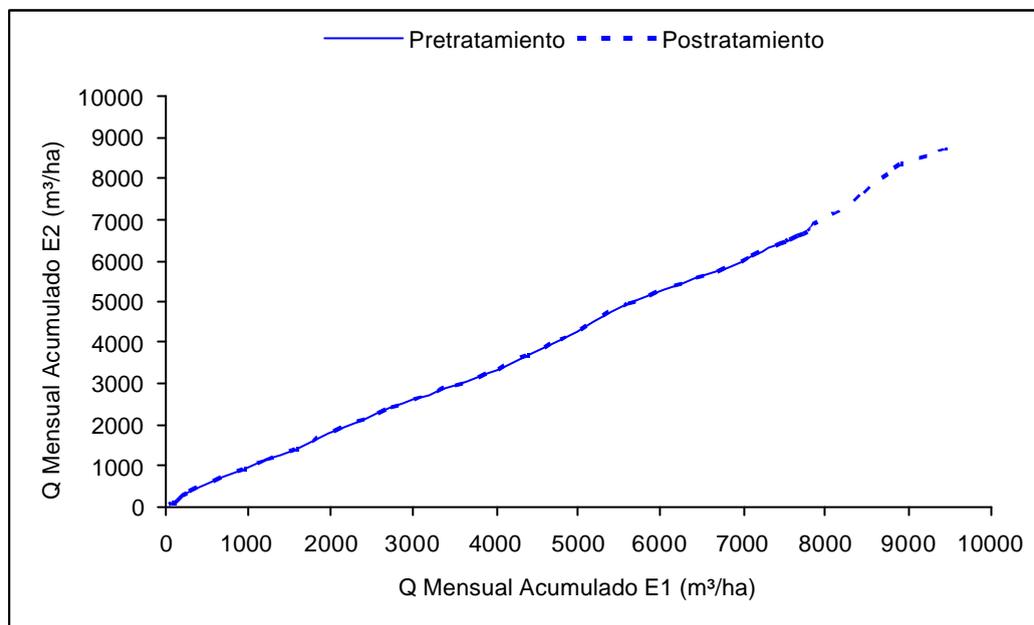


Figura 9. Curva de Doble Masas para Caudales Mensuales Acumulados

La generación de caudales acumulados después de disminuir el área basal en un 41% producto de raleo, aumentó en 2.263,9 m³/ha para la cuenca intervenida, mientras que los caudales acumulados aumentaron en 1.954,4 m³/ha para la cuenca testigo. De esta forma, la cuenca intervenida superó en un 16% en la generación de caudales a la cuenca testigo después de realizada la intervención, esta diferencia se debe a que al disminuir la cubierta vegetal las pérdidas por intercepción y evapotranspiración también se ven disminuidas, lo que se ve reflejado en un aumento en el rendimiento hídrico de la cuenca. Sin embargo, se puede observar un cambio en la pendiente de la curva postratamiento el cual podría estar dado por un aumento en el consumo de agua por parte de los árboles remanentes, es decir, la respuesta fisiológica del raleo se ve reflejado en un mayor consumo de agua de los árboles.

Los datos de precipitaciones y caudales mensuales y acumulados se presentan en el Anexo 6.

El análisis estadístico no encontró diferencias significativas para un 95% de confiabilidad en la generación de caudales entre las cuencas E1 y E2 posterior a la intervención (Anexo 7). No obstante, la tendencia apunta a que esta diferencia podría ser significativa para un período de evaluación mayor, lo que concuerda con lo descrito por Troendle (1983).

Estos valores son similares a las cifras obtenidas por Lane y Mackay (2001), en una cuenca al sudeste de Australia que presentaba como especies dominantes *Eucalyptus sp.*, cuyo tratamiento fue la remoción del área basal en un 22%. Estos autores registraron un aumento en la producción de agua cercano a los 2500 m³/ha/año.

Gottfried (1991), midió el efecto de la reducción de la densidad de los árboles en un 34% para una parte de la superficie de una cuenca (30,5 has) que estaba cubierta por una mezcla de coníferas en Arizona, los resultados obtenidos presentaron un aumento significativo de un 45% en la escorrentía anual.

En una cuenca con una precipitación media anual superior a 1100 mm al suroeste de Australia, Ruprecht y Stoneman (1993) midieron el efecto de un raleo que redujo la cubierta de *Eucalyptus sp* de un 60% a un 14%, los resultados mostraron un aumento en el caudal de 2600 m³/ha/año después de tres años de ejecutada la intervención.

A continuación se presenta el comportamiento de ambas cuencas durante un evento de tormenta antes y después de la intervención silvicultural, de esta forma se pretende analizar la forma de reacción de la cuenca E2 después de la intervención.

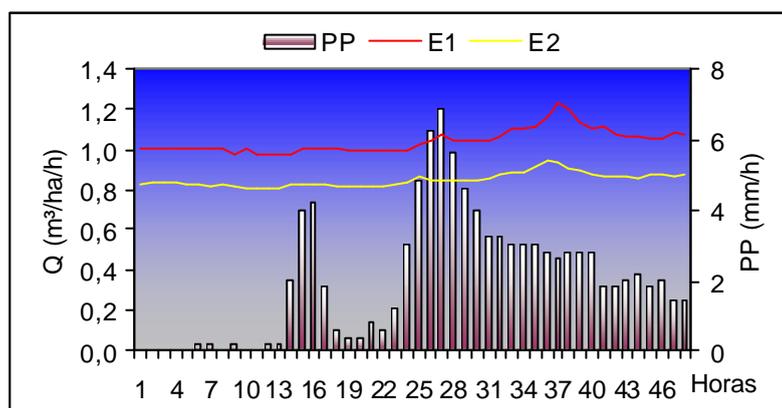


Figura 10. Respuesta a una tormenta en cuencas E1 y E2 antes del raleo (9 y 10 Octubre, 2002)

La figura 10 muestra la respuesta a un evento de tormenta para las dos cuencas en estudio, se aprecia que la cuenca E1 presentó una mayor producción de caudales aumentando en 0,19 m³/ha/h, mientras que la cuenca E2 generó un aumento en el caudal de 0,11 m³/ha/h, se puede destacar que ambas cuencas reaccionan de igual forma ante el evento. Sin embargo, se puede apreciar que la cuenca E2 reacciona con una hora de anticipación en la generación de caudales para el mismo evento.

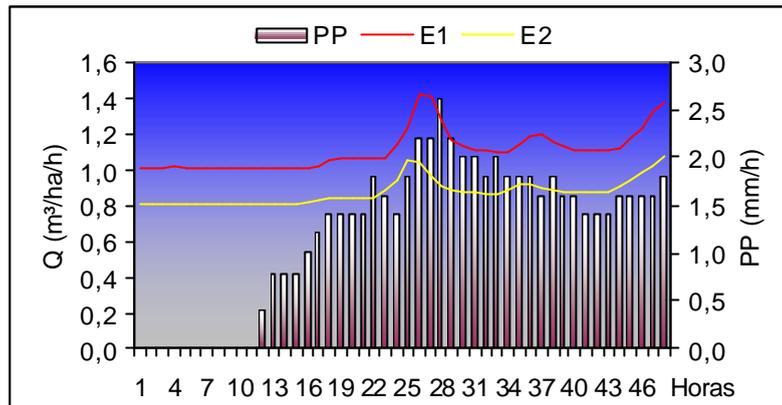


Figura 11. Respuesta a una tormenta en cuencas E1 y E2 antes del raleo (16 y 17 Octubre, 2002)

La figura 11 representa el comportamiento de E1 y E2 ante un evento de lluvia, se observa que antes de iniciarse el evento ambas cuencas presentan un caudal base, pero al momento de comenzar la precipitación ambas cuencas reaccionan con la misma tendencia, presentándose una diferencia constante en la magnitud entre ambas ($0,2 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{h}$). Además se puede apreciar que la cuenca testigo reaccionó una hora más tarde que la cuenca experimental.

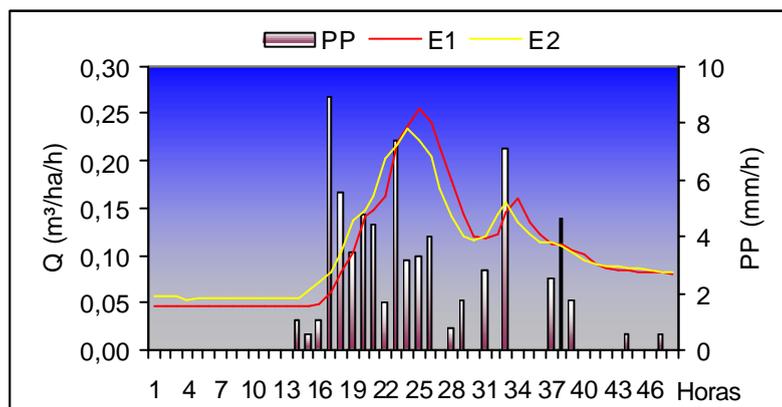


Figura 12. Respuesta a una tormenta en cuencas E1 y E2 después del raleo (21 y 22 Abril, 2003)

La figura 12 muestra la repuesta a la generación de caudales ante un evento de lluvia después de realizada la intervención silvícola, se aprecia que la cuenca raleada (E2) comienza a generar un volumen de agua mayor que la cuenca testigo, siendo ésta última sobrepasada en la producción de caudal en casi todo el evento, evidenciando el cambio en el comportamiento de la cuenca ante dicha intervención.

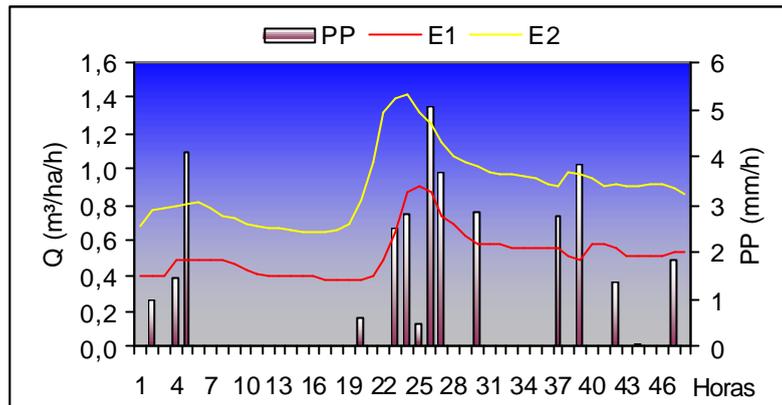


Figura 13. Respuesta a una tormenta en cuencas E1 y E2 después del raleo (26 y 27 Julio, 2003)

La figura 13 muestra el comportamiento en la generación de caudales en la cuenca testigo y la cuenca raleada, se observa que E2 presenta una mayor generación de caudales producto de la intervención, debido a que la vegetación removida redujo la interceptación y por ende la evapotranspiración, aumentando de esta forma el rendimiento hídrico para este evento. También se puede apreciar que el aumento en el caudal fue $0,76 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{h}$ en la cuenca intervenida, mientras que en la cuenca testigo el aumento en el caudal fue de $0,5 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{h}$, existiendo un aumento de un 52% de E2 con respecto E1 para este evento, lo que concuerda con lo propuesto por Jones y Grant (1996). Además, se puede apreciar que la cuenca intervenida reaccionó con 2 horas de anticipación con respecto a la cuenca control.

