

Operaciones forestales y concentración de sedimentos en cauces naturales I: Formulación de un modelo matemático

Forest operations and sediment concentration in natural streams I:
A mathematical model formulation

EMILIO D. FUENTES¹, JUAN J. TRONCOSO², CARLOS A. BONILLA³

¹ Granaderos 991, Santiago, Chile, fuentesemilio@hotmail.com

² Departamento de Ciencias Forestales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. jtroncot@puc.cl

³ Departamento de Ciencias de los Recursos Naturales, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile. cbonilla@puc.cl

SUMMARY

This paper puts forward a mathematical model to estimate the sediment concentration in natural streams of a sub-river basin of the Eighth Region of Chile. It is proposed as a result of the intensive handling of forest plantations, mainly of *Pinus radiata* (D. Don). The study site is the river basin of the Vergara River, with a surface area of 385.300 ha. The variables used in the model were average monthly precipitation, discharge, trucks flow and ways length. The analysis indicated that the trucks flow and ways length did not cause an immediate impact on sediment production. A phase angle of five and six months was observed for the trucks flow and ways length, respectively. The model, calibrated with the variables already indicated, allowed us to determine the correlation coefficient (R^2) of sediment production as 0.90, with 99% of confidence.

Key words: erosion, regression models, water profity, forest production.

RESUMEN

Este artículo propone un modelo matemático para estimar la concentración de sedimentos en cauces naturales de una subcuena de la VIII Región de Chile, como resultado de la cosecha en plantaciones forestales, principalmente de *Pinus radiata* (D. Don). La zona específica de estudio es la cuenca del Río Vergara, con una superficie de 385.300 ha.

Las variables utilizadas en el modelo fueron la precipitación promedio mensual, el caudal, el flujo de camiones y la longitud de caminos. Del análisis se desprende que las variables flujo de camiones y longitud de caminos no provocan un impacto inmediato sobre la concentración de sedimentos, observándose un desfase de cinco y seis meses para cada una, respectivamente. El modelo calibrado con las variables ya señaladas permite estimar la concentración de sedimentos con una bondad de ajuste (R^2) de 0,90 al 99% de confianza.

Palabras claves: erosión, modelos de regresión, calidad del agua, producción forestal.

1. INTRODUCCION

En el último tiempo, la práctica forestal en Chile ha tenido una expansión sin precedentes, lo que ha significado un mejoramiento de la planificación y manejo de las plantaciones, la incorporación de

nuevas tecnologías y una mayor mecanización de las faenas (Gayoso *et al*, 1991).

Sin embargo, este crecimiento ha sido cuestionado por algunas organizaciones ecológicas que plantean que tal desarrollo es una de las principales causas de las diversas perturbaciones ambientales.

les presentes en los ecosistemas nacionales. Por tal motivo, la evaluación de impactos ambientales está ocupando gradualmente un lugar en el proceso de toma de decisiones, junto con el análisis costo-beneficio y la evaluación técnica (Acuña, 1997; Toro, 1991).

En general, la producción forestal puede generar un desequilibrio en el sistema suelo-agua-planta, que aumenta los riesgos de erosión en los suelos y la producción de sedimentos (McClurkin *et al.*, 1987). Asimismo, la eliminación de la cubierta vegetal provoca alteraciones en el ciclo hidrológico (Wright *et al.*, 1990), causada principalmente por una supresión de la evapotranspiración y por la redistribución y cantidad de las precipitaciones que llegan a la superficie, aumentando el escurrimiento superficial. Esta situación adquiere una particular relevancia cuando se talan superficies forestadas con especies de rápido crecimiento y de elevado consumo de agua como *Pinus radiata* (D. Don) (Huber y López, 1993).

Sin embargo, no sólo la cosecha contribuye a esta alteración, ya que la superficie de los caminos forestales tiene baja permeabilidad, lo que puede generar flujos de agua sobre el terreno (King y Tennyson, 1984). Además, las zanjas y alcantarillas de los caminos concentran los escurrimientos y alteran las vías de flujo natural, provocando un aumento en el escurrimiento superficial en algunos sectores.

Por otro lado, la localización del camino y la altura del corte de los taludes pueden influenciar la cantidad de agua subsuperficial interceptada por el camino, la que puede llegar a convertirse en flujo superficial y acentuar el proceso erosivo (Acuña, 1997). Esto se demuestra en el estudio de Jones y Grant (1996), donde la construcción de caminos combinada con tala rasa en parches en un rango de 10 a 25% del área de la cuenca produce grandes aumentos en las descargas máximas de agua, tanto en las pequeñas como en las grandes cuencas.

De esta forma, el efecto combinado de los caminos y la cosecha forestal podría afectar significativamente el caudal y régimen del flujo de los ríos, modificando posteriormente las características del lecho del río y la capacidad de transporte de sedimentos (King y Tennyson, 1984).