En general, se puede apreciar un aumento en el rendimiento hídrico de la cuenca E2 con respecto a la cuenca E1 posterior a la fecha en que se redujo el área basal de $35 \text{ m}^2/\text{ha}$ a $20,5 \text{ m}^2/\text{ha}$. Este efecto es provocado por una disminución en las pérdidas por interceptación y evapotranspiración, quedando una mayor cantidad de agua disponible para acceder hasta los cursos de agua.

4.3 Producción de sedimentos

La figura 14 muestra la producción de sedimentos acumulados totales (suspensión y arrastre de fondo) para el período de estudio completo, se puede apreciar que para los meses de octubre-diciembre del año 2001 la producción acumulada para E1 fue de $7,88 \text{ kg}/\text{ha}$, mientras que para la cuenca E2 la producción de sedimentos fue similar a E1 ($7,8 \text{ kg}/\text{ha}$).

Para la cuenca testigo la producción de sedimentos acumulados totales durante el año 2002 más la producción de enero del año 2003 fue de $75,98 \text{ kg}/\text{ha}$, considerando el mismo período de tiempo para la cuenca a intervenir la producción de sedimentos alcanzó $74,7 \text{ kg}/\text{ha}$, por lo tanto, hasta esa fecha no existían diferencias significativas en la producción de sedimentos entre una cuenca y otra.

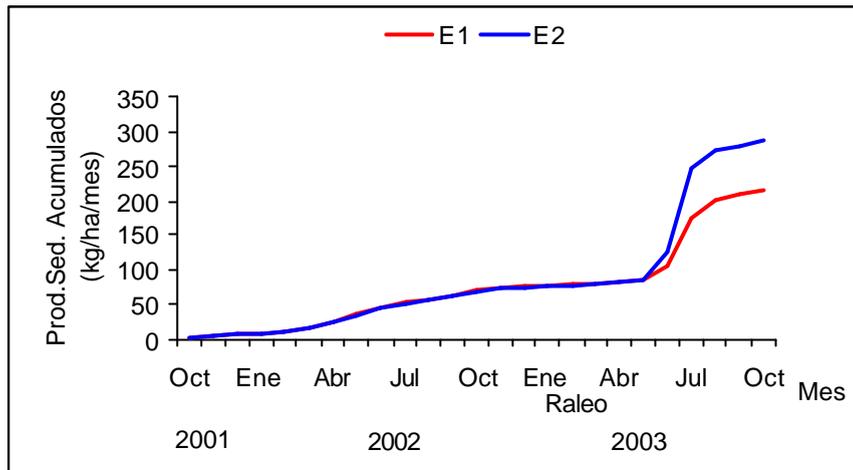


Figura 14. Producción de Sedimentos Acumulados para las cuencas E1 y E2

Al final del estudio, la producción de sedimentos acumulados totales para E1 fue de 216,74 kg/ha, mientras que para la cuenca E2 la producción de sedimentos acumulados fue de 285,29 kg/ha. De esta forma, la producción de sedimentos totales de la cuenca intervenida superó en un 31,6% a la producción de sedimentos de la cuenca testigo, siendo atribuido esta diferencia a la acción del raleo en la masa boscosa.

La producción de sedimentos totales para los dos años de duración del estudio se encuentran muy por debajo de los valores de tolerancia (2 - 3 ton/ha/año) propuesto por Peña *et al* (1992) para los suelos de origen metamórficos, con lo cual queda demostrado el efecto protector de la cubierta vegetal (para este caso la alta densidad del sotobosque en E2) al momento de reducir el poder erosivo de las gotas de lluvia.

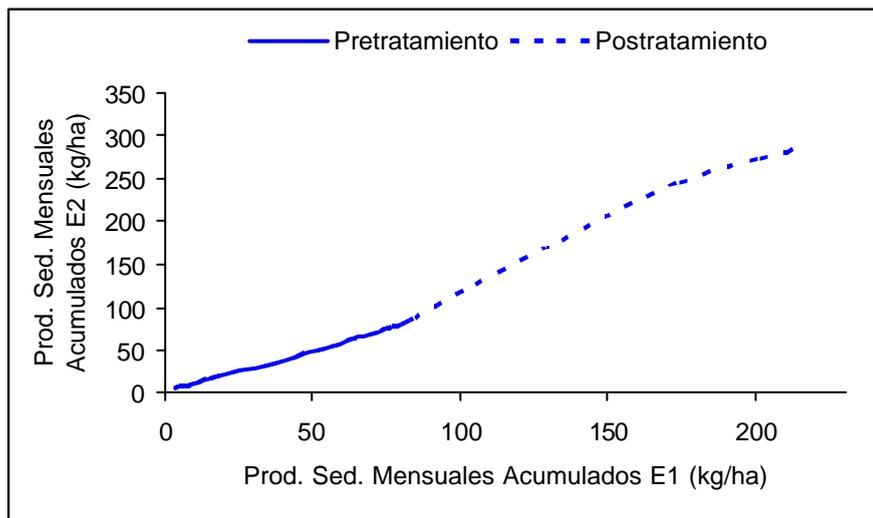


Figura 15. Curva de Doble Masas para producción de sedimentos

La figura 15, presenta la Curva de Doble Masas en donde se comparan la producción de sedimentos entre la cuenca testigo y la cuenca intervenida durante el período que abarcó el estudio. Se observa que los datos medidos en E1 fueron utilizados como estación patrón, para así comparar el efecto del raleo al 50% de la densidad inicial en la producción de sedimentos entre las cuencas experimentales.

Se expone la clara influencia del raleo en el aumento de la producción de sedimentos totales. No obstante, el análisis estadístico no presentó diferencias significativas para un 95% de confiabilidad en la producción de sedimentos de E2 con respecto a E1 (Anexo 7), pese a esto la tendencia al igual que en la generación de caudales sería al aumento, ya que el transporte de sedimentos esta fuertemente ligada a la reacción de los caudales (Beschta, 1996).

Al comparar la producción de sedimentos para un mismo período de tiempo en la cuenca a intervenir, es decir, considerando los meses de febrero hasta octubre para los años 2002 y 2003 respectivamente, la producción de sedimentos acumulados fue de 59,14 kg/ha para el año 2002, mientras que para el período de postratamiento la producción de sedimentos acumulados fue de 212,75 kg/ha. De esta forma, la producción de sedimentos acumulados en el período post-raleo superó en un 260% a la producción registrada antes de la intervención. Para un 95% de confiabilidad el análisis estadístico presentó diferencias significativas en la producción de sedimentos entre el período de pre y post raleo (Anexo 7).

Estos valores resultan ser bajos en comparación a un estudio realizado en una cuenca al este de Texas en donde se midieron los niveles de producción de sedimentos para tres condiciones distintas de cobertura arbórea. Los resultados obtenidos en el primer año de medición fueron de 57 kg/ha, 426 kg/ha y 2.301 kg/ha para la zona sin intervención (control), para la zona raleada y para la zona cosechada respectivamente. Al segundo año de medición la tendencia fue la misma produciéndose 73 kg/ha para la zona sin intervención, 283 kg/ha para la zona raleada y 2.817 kg/ha para la zona cosechada (Sayok *et al*, 1993).

En una cuenca ubicada en New Hampshire, se midió el efecto de una cosecha en la producción de sedimentos. Los resultados presentaron un aumento en promedio de 1,5 ton/km²/año alcanzando un máximo de 22 ton/km²/año tres años después de realizada la cosecha (Waters, 1995).

Cabe destacar que de la producción total de sedimentos para la cuenca testigo, un 62,1% fue aportado por los sedimentos en suspensión, mientras que el restante 37,9% fue registrado por el arrastre de fondo. Para la cuenca E2 el porcentaje de la producción total de sedimentos fue aportado en un 29,9% y 70,1% por los sedimentos en suspensión y arrastre de fondo respectivamente antes de la intervención silvícola. Luego de la intervención en la cuenca E2 el porcentaje aportado por los sedimentos en suspensión aumentó en un 86% mientras que el acarreo o arrastre de fondo aportó el restante 14%. Esto se podría atribuir a la remoción de la porción laminar del suelo producto del arrastre de las trozas y al tránsito en el interior de la cuenca por el madereo ejecutado por las dos yuntas de

bueyes, además de los aportes de sedimentos en suspensión que eran transportados por la escorrentía superficial del camino que pasaba a pocos metros de la estación de aforo (Anexo 2).

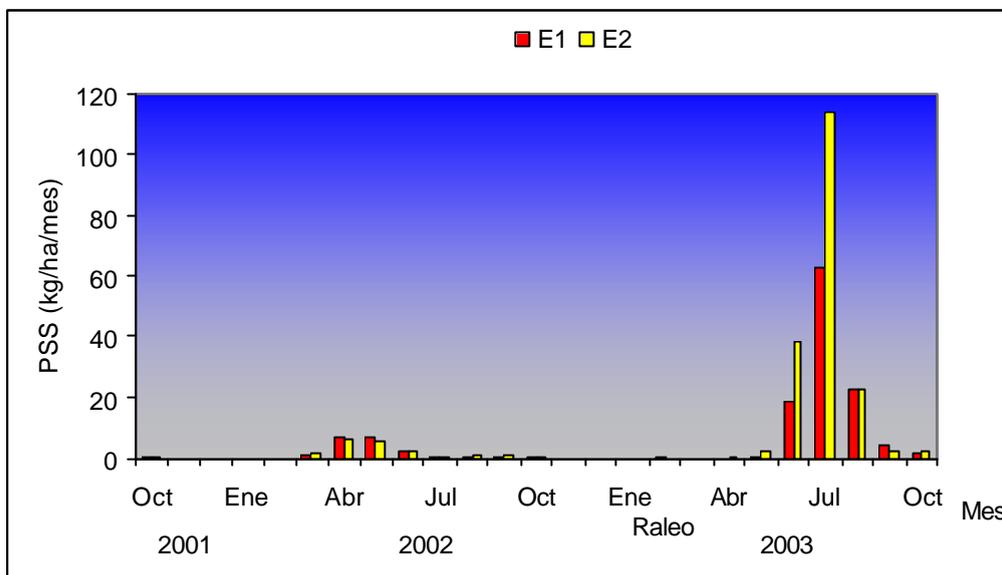


Figura 16. Producción de Sedimentos en Suspensión para las cuencas E1 y E2

La figura 16 muestra la producción de sedimentos en suspensión para ambas cuencas en estudio, se aprecia que para los meses del verano correspondientes a la temporada 2001-2002 la producción de sedimentos fue baja lo que se debió a los bajos niveles de caudales generados durante la misma época.

Mientras que para el mes de abril del año 2002 se presentó un alza en la producción tanto en la cuenca Etruria 1 como en la cuenca Etruria 2, alcanzándose valores de 7 kg/ha y 6,5 kg/ha respectivamente, siendo este mes el de mayor producción de sedimentos en suspensión para dicho año, ya que posteriormente la producción descende considerablemente hasta el verano del año 2003.

Después de ejecutado el raleo la producción de sedimentos en suspensión fue bajo hasta el mes mayo en donde la cuenca E2 comenzó a mostrar efectos importantes en la producción de sedimentos en comparación a la cuenca testigo. En julio se aprecia una considerable diferencia entre las cuencas E1 con respecto a E2, llegado el invierno esta producción se acentuó de forma considerable ya que en ambas cuencas la producción superó a todos los registros obtenidos hasta la fecha, en donde E1 produjo 63 kg/ha mientras que E2 produjo 114 kg/ha, lo que significó una producción mayor de 81% con respecto a la cuenca testigo, quedando claramente establecido el efecto del raleo sobre la cuenca intervenida, presentando una diferencia de 64,5% para el total del período después de realizado el raleo.

Estos valores se encuentran muy por debajo de los obtenidos por Iroumé (1990), en un área parcialmente forestada (27% con especies nativas y 33% con *P. radiata*) en

el sur de Chile. Para el período de estudio, se calculó que la producción total de sedimentos en suspensión fue de 84 toneladas, representando una producción específica de 90 ton/km²/año.

En una cuenca ubicada en la Décima Región, la producción de sedimentos en suspensión después de una cosecha a tala rasa en una plantación de *Pinus radiata* y madereo con tractor forestal aumentó significativamente de 0,79 ton/km² a 22,8 ton/km² (Schulz, 2000).

En un estudio realizado en una cuenca semiforestada de 90 ha cercana a la ciudad de Valdivia con una precipitación de 1.485 mm, el transporte de sedimentos en suspensión fue de 90,3 ton/km²/año para el primer período de mediciones, mientras que para el segundo período de medición este valor disminuyó a 2,6 ton/km²/año (Iroumé, 1990).

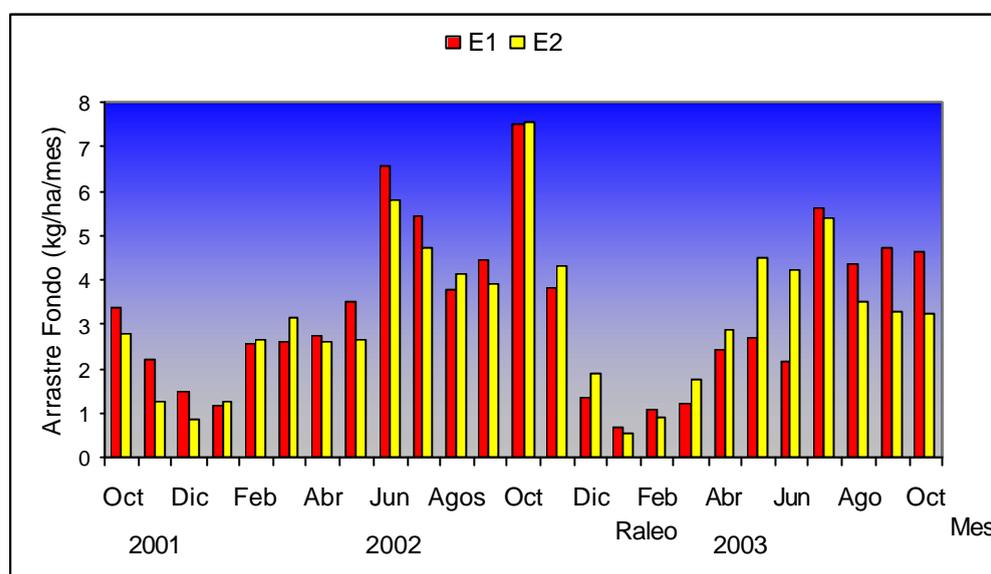


Figura 17. Arrastre de fondo para las cuencas E1 y E2

La figura 17 muestra la producción de sedimentos por arrastre de fondo para las cuencas E1 y E2, se puede apreciar que en la mayor parte de la etapa de calibración el arrastre de fondo de la cuenca E1 fue levemente mayor que la producción obtenida en la cuenca E2, siendo la producción acumulada mensual mediante esta forma de transporte de 53,3 y 50,2 kg/ha respectivamente, existiendo una producción superior de un 6,2% de E1 con respecto a E2. Posterior a la intervención la producción acumulada por acarreo fue similar en ambas cuencas registrándose 28,9 kg/ha y 29,8 kg/ha para la cuenca testigo y la cuenca raleada respectivamente.

Todos los valores de producción de sedimentos totales, en suspensión y arrastre de fondo se presentan en el Anexo 8.

En definitiva ante todos los antecedentes presentados, se puede deducir que si bien la producción de sedimentos fue mayor en la cuenca E2 después de la intervención con respecto a la cuenca control y a ella misma antes de la intervención, los valores obtenidos se encuentran por debajo de los montos registrados en este tipo de actividades, lo cual se puede atribuir a la no construcción de caminos sino que ha un mejoramiento de ellos, alta presencia de sotobosque que disminuye el impacto de las gotas de lluvia, sistema de cosecha utilizado ya que al presentar un baja mecanización el impacto hacia el recurso suelo no es tan importante como el impacto ejercido por un sistema de cosecha de mayor mecanización.

4.4 Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión / Caudal medio

A continuación se presenta la relación gráfica entre la concentración de sedimentos en suspensión con el caudal medio de cada cuenca en estudio.

En las figuras 18 y 19 se puede apreciar la relación entre la concentración de sedimentos en suspensión y los caudales medios para las cuencas Etruria 1 y Etruria 2 respectivamente. En el Anexo 9 se presentan los datos utilizados para la confección de ambas curvas.

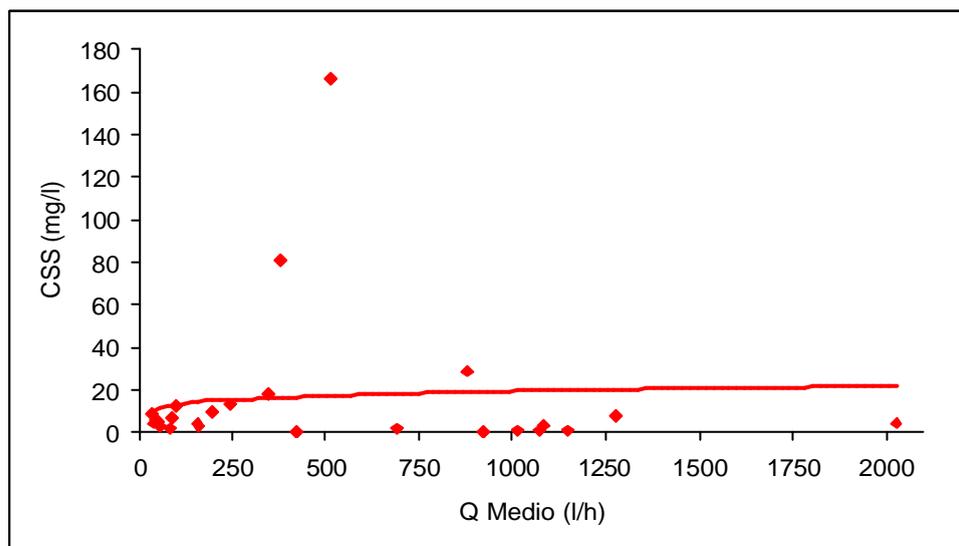


Figura 18. Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión (CSS) y Caudal Medio para la cuenca E1

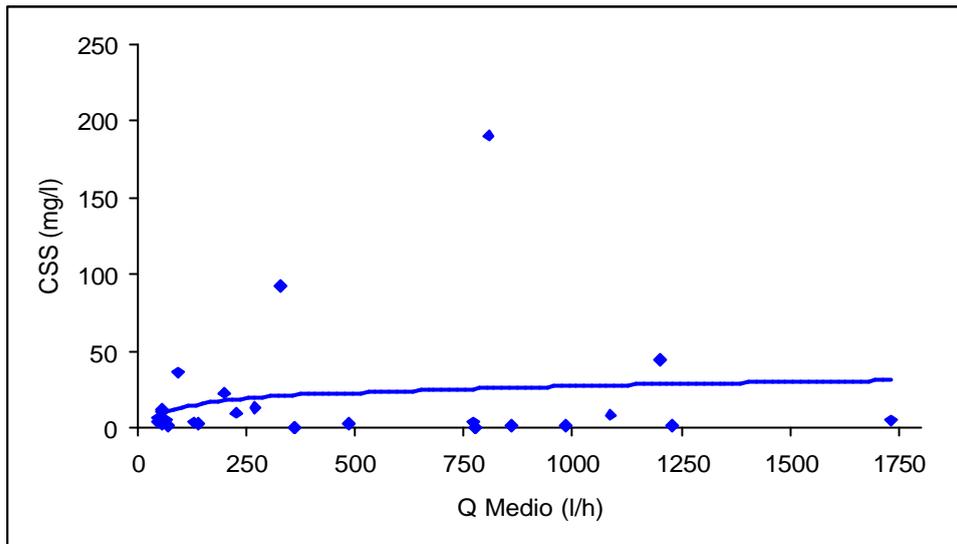


Figura 19. Relación Concentración de Sedimentos en Suspensión (CSS) y Caudal Medio para la cuenca E2

Como se puede apreciar en las figuras 18 y 19, la concentración de sedimentos en suspensión varió entre 0,15 mg/l y 165,77 mg/l para la cuenca control, mientras que para la cuenca raleada los valores de la concentración de sedimentos en suspensión varió entre 0,22 mg/l y 190,65 mg/l. Estos valores se encuentran muy cercanos a los obtenidos por Iroumé (1990) para un estudio realizado en una cuenca cercana a la ciudad de Valdivia, donde el rango de concentración de sedimentos en suspensión fue entre 14 y 186 mg/l. Cabe señalar que esta cuenca se encuentra cubierta por 27% de bosques nativos, un 33% esta cubierta por *P. radiata* y el 40% restante de su superficie corresponden a praderas. Sin embargo, la concentración de sedimentos promedio fue de 15,7 mg/l y 19,2 mg/l para la cuenca control y la cuenca intervenida respectivamente, encontrándose muy por debajo del valor promedio determinado por Iroumé (1990).