Sin embargo, es importante mencionar que gran parte del impacto no se debe solamente por dejar expuesto el suelo a la erosión, sino que hay una

gran influencia del método de cosecha y construcción de caminos, de la maquinaria utilizada en ambos procesos y el tratamiento dado a los residuos luego de finalizada la extracción de madera. Además, son esenciales las características edafoclimáticas del área, como la pendiente, nivel de precipitaciones, topografía, textura, exposición, etc. (Francke, 1993; Gayoso, 1982).

Es así como el tránsito de maquinaria genera una compactación del suelo que provoca un aumento de la densidad aparente y una disminución de la macroporosidad, reduciendo la conductividad hidráulica, causando una disminución de la infiltración y un aumento del escurrimiento superficial.

La ocurrencia de estos procesos se manifiesta a través de grandes cantidades de sedimento que se integran al gasto sólido en suspensión de los cursos de agua y generalmente son depositados en otro lugar cuando la energía del agente de transporte disminuye (sedimentación) (Córdoba, 1982) reduciendo progresivamente la productividad del sitio al provocar una disminución de la profundidad de enraizamiento, de nutrientes y de materia orgánica (Toro, 1991).

De esta manera, Van Lear *et al.* (1985) determinaron que las concentraciones de sedimentos fueron mayores durante el primer año después de la cosecha (139 mg/l), cerca de ocho veces más que las cuencas sin alteración, declinando durante el segundo y tercer año después de cosecha y retornando a los niveles de precosecha luego del tercer año. En otro estudio, hay un aumento estadísticamente significativo en el volumen de sedimentos anual luego del madereo y quema de desechos, aumento que fue 7,0 ton/km²/año (97%), y que ajustado al área de 1,6 km² de la cuenca representa un aumento total de 114 ton de sedimento en los diez años del estudio (Megahan *et al.*, 1995). Estos autores concluyen que una reducida intensidad de quema en suelos de textura gruesa reduce la ocurrencia de repelencia del agua del suelo, inducida por el fuego, y aumenta la sobrevivencia de los árboles remanentes, minimizando de este modo la erosión de la superficie. Además, el cortar los residuos y esparcirlos maximiza la protección del sitio a la erosión y asegura la mantención de los nutrientes del suelo.

En otro ámbito, diversos estudios concuerdan que la construcción de caminos precedente a la cosecha es uno de los principales causantes de erosión. Por ejemplo, Brown y Krygier (1971)

encontraron que inmediatamente después de la construcción de los caminos se observó un máximo en la concentración de sedimentos cercano a los 1.800 ppm, unas 250 veces más que en la cuenca control (sin alteración).

Los caminos aportan sedimentos a los cursos de agua de dos formas: remoción en masa o erosión de la superficie del camino, seguido por el transporte de este material al cauce (Bilby *et al.*, 1989). La relativa importancia de cada uno de estos procesos depende de las características de la cuenca, ya que en áreas de pendientes pronunciadas y suelos inestables la remoción en masa es la principal causa del aumento de la carga de sedimentos, en cambio, en suelos más estables la principal fuente de sedimentos es la erosión de la superficie del camino, de los cortes de laderas y de los rellenos de pendientes (Bilby, 1985).

Los dos principales factores que determinan la cantidad de sedimento lavado de la superficie del camino son la capacidad de transporte del flujo del agua y la disponibilidad de material. El primer factor está en función de la intensidad de la precipitación y de las características del segmento del camino; y, por su parte, la cantidad de sedimento disponible para el transporte está en función del tráfico, pero influenciado por el tipo de construcción del camino, material de la superficie y las actividades de mantención (Bilby *et al.*, 1989). La técnica de construcción y el tipo de material en la superficie del camino influyen la extensión de cada segmento del camino que producen sedimento en respuesta al tráfico. Si bien el tráfico no es el único determinante en la generación de sedimento, es el factor más importante.

Es así como Reid y Dunne (1984) determinaron que los caminos con tránsito de más de cuatro camiones por unidad cosechada al día (muy usados) contribuyen con sedimentos a una tasa de unas ocho veces más (500 ton/km/año) que los mismos caminos en días que no son usados. Si el tráfico es restringido al paso ocasional de vehículos ligeros, la pérdida de sedimentos desde la superficie del camino disminuye a un 0,8% del valor de los caminos muy usados.

Por lo anterior y basado en todos los antecedentes presentados, el objetivo del presente trabajo fue elaborar un modelo matemático para estimar la concentración de sedimentos en cauces naturales de una subcuenca del Río Biobío en la VIII Región de Chile.

2. AREA DE ESTUDIO

Para la elección, ubicación y caracterización de la zona de estudio se consultó cartografía de la cuenca del Río Biobío, consistente en la distribución de los predios forestales, de la red hídrica y de los suelos, a fin de identificar aquellas zonas con riesgo de producir sedimentos como consecuencia de las faenas forestales y, de esta forma, seleccionar una subcuenca que correspondiera a un área forestal que por sus características edafoclimáticas y productivas fuera representativa de la cuenca del Río Biobío.

De esta manera se seleccionó la cuenca del Río Vergara, que posee una superficie de 385.300 ha y que se desarrolla con orientación del sureste al noroeste, entre los paralelos 37°33'S y 38°13'S y los meridianos 71°35'0 y 72°52'0 (figura 1).