Estos valores son bajos en comparación a un estudio realizado en la Costa de Oregon en una cuenca cubierta de coníferas, donde la concentración de sedimentos en suspensión presentó rango de valores entre 10 mg/l y 1600 mg/l (Vansickle y Beschta, 1983).

A continuación se presenta la relación de transporte ajustada para cada cuenca en estudio, cabe señalar que para evaluar el efecto del caudal con la concentración de sedimentos en suspensión se consideró el caudal medio, el caudal máximo y el producto de éstos dos, para determinar con cual de ellos existe una mejor relación.

Cuadro 6. Ajuste entre Concentración de sedimentos en suspensión y caudal

Cuenca	Relación	r ²
E1	CSS = 21,535 * Q Me ^{0,126}	0,177
	CSS = 20,959 * Q Máx ^{0,190}	0,181
	CSS = 21,631 * Q Me Máx ^{0,080}	0,179
E2	CSS = 36,512 * Q Me ^{0,258}	0,209
	CSS = 31,027 * Q Máx ^{0,309}	0,215
	CSS = 35,133 * Q Me Máx ^{0,150}	0,213

Donde:

Q Me: Caudal Medio (l/h)

Q Máx: Caudal Máximo (l/h)

Q Me Máx: Caudal Medio por Caudal Máximo

Los parámetros “a” y “b” dependen de la cubierta vegetal y de las características climáticas, físicas e hidrológicas de la cuenca. En las ecuaciones obtenidas el valor de “a” es alto en comparación al valor obtenido por Iroumé (1990), este aumento en el valor de “a” se ajustan a cuencas que presentan facilidad a la erosión y cambios en el canal dentro de ésta, mientras que los valores bajos “b” indican bajo poder de erosión. De esta forma, se produce una especie de contrariedad con respecto a los parámetros obtenidos, lo que indica que no existe buena correlación entre la concentración de sedimentos en suspensión medida por muestras integradas con el caudal medio.

Con un 95% de confiabilidad, para el coeficiente de determinación se afirma que no existe relación entre la concentración de sedimentos en suspensión y el caudal ya sea en cualquier forma de sus mediciones. Esto se debe a la forma en que se realizó la toma de muestra de los sedimentos en suspensión, ya que al ser ésta una muestra integrada no representa o es difícil de determinar con exactitud la magnitud del caudal que produjo un determinado aporte de sedimentos en suspensión. Por lo tanto, se puede afirmar que las muestras integradas no son eficientes al momento de ajustar una relación entre la concentración de sedimentos en suspensión y el caudal, siendo lo óptimo la toma de muestras de sedimentos y medición de caudales en forma instantánea.

5. CONCLUSIONES

- Los resultados obtenidos por este estudio permitieron conocer la respuesta en la generación de caudales y sedimentos producto de un raleo al 50% de la densidad inicial en una cuenca cubierta por *Pinus radiata* D. Don, ubicada en la Cordillera de la Costa en la Novena Región de Chile.
- El tiempo de concentración de la cuenca E1 fue mayor con respecto al tiempo de concentración de la cuenca E2, lo cual se vio reflejado en la respuesta a determinados eventos de tormentas. De acuerdo con el perfil de las curvas hipsométrica, la cuenca testigo estaría en una fase de juventud con respecto a la formación de su cauce principal, mientras que la cuenca intervenida se encontraría en una fase de madurez que es característico de las cuencas en equilibrio.
- El análisis estadístico no presentó diferencias significativas en la generación de caudales entre la cuenca control y la cuenca intervenida. Sin embargo, la respuesta en la cuenca E2 fue superior en un 16% con respecto a los caudales producidos por la cuenca E1, lo que se atribuye al efecto de la disminución en la densidad de la masa boscosa. De acuerdo con la literatura consultada esta diferencia se podría ver acentuada en un período de análisis más prolongado, ya que este estudio comprendió sólo ocho meses de medición después de ejecutada la intervención.
- La producción de sedimentos en la cuenca E2 fue superior 31,6% con respecto a la cuenca E1. Sin embargo, el análisis estadístico no presentó diferencias significativas entre las cuencas después de realizada la intervención. Esta baja diferencia se debió al sistema de cosecha utilizado, ya que al trabajar con tracción animal el impacto en el recurso suelo es bastante menor que el producido por faenas de alta mecanización. A pesar de esto, al comparar la producción de sedimentos en la cuenca E2 antes y después del raleo, el análisis estadístico encontró diferencias significativas.
- La mayor diferencia en la producción de sedimentos entre la cuenca control y la cuenca intervenida, estuvo dada por los sedimentos en suspensión donde E2 superó en un 64,5% a la producción de E1 luego de realizada la intervención. Mientras que la producción por acarreo o arrastre de fondo no presentó grandes diferencias entre las cuencas, ni tampoco en la cuenca intervenida entre los períodos de pre y post-raleo.
- La concentración de sedimentos en suspensión presentó rango de variaciones similares a los obtenidos por Iroumé (1990) en una cuenca cercana a Valdivia. Sin embargo, al determinar la relación entre concentración de sedimentos en suspensión y el caudal el coeficiente de determinación (r^2) resultó ser bastante bajo, lo que se debe al método por el cual fueron tomadas las muestras, ya que al ser integrada no representa claramente el efecto del caudal ante un determinado aporte de sedimentos.

- Se concluye que el raleo al 50% de la densidad inicial no presentó diferencias significativas en la generación de caudales. El mayor impacto de esta intervención estuvo enfocado en la producción de sedimentos al momento de comparar el período de pretratamiento con el de postratamiento.
- Finalmente para evaluar el comportamiento de una cuenca en la generación de caudales y producción de sedimentos ante una intervención silvícola, se recomienda prolongar el período de estudio de manera de poder analizar de mejor manera la dinámica de ésta.
- Ante la poca información que existe en nuestro país sobre la generación de caudales y procesos de transporte de sedimentos, se espera que mediante este estudio se realice un aporte a las investigaciones ya realizadas que se encuentran ligadas a las prácticas silvícolas sobre el impacto que producen en los recursos de agua y suelo. De esta forma, en conjunto con otros estudios relacionados se puede evaluar la importancia de considerar en las mejores prácticas de manejo la protección de los cauces mediante el uso de zonas buffer, sistemas de cosechas adecuados con respecto a la pendiente y a las características del suelo, evitando además el uso del fuego en la quema de residuos, etc.

6. BIBLIOGRAFIA

- Beschta, R. 1996. Suspended Sediment and Bedload. Chapter 7. *In*. Hauer, R; G. Lamberti (eds). *Methods in Stream Ecology*. California, Academic Press. pp 123 - 143
- Best, A.; L., Zhang; T., McMahon; A., Western; R., Vertessy. 2003. A critical review of paired catchments studies with reference to seasonal flows and climatic variability. Canberra, Csiro Land and Water Report. 58 p.
- Byers, S.; E. Millis, P. Stewart. 1978. A comparison of methods of determining organic carbon in marine sediments, with suggestions for standard method. *Hydrobiologia* 58: 43 - 47
- Calder, I. R. 1992. The hydrological impacts of land-use change with special reference to afforestation and deforestation. *In*: Proceedings of the conference on priorities for water resources allocation and management, natural resources and Engineers Advisers conference, July 1992. Southampton, Overseas Development Administration. pp. 91 - 101
- Cicco, D. 1989. Estimativa da Evapotranspiração em Bacia Hidrográfica com floresta natural secundária de Mata Atlântica. Instituto Forestal Sao Paulo 1(2): 1 - 119
- Chang, M.; S.P., Watters. 1984. Forest and other factors associated with streamflow in east Texas. *American Water Resources Association* 20 (5): 713 - 719
- Chaves, H. M. L. 1994. Criterios para la selección de áreas piloto, en erosión de suelos en América Latina. INTERNET: <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S0g.htm> (Mayo 26, 2003)
- Dirección General de Aguas. 1997. Balance Hídrico de Chile. Santiago. Ministerio de Obras Públicas. 47 p.
- Fahey, B. 1994. The effects of plantation forestry on water yield in New Zealand. *New Zealand Forestry* 18 - 23
- FAO. 1986. Desarrollo de cuencas hidrográficas y conservación de suelos y aguas. Roma, FAO. 229 p. (Boletín de Suelos de la FAO, 44).
- FAO. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. Roma, FAO. 96 p. (Boletín de Suelos de la FAO, 68).
- FAO. 1989. Road Design. Chapter III. Watershed management field manual: Road design and construction in sensitive watersheds. Roma. 48 - 84 p.

- Fattorelli, S.; E. Civardi; D. Nardin. 1996. Documentos de desarrollo y gestión de cuencas hidrográficas. Roma, Eurograf-Padova. 557 p. (Serie Cooperación, 6)
- Fuenzalida, H. 1971. Clima: Geografía Económica de Chile. Texto refundido. Corporación de Fomento de la Producción. Santiago, Chile. 99 - 152 p.
- Gayoso, J.; A., Iroumé. 1995. Impacto de las plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque* 16 (2): 3 - 12
- Gayoso, J.; B., Schlegel; M., Acuña. 2000. Guía de conservación de agua. Valdivia. Universidad Austral de Chile. 50 p.
- Gilmour, D. 1977. Logging and the environment, with particular reference to soil and stream protection in the tropical rain forest situations. Chapter 13. *In*: Kunkle S., J. Thames. Guidelines for Watershed Management. FAO Conservation Guide. Roma. 223 - 235 p.
- Gore, J. 1996. Discharge Measurements and Streamflow Analysis. Chapter 3. *In*. Hauer, R; G. Lamberti (eds.). Methods in Stream Ecology. California, Academic Press. pp 53 - 74
- Gottfried, G. J. 1991. Moderate timber harvesting increase water yields from an Arizona mixed conifer watershed. *Water Resources Bulletin: American Water Resources Association* 27 (3): 537 - 547
- Huber, A.; A. Martínez. 1995. Redistribución de las Precipitaciones en un bosque de la Pluviselva Valdiviana. *Medio Ambiente* 12 (2): 7 - 13
- Huber, A.; C., Oyarzún. 1984. Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de *Pinus radiata* D. Don. *Bosque* 6 (2): 74 - 82
- Iroumé, A.; J., Gayoso; L., Infante. 1989. Erosión Hídrica y alteración del sitio en cosecha a tala rasa. *Revue D' Ecologie Et De Biologie Du Sol*. 26 (2): 171 - 180
- Iroumé, A. 1990. Assesment of Runoff and Suspended Sediment Yield in a Partially Forested Catchment in Southern Chile. *Water Resources Research* 26 (11): 2637 - 2642
- Iroumé, A. 2003. Transporte de sedimentos en una cuenca de montaña en la Cordillera de los Andes de la Novena Región de Chile. *Bosque* 24 (1): 125 - 135
- Jones, J. A.; G. E., Grant. 1996. Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research* 32 (4): 959 - 974

- Keenan, R. J.; J. P., Kimmins. 1993. The ecological effects of clear-cutting. *Environ. Rev.* 1: 121 - 144
- Keim, R.; S., Schoenhltz. 1999. Functions and effectiveness of silvicultural stramside management zones in loessial bluff forests. *Forest Ecology and Management* 18: 197 - 209
- Kozarik, J. C. 1989. Bases para la formulación de estudios hidrológicos forestales en cuencas piloto. *In: Actas Primeras Jornadas Técnicas sobre bosques implantados en el noreste argentino.* Facultad de Ciencias Forestales. El Dorado, Misiones. 12 p.
- Kramer, F. 1974. Relaciones hídricas de suelo y plantas. Una síntesis moderna. Agencia para el Desarrollo Internacional (AID). Mexico. 538 p.
- Lane, P.; S., Mackay. 2001. Streamflow response of mixed-species eucalypt forests to patch cutting and thinning treatments. *Forest Ecology and Management* 143: 131 - 142
- Lee, R. 1980. *Forest Hydrology.* New York, E.E.U.U. Columbia University Press. 349 p.
- León, F. 1996. Caracterización y balance hídrico de la cuenca experimental "Los Pinos" de Valdivia, X Región. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 204 p.
- Lewis, J. 1998. Evaluating the Impacts of Logging Activities on Erosion and Suspended Sediment Transport in the Caspar Creek Watersheds. Chapter 7. *In: Ziemer, R. Proceedings of the Conference on Coastal Watersheds: The Caspar Creek Store.* California, Pacific Outhwest Research Station. Pp. 55 - 70
- López, C.; C. Blanco. 1976. *Hidrología Forestal.* Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. v.1, 387 p.
- Martínez de Azagra, A.; J. Navarro. 1996. *Hidrología Forestal: El Ciclo Hidrológico.* 3 ed. Valladolid, Secretariado de Publicaciones, Universidad de Valladolid. 286 p.
- MIDEPLAN. 1998. *Cuencas hidrográficas en Chile: Diagnósticos y Proyectos.* Santiago. Andros. 207 p.
- Megahan, W. 1977. Reducing Erosion Impacts of Rodas. Chapter 14. *In: Kunkle S., J. Thames. Guidelines for Watershed Management.* FAO Conservation Guide. Roma. 237 - 262 p.
- Morgan, R. P. 1997. *Erosión y Conservación del Suelo.* 2 ed. Madrid. 343 p.

- Naiman, R. J., R. E., Bilby. 1998. River Ecology and management: Lessons from the Pacific Coastal Ecoregion. Springer Verlag, New York. 325 p.
- Peña, L.; P., Carrasco; M., Figueroa; C., Oyarzún; B., Lo Cascio. 1992. Pérdidas por erosión hídrica en suelos agrícolas y forestales de la cuenca del Río Bío-Bío. *In: Elementos Cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal.* Concepción, EULA. pp. 47 - 60
- Pizarro, R. y C., Sangüesa. 2002. Estudios Hidrológicos en la Región del Maule. Talca, Editorial de la Universidad de Talca. Volumen 1. 195 p.
- Putuhena, W.; I. Cordery. 2000. Some hydrological effects of changing forest cover from eucalypts to *Pinus radiata*. *Agricultural and Forest Meteorology.* 100: 59 - 72
- Robichaud, P.; R., Foltz; Ch., Luce. 1993. Development of an on site sediment model for forest roads and timber harvest areas. . *In.* Hadley, R.; T. Mizuyama. *Sediments Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control.* IASH Publication N° 217. UK. IASH – AISH. 135 - 140 p.
- Robles, L., A., Nava. 1998. Playing with *Asimina triloba* (pawpaw): a species to consider when enhancing riparian forest buffer systems with non-timber products. *Ecological Modelling* 112: 169 - 193
- Rothwell, R.L: 1978. Watershed management guidelines for logging and road construction in Alberta. Can. For. Serv., North For. Res. Cent., Edmonton, Alberta. Inf. Rep. NOR –X-208, 43 p.
- Ruprecht, J. K.; G. L. Stoneman. 1993. Water yield in the jarrah forest of south-western Australia. *Journal of Hydrology* 150: 369 - 391
- Salgado, S. 2004. Impacto de la erosión en los ríos: Transporte de sedimentos. INTERNET: <http://www.aguaydesarrollosustentable.com/200401/Articulo6.html> (Marzo 7, 2004)
- Sayok, A.; M. Chang, K. Watterston. 1993. Forest clearcutting and site preparation on a saline soil in East Texas: impact on sediment losses. *In.* Hadley, R.; T. Mizuyama. *Sediments Problems: Strategies for Monitoring, Prediction and Control.* IASH Publication N° 217. UK. IASH – AISH. 177 - 184 p.
- Scatena, F. 1990. Watershed scale rainfall interception on two forested watershed in the Luquillo Mountains of Puerto Rico. *Journal of Hydrology* 113: 89 - 102
- Schulz, K. 2000. Caudales y sedimentos en suspensión para el período de verano en cuencas experimentales de la X Región, Chile. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 65 p.

- Témez, J. R. 1978. Cálculo Hidrometeorológico de Caudales Máximos en pequeñas cuencas naturales. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dirección General de Carreteras. Madrid, España. 113 p.
- Toebes, C.; V., Ouryvaev. 1970. Las Cuencas Representativas y Experimentales. Centro de Estudio Hidrográficos, Instituto de Hidrología, Escuela de Hidrología. (95): 5 - 309
- Tosso, J. 1985. Suelos Volcánicos de Chile. Santiago. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 723 p.
- Troendle, C. 1983. The potential for water yield augmentation from forest management in the Rocky Mountain Region. Water Resources Bulletin 19 (3): 359 - 373
- Ulloa, C. 2000. Influencia del manejo sobre el balance hídrico en plantaciones de 14 años de edad en *Pinus radiata* D. Don en Los Ángeles, VIII Región. Tesis Ing. For. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 73 p.
- Vansickle, J.; R., Beschta. 1983. Supply – based models of suspended sediment transport in streams. Water Resources Research 19 (3): 768 - 778
- Vélez, M. 2003. Geomorfología de Cuencas. INTERNET: http://hidraulica.unalmed.edu.co/PARH/Materias/hidrologia/mariav/Docs/04_geomorfologia.pdf (Junio 16, 2003)
- Vélez, M.; J. Vélez. 2003. Características Morfométricas y Fisiográficas de la cuenca. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Sede Medellín Unidad Hidráulica. INTERNET: <http://poseidon.unalmed.edu.co/Materias/Hidrología.html#d1> (Septiembre 8, 2003)
- Ward, R.; M., Robinson. 1989. Principles of Hydrology. 3 ed. Mc Graw-Hill. London. 365 p.
- Waters, T. 1995. Sediment in Streams; Sources, Biological Effects, and Control. North Carolina, American Fisheries Society Monograph 7. 850 p.
- William, E.; L., Walsh; B., Stewart; D., Boelter. 1981. Soil and Water Resources: Research Priorities for the Nation. Wisconsin (USA). 229 p.
- Wittenberg, H.;M. Sivapalan. 1999. Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. Journal of Hydrology 219: 20 – 33

ANEXOS

Anexo 1
Abstract and keywords

Runoff and sediments discharge in watershed in the Cordillera de la Costa, IX Region

The effect of a thinning (50% of the initial density) to a plantation of *Pinus radiata* D. Don of 12 years of age was evaluated, on the generation of volumes and sediment production in an experimental river basin of 34.72 ha. The study presented a duration of 24 months, corresponding the 16 first a the stage of calibration, whereas the 8 remaining months measured the effect of the intervention, where compared the watershed thinning (E2) with the watershed witness (E1).

The study was located in the forest farm "Nueva Etruria" property of Forestal Tornagaleones S.A., distant to 41 km to the west of the city of Pitrufoquén, IX Region.

The morphologic characterization demonstrated that important differences between both watersheds do not exist. According to the profile of the hypsometric curve E1 a young was associated river, whereas E2 was related to one mature one, which stands out being an intermediate curve that is characteristic of the watershed in balance.

The generation of discharge between E1 and E2 did not present significant differences for a 95% trustworthiness. However, the answer in the E2 watershed superior in a 16% with respect to the volumes produced by the E1 watershed, after made the intervention.

The statistical analysis did not presentsignificant differences in the total sediment production between the watersheds. In spite of this, when comparing the sediment production in the E2 watershed before and after the thinning, the statistical analysis found differences significant. This low difference had to the used system of harvest, since when working with traction animal the impact in the resource ground is enough minor who the produced one by tasks of the high mechanization.

The sediment production in suspension for the E2 watershed was greater in a 64.5% with respect to the production of E1 after made the intervention Whereas the production by bedload did not present great differences between the watershed, nor either in the watershed taken part between the periods of pre and post-thinning.

When determining the relation between sediment concentration in suspended and the volume the determination coefficient (r^2) turned out to be enough low, which had to the method by which the samples were taken.

Finally one concludes that the reduction in a 41% of the basal area did not present significant differences in the generation of volumes. The greater impact of this intervention was focused in the sediment production at the time of comparing the period of pre-thinning with the one of post-thinning.

Keywords: Watershed, thinning, discharge, suspended sediments, bedload.