Alrededor del 90% de los suelos de la cuenca son de la serie San Esteban, pertenecientes al grupo de suelos graníticos; el otro 10% de los suelos está constituido por las series Dunas (Arenoso), Negrete y Collipulli (Rojo arcilloso).

La serie San Esteban presenta una capacidad de uso VIIe, con una pendiente general de 10% y una topografía muy fuertemente ondulada, que la hace muy susceptible a la erosión; además presenta en sus primeros 60 cm un pH de 5,3 y una densidad aparente de 1,45 gr/cm³.

De acuerdo al tipo de vegetación presente en la zona, ésta se puede clasificar como una cuenca forestal y ganadera, ya que abarcan alrededor de un 50% y 30% del área, respectivamente. Del 20% restante, sólo un 8% se dedica a la agricultura, principalmente de cultivos anuales como cereales, y muy escasamente frutas y hortalizas; un 9% son suelos estériles y un 3% corresponde a zonas urbanas y construcciones.

En la figura 1 se puede apreciar la localización de las distintas estaciones consultadas para el estudio, tanto las de caudal (Q₁ Q₂ Q₃ y Q₄) como las de precipitación (P₁ y P₂).

3. METODOLOGIA

Para desarrollar el estudio fue necesario identificar aquellas variables que influyen sobre la concentración de sedimentos en los cauces, tales como la pendiente del terreno, la precipitación, el caudal, el área de la cuenca, el tipo de suelo, el porcentaje de materia orgánica; la construcción, den-

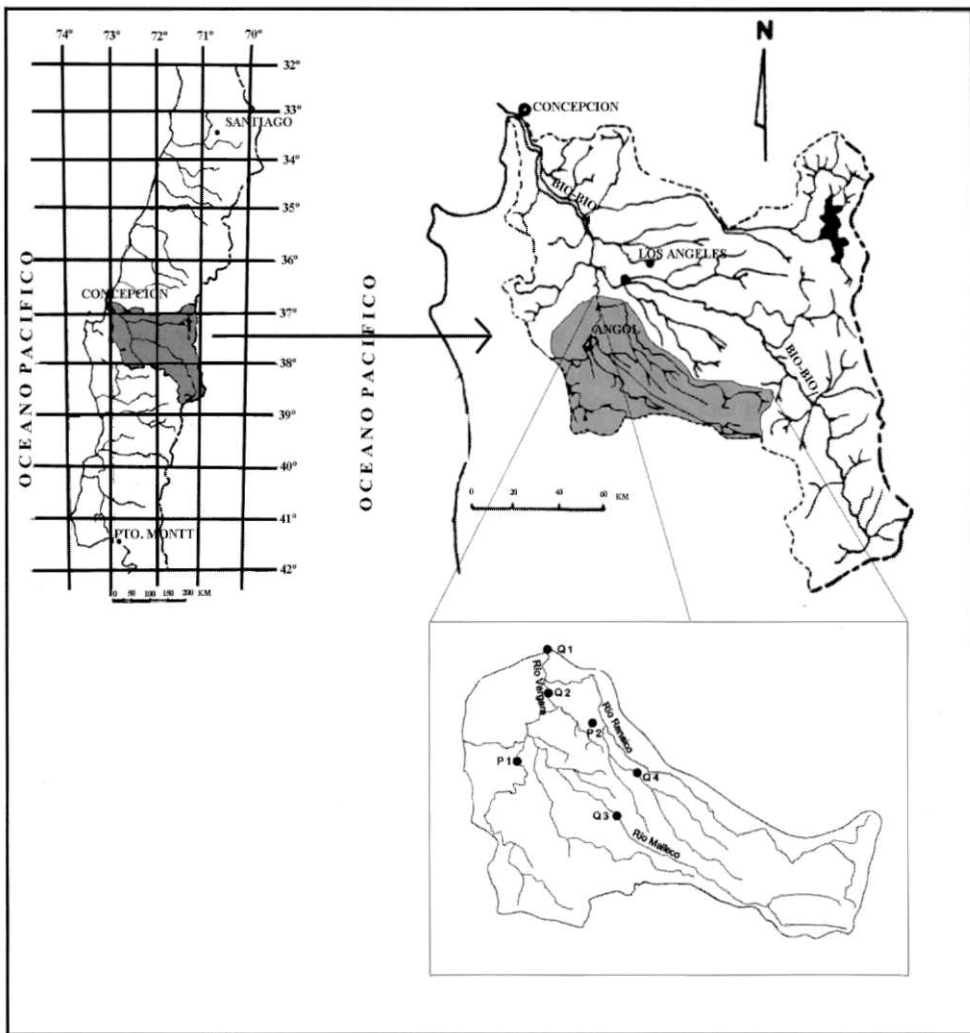


Figura 1. Mapa de la cuenca del Río Biobío y la subcuenca del Río Vergara.
Map of the Biobío river basin and the Vergara river sub-basin

sidad, período de mantención y tipo de carpeta de rodado de los caminos forestales; la