Anexo 2
Cuencas Experimentales Etruria 1 y Etruria 2

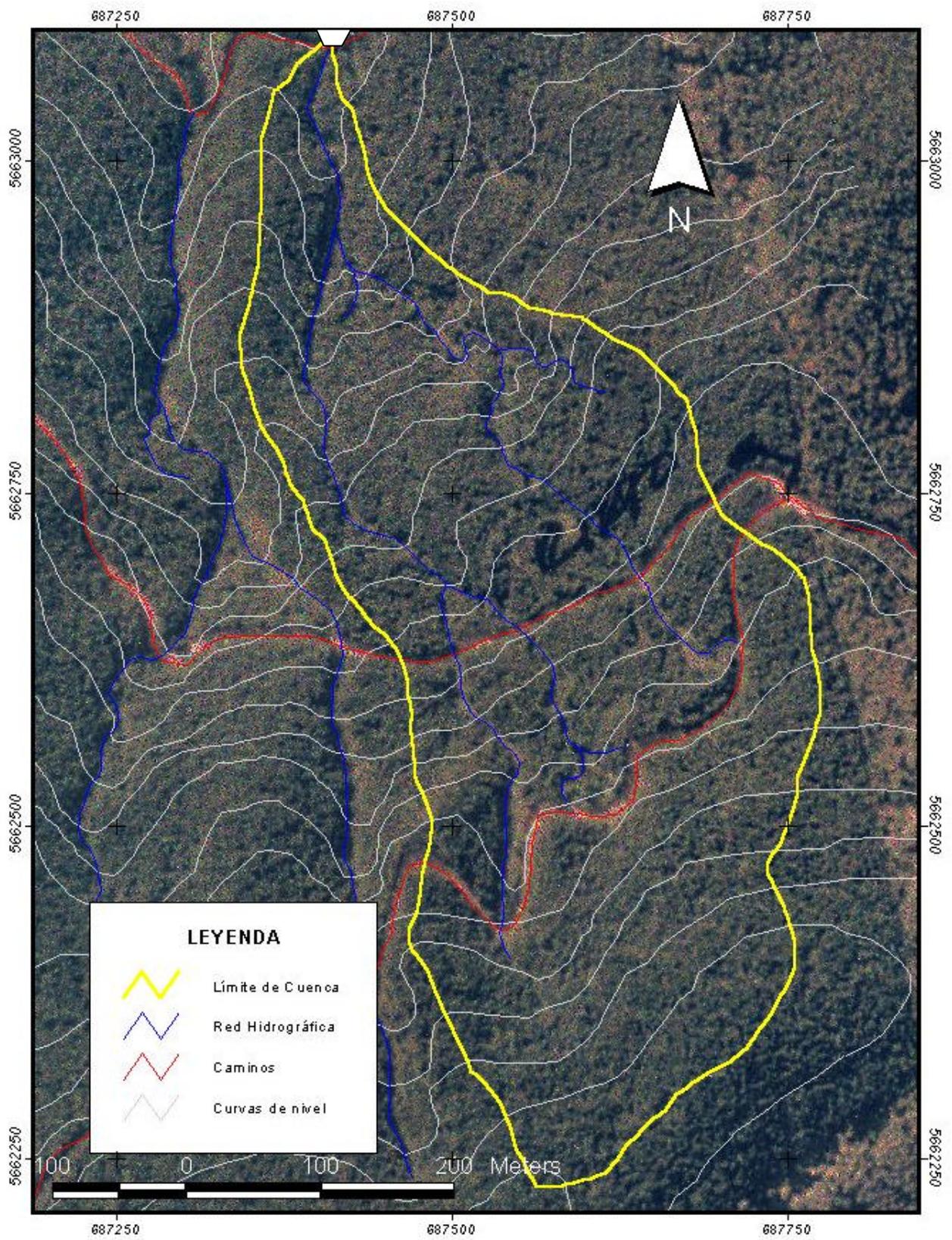


Figura 1. Cuenca Experimental Etruria 1 (E1)

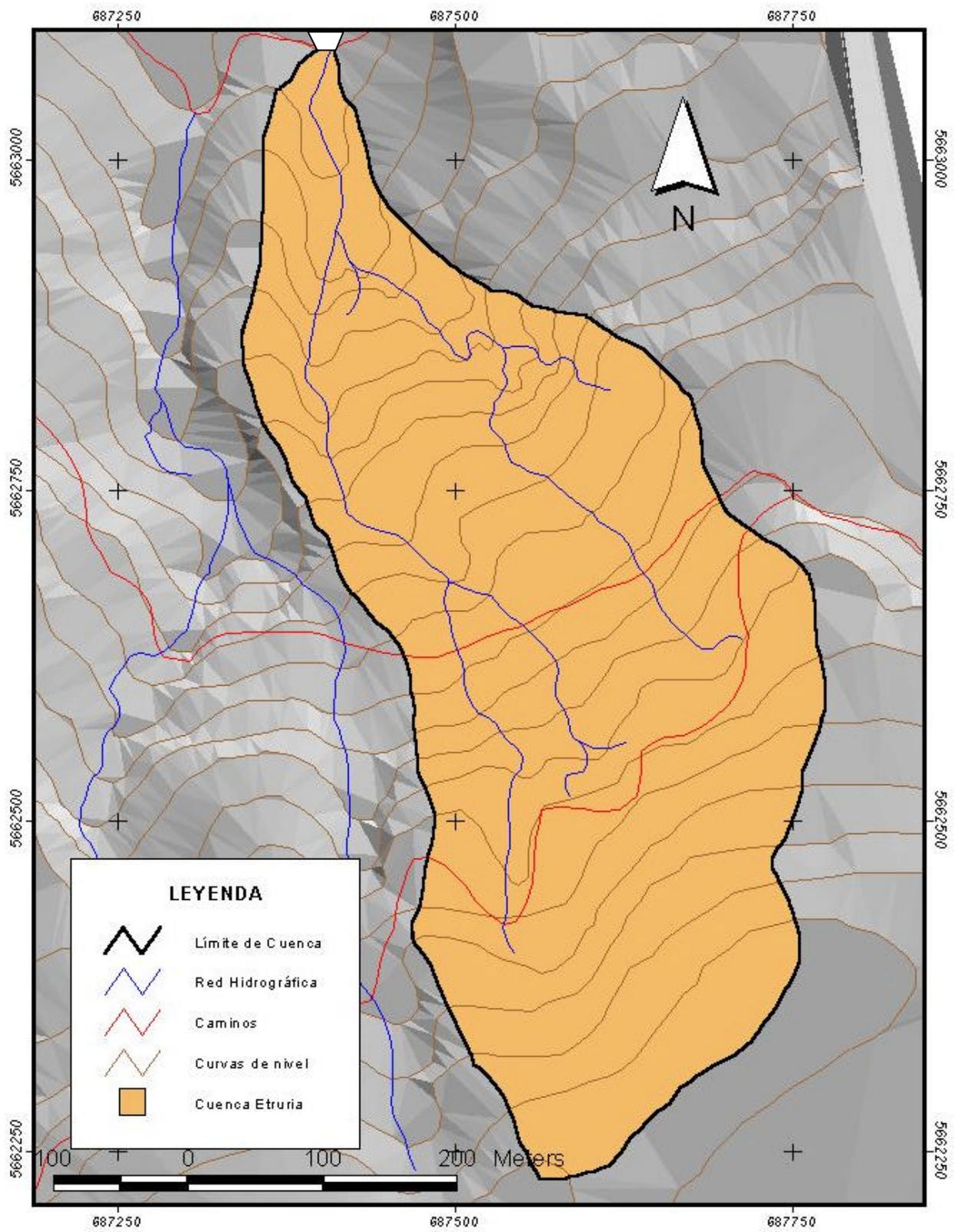


Figura 2. Cuenca Experimental Etruria 1 (E1)

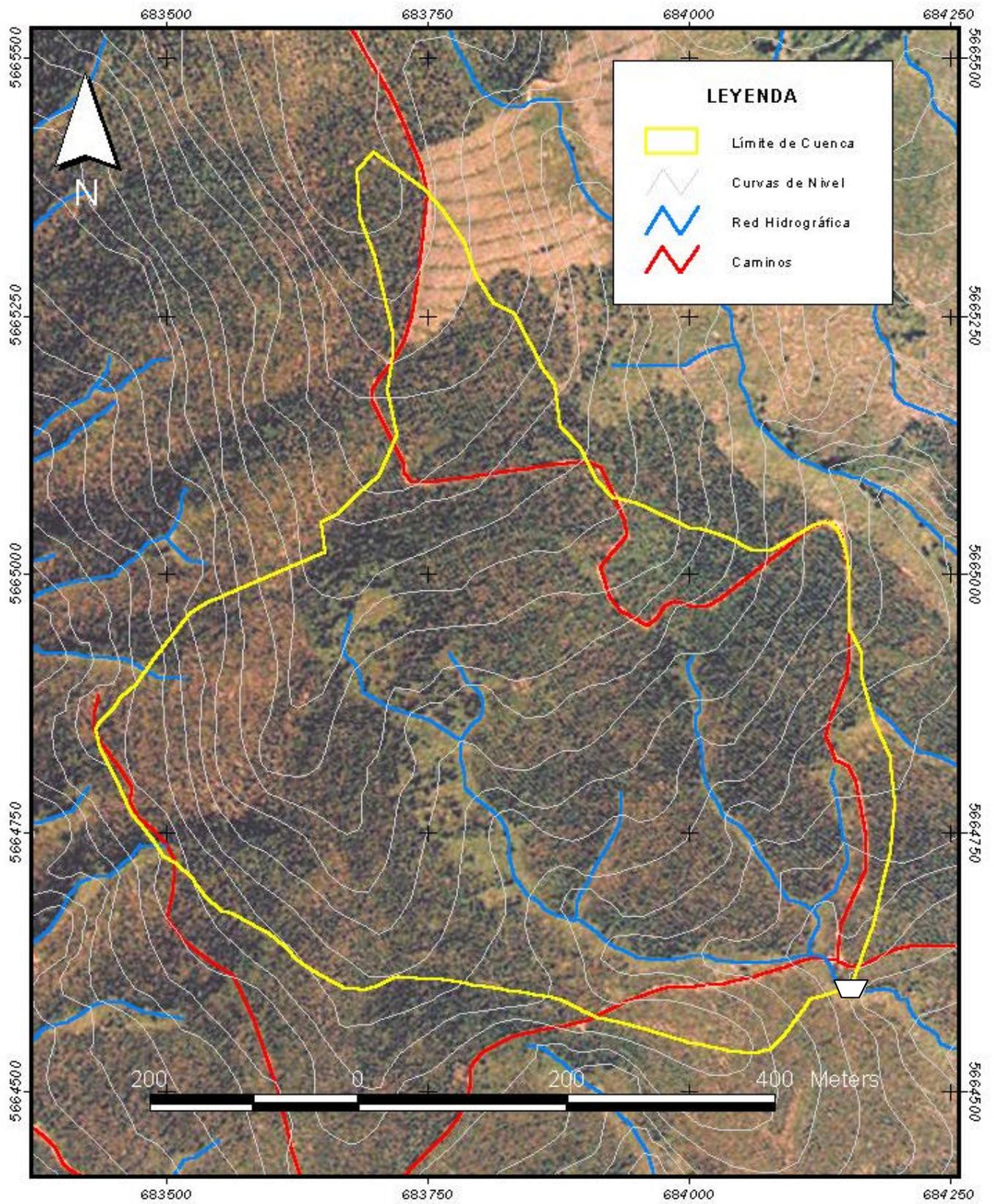


Figura 3. Cuenca Control Etruria 2 (E2)

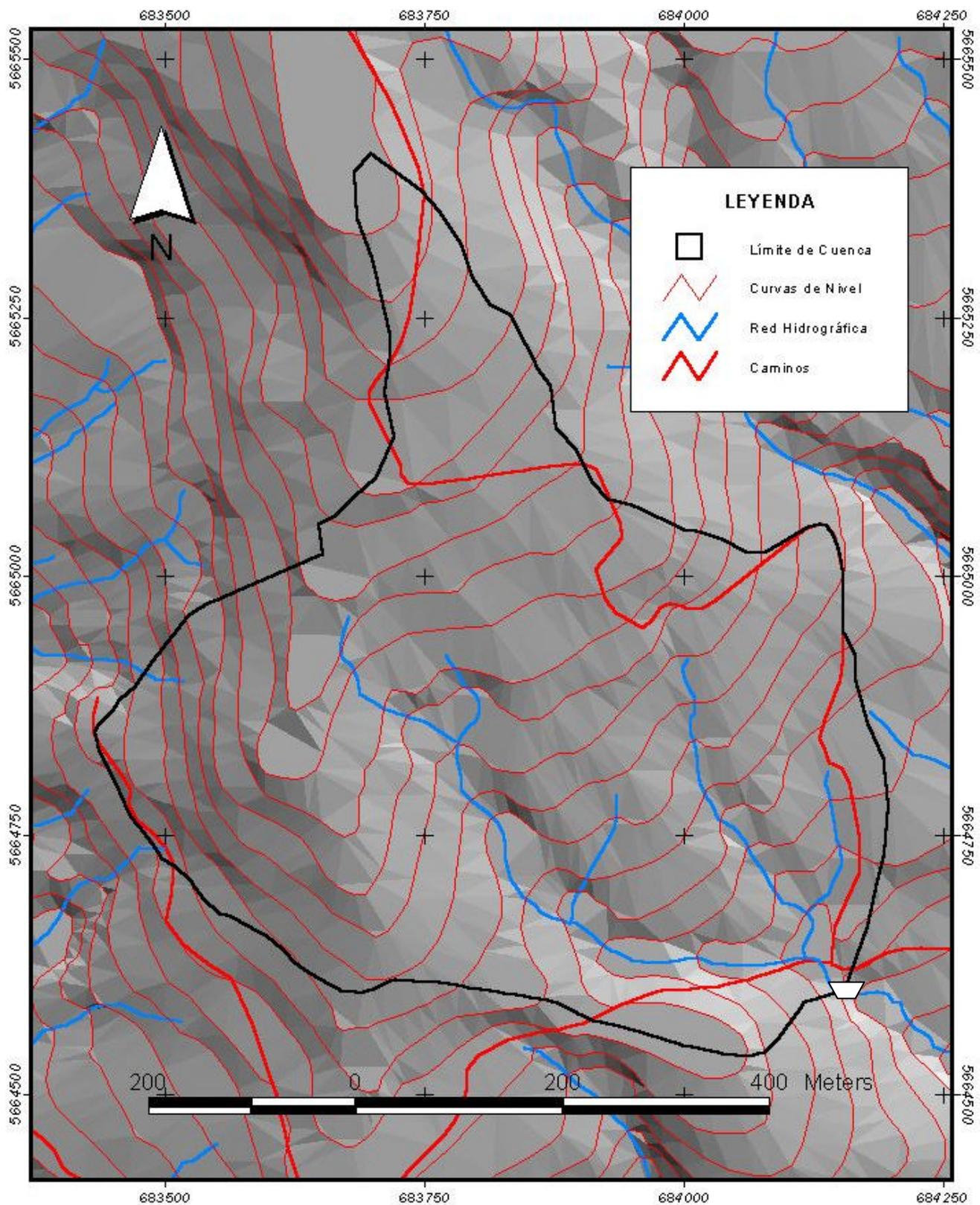


Figura 4. Cuenca Control Etruria 2 (E2)

Anexo 3
Fórmulas de Parámetros y Representaciones Geomorfológicas

➤ **Índice de compacidad**

Una vez conocida la información de superficie y perímetro de ambas cuencas, se puede obtener el índice de Compacidad o de Gravelius, el cual indica la forma aproximada que presentan ambas cuencas en estudio. La fórmula a aplicar para la obtención de este índice, es la descrita por Martínez de Azagra y Navarro (1996):

$$Ic = 0,28 * \left(\frac{P}{\sqrt{S}} \right)$$

K_G : Índice de Compacidad
 P : Perímetro de la cuenca (m)
 S : Superficie de la cuenca (m²)

Por lo tanto, cuando:

1,00 = K_G < 1,25; cuencas redondas
1,25 = K_G < 1,50; cuencas ovaladas
1,50 = K_G < 1,75; cuencas alargadas

➤ **Rectángulo Equivalente**

$$L = \left[\frac{(Ic * \sqrt{S})}{1,12} \right] * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Ic} \right)^2} \right]$$

$$l = \left[\frac{(Ic * \sqrt{S})}{1,12} \right] * \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{Ic} \right)^2} \right]$$

l = Lado menor rectángulo (km)
 L = Lado mayor rectángulo (km)

$l * L = S$ (Superficie de la cuenca)
 $2 * (l + L) = P$ (Perímetro de la cuenca)

➤ **Índice de Pendientes o Pendiente Media de la Cuenca**

$$Ip = \frac{(D * L)}{S}$$

D : Equidistancia entre curvas de nivel (km)

L : Longitud total de las curvas de nivel en la cuenca (km)

➤ **Altitud Media**

$$Hm = \sum \frac{S_i}{S} * \left[\frac{(n_i + n_{i-1})}{2} \right]$$

S_i : Superficie entre curvas de nivel

n_i, n_{i-1} : Curvas de nivel

➤ **Coefficiente Orográfico**

$$Co = \frac{H^2}{S} \quad \left(\frac{m}{km^2} \right)$$

$$H = Hm - Cp$$

Cp = Cota punto control

$Co \leq 6$, Cuenca de relieve poco accidentado

$Co > 6$, Cuenca de relieve accidentado

➤ **Densidad de Drenajes**

$$Dd \left(\frac{km}{km^2} \right) = (\text{Longitud total de cauces en la cuenca} / S)$$

➤ **Coefficiente de Torrencialidad**

$$Ct \left(\frac{1}{km^2} \right) = (\text{N}^\circ \text{ de cursos de orden 1}) / S$$

➤ **Tiempo de concentración**

El resultado entregado corresponde al promedio obtenido entre las fórmulas propuestas por Témez y la propuesta por Bruce & Clark:

Fórmula de Témez:

$$T_c = 0,3 * \left(\frac{L}{J^{0,25}} \right)^{0,76}$$

T_c : Tiempo de concentración, en horas.

L : Longitud del cauce principal, en kilómetros.

$$J = \frac{(H_{max} - H_{min})}{(1000 * L)}$$

J : Pendiente media del cauce principal.

Fórmula de Bruce y Clark:

$$T_c = 0,61 * \left(\frac{n * L}{\sqrt{J}} \right)^{0,467}$$

T_c : Tiempo de concentración, en horas.

n : Coeficiente de rugosidad según tabla anexa.

L : Longitud del cauce principal, en kilómetros.

$$J = \frac{(H_{max} - H_{min})}{(1000 * L)}$$

J : Pendiente media del cauce principal.

Coeficientes de rugosidad para el calculo del tiempo de concentración según fórmula Bruce y Clark.

Tipo de Superficie	Valor de n
Impermeable	0,02
Suelos sin cubierta	0,1
Pastizales pobres; cultivos	0,2
Pastizales	0,4
Bosques deciduos	0,6
Bosques de coníferas, deciduos, con materia orgánica profunda	0,8

Anexo 4
Metodología de Análisis en Laboratorio para sedimentos en suspensión y
arrastre de fondo

➤ **Sedimentos en suspensión**

Para llevar a cabo el análisis, primero se tomaban tres muestras de agua de 1 litro cada una previamente homogenizadas. Luego se mojaba el papel filtro con agua destilada, la cual era secada durante 6 horas para posteriormente obtener su peso seco, obteniéndose así el *peso del papel filtro*.

Una vez obtenido el peso seco del papel filtro, éste era colocado dentro de un embudo para ser instalado en una bomba de vacío, agregándose 1 litro de agua de las muestras obtenidas. Posteriormente este papel mojado con el agua de las muestras era secado por 6 horas y pesado, obteniéndose de esta forma el *peso seco del material*.

Para obtener el peso total del material en suspensión, se hace la diferencia entre *peso seco del material* menos el *peso del papel filtro*, el cual es expresado miligramos por litro (mg / l).

➤ **Arrastre de fondo**

Para determinar la cantidad de sedimentos que se acumulan en el fondo del vertedero mensualmente, primero era secado a 60 °C por 48 horas el material recolectado en las 3 bolsas plásticas, luego se pesaba el material en un balanza de precisión obteniéndose así su peso seco, considerándose además la superficie de recolección de las muestras. De esta forma se puede determinar la cantidad de sedimentos acumulados en el fondo del vertedero producto del arrastre mediante la siguiente relación:

$$\frac{\text{Superficie muestra (0,01 m}^2\text{)} \otimes \text{Peso muestra (kg)}}{\text{Superficie vertedero (2,61 m}^2\text{)} \otimes X}$$

Anexo 5
Curvas Hipsométricas

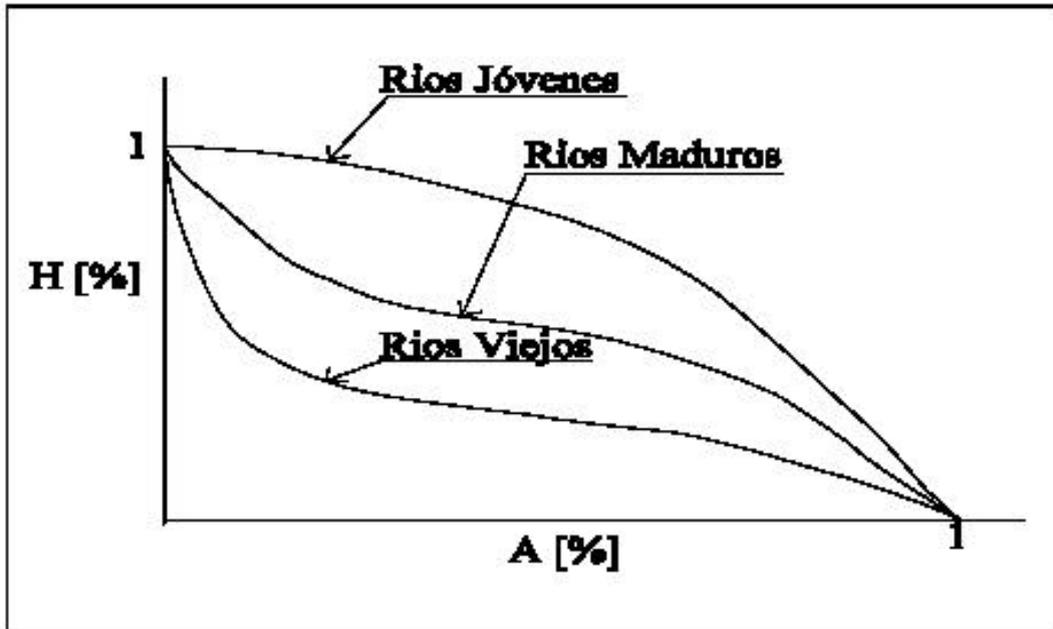


Figura 5. Curvas Hipsométricas Característica (Vélez, 2003).

Anexo 6
Datos de precipitación y caudales

Cuadro 1. Precipitación (mm) y caudales (m³/ha) mensuales

Año	Mes	PP (mm)	E1 Q (m³/ha)	E2 Q (m³/ha)
2001	Oct	51,77	41,45	46,00
	Nov	67,25	36,99	27,57
	Dic	0,25	29,09	32,28
2002	Ene	4,05	28,97	37,83
	Feb	27,05	33,53	40,19
	Mar	154,62	146,88	169,97
	Abr	133,01	920,41	781,12
	May	124,01	1506,12	1286,12
	Jun	192,28	777,97	554,79
	Jul	86,89	513,44	362,03
	Agos	147,62	755,66	733,90
	Sept	170,30	828,90	886,01
	Oct	559,47	810,29	628,99
	Nov	234,50	692,71	565,62
	Dic	224,59	321,81	270,22
2003	Ene	19,15	120,50	106,60
	Feb	9,32	104,91	86,88
	Mar	81,75	63,32	51,98
	Abr	110,12	40,45	43,42
	May	147,39	66,54	70,92
	Jun	556,65	633,00	864,09
	Jul	308,67	381,29	599,19
	Ago	100,70	281,66	244,49
	Sep	216,15	250,37	194,43
	Oct	91,06	132,85	108,52

Cuadro 2. Caudales Acumulados Mensuales Postratamiento

Año	Mes	Q Acu. E1 (m³/ha)	Q Acu. E2 (m³/ha)
2003	Feb	104,91	86,88
	Mar	168,23	138,86
	Abr	208,67	182,28
	May	275,21	253,19
	Jun	908,21	1117,28
	Jul	1289,51	1716,47
	Ago	1571,16	1960,96
	Sep	1821,53	2155,39
	Oct	1954,38	2263,91

Cuadro 3. Caudales Mensuales Acumulados para el período de estudio

Año	Mes	Q Ac E1 (m³/ha)	Q Ac E2 (m³/ha)
2001	Oct	41,45	46,00
	Nov	78,44	73,57
	Dic	107,53	105,85
2002	Ene	136,51	143,68
	Feb	170,04	183,87
	Mar	316,92	353,84
	Abr	1237,33	1134,96
	May	2743,45	2421,08
	Jun	3521,42	2975,87
	Jul	4034,86	3337,90
	Agos	4790,52	4071,80
	Sept	5619,42	4957,80
	Oct	6429,71	5586,80
	Nov	7122,42	6152,42
	Dic	7444,23	6422,64
2003	Ene	7564,74	6529,23
	Feb	7669,65	6616,11
	Mar	7732,97	6668,09
	Abr	7773,41	6711,51
	May	7839,95	6782,43
	Jun	8472,95	7646,52
	Jul	8854,24	8245,71
	Ago	9135,90	8490,20
	Sep	9386,27	8684,63
	Oct	9519,12	8793,15

Anexo 7
Análisis Estadístico

Cuadro 4 Resultados de Análisis Estadísticos

Hipótesis	Tratamiento	Comparar	Condición	Comparar	W	P-valor
Alternativa	Post-raleo	Q E1 (m ³ /ha)	≠	Q E2 (m ³ /ha)	45	0,723928
		Q E1 (m ³ /ha)	<	Q E2 (m ³ /ha)	45	0,361964
		Q E1 (m ³ /ha)	>	Q E2 (m ³ /ha)	45	0,638036
		Sed. Acu. Totales E1 (kg/ha)	≠	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)	47	0,596239
		Sed. Acu. Totales E1 (kg/ha)	<	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)	47	0,298119
		Sed. Acu. Totales E1 (kg/ha)	>	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)	47	0,701881
	Pre-raleo* Post-raleo**	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)*	≠	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)**	48	0,0722019
		Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)*	<	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)**	48	0,0361009
		Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)*	>	Sed. Acu. Totales E2 (kg/ha)**	48	0,963899

Hipótesis Nula: E1 = E2; Para un 95% de Confiabilidad

Cuando:

P > 0,05 Aceptar Hipótesis Nula

P < 0,05 Aceptar Hipótesis Alternativa

Anexo 8
Producción de Sedimentos

Cuadro 5 Producción de Sedimentos Mensuales para E1 y E2

Año	Mes	Prod. Sed. Totales E1(kg/ha)	Prod. Sed. Totales E2 (kg/ha)
2001	Oct	3,88	3,28
	Nov	2,39	1,37
	Dic	1,62	0,99
2002	Ene	1,42	1,50
	Feb	2,74	2,75
	Mar	4,04	4,86
	Abr	9,85	9,17
	May	10,52	8,49
	Jun	9,18	8,05
	Jul	6,29	5,64
	Agos	4,57	5,28
	Sept	5,16	4,94
	Oct	7,96	8,07
	Nov	4,00	4,52
	Dic	1,39	1,97
2003	Ene	0,98	0,77
	Feb	1,52	1,18
	Mar	1,31	1,85
	Abr	2,56	3,43
	May	3,12	7,09
	Jun	20,56	42,60
	Jul	68,81	119,64
	Ago	27,12	26,22
	Sep	9,39	5,88
	Oct	6,37	5,73

Cuadro 6. Producción de Sedimentos Acumulados Mensuales para E1 y E2

Año	Mes	Prod. Sed. Tot. Acu. E1(kg/ha)	Prod. Sed. Tot. Acu. E2 (kg/ha)
2001	Oct	3,88	3,28
	Nov	6,27	4,65
	Dic	7,88	5,65
2002	Ene	9,31	7,15
	Feb	12,05	9,90
	Mar	16,08	14,76
	Abr	25,94	23,92
	May	36,45	32,42
	Jun	45,63	40,46
	Jul	51,92	46,11
	Agos	56,49	51,39
	Sept	61,65	56,33
	Oct	69,61	64,40
	Nov	73,61	68,92
	Dic	75,00	70,89
2003	Ene	75,98	71,66
	Feb	77,50	72,84
	Mar	78,81	74,69
	Abr	81,37	78,12
	May	84,49	85,21
	Jun	105,05	127,82
	Jul	173,86	247,46
	Ago	200,98	273,68
	Sep	210,38	279,56
	Oct	216,74	285,29

Cuadro 7. Producción de Sedimentos Acumulados en E2 para el período de Pre y Postratamiento

Mes	Sed. Acu. Pre -raleo E2 (kg/ha)	Sed. Acu. Post -raleo E2 (kg/ha)
Feb	2,64	1,37
Mar	6,92	2,66
Abr	16,22	5,65
May	25,61	10,91
Jun	34,46	51,47
Jul	40,78	171,31
Ago	45,71	198,35
Sep	51,14	205,65
Oct	59,14	212,75

Cuadro 8. Producción de Sedimentos en Suspensión para E1 y E2

Año	Mes	PSS E1 (kg/ha)	PSS E2 (kg/ha)
2001	Oct	0,50	0,48
	Nov	0,18	0,13
	Dic	0,14	0,13
2002	Ene	0,26	0,24
	Feb	0,19	0,09
	Mar	1,43	1,67
	Abr	7,09	6,54
	May	6,98	5,86
	Jun	2,60	2,27
	Jul	0,87	0,90
	Agos	0,79	1,15
	Sept	0,74	1,01
	Oct	0,45	0,49
	Nov	0,15	0,20
	Dic	0,05	0,06
2003	Ene	0,28	0,20
	Feb	0,43	0,27
	Mar	0,10	0,09
	Abr	0,11	0,54
	May	0,44	2,59
	Jun	18,40	38,39
	Jul	63,21	114,24
	Ago	22,79	22,71
	Sep	4,66	2,56
	Oct	1,73	2,47

Cuadro 9. Producción de Sedimentos por Arrastre de Fondo para E1 y E2

Año	Mes	AF E1 (kg/ha)	AF E2 (kg/ha)
2001	Oct	3,38	2,80
	Nov	2,20	1,24
	Dic	1,48	0,86
2002	Ene	1,16	1,26
	Feb	2,55	2,66
	Mar	2,60	3,18
	Abr	2,76	2,63
	May	3,53	2,63
	Jun	6,58	5,78
	Jul	5,42	4,75
	Agos	3,78	4,13
	Sept	4,42	3,93
	Oct	7,52	7,58
	Nov	3,85	4,32
	Dic	1,34	1,91
2003	Ene	0,70	0,56
	Feb	1,10	0,92
	Mar	1,21	1,76
	Abr	2,44	2,88
	May	2,68	4,51
	Jun	2,16	4,21
	Jul	5,61	5,40
	Ago	4,33	3,51
	Sep	4,74	3,32
	Oct	4,64	3,26

Anexo 9
Datos de Concentración de Sedimentos en Suspensión y Caudales

Cuadro 10. Concentración de Sedimentos en Suspensión y Caudales (medios y máximos) para E1

CSS E1 (mg/l)	Q Medio E1 (l/h)	Q Max E1 (l/h)	Q Me * Q Máx. E1
12,14	100	200	20000
4,92	51	272	13872
4,76	39	50	1950
9,06	38	48	1810
5,69	48	336	16229
9,75	197	627	123519
7,71	1278	2924	3736872
4,64	2025	2769	5607225
3,34	1081	2769	2991905
1,70	690	1560	1076400
1,05	1016	3654	3712464
0,89	1151	1789	2059139
0,55	1070	1789	1914230
0,21	918	1678	1540404
0,15	419	815	341485
2,32	162	346	56052
4,05	156	216	33696
1,61	85	589	50065
2,82	56	255	14280
6,63	89	424	37736
29,06	880	3734	3285920
165,77	512	1446	740930
80,91	379	837	317223
18,61	348	811	282228
13,01	244	811	197884

Cuadro 11. Concentración de Sedimentos en Suspensión y Caudales (medios y máximos) para E2

CSS E2 (mg/l)	Q Medio E2 (l/h)	Q Max E2 (l/h)	Q Me * Q Máx. E2
10,494	60	217	13020
4,600	67	301	20167
4,074	49	59	2891
6,413	51	73	3708
2,328	60	198	11840
9,832	228	936	213408
8,374	1085	3254	3530590
4,556	1729	2312	3997448
4,091	771	2081	1604451
2,482	487	1309	637483
1,574	986	3697	3645242
1,135	1230	1298	1596540
0,779	858	1298	1113684
0,353	774	1409	1090566
0,218	363	692	251196
1,921	143	289	41327
3,079	129	197	25413
1,705	70	399	27930
12,528	60	234	14040
36,483	95	335	31926
44,431	1200	5048	6057600
190,653	805	1763	1419215
92,903	329	728	239512
13,153	271	595	161245
22,745	199	595	118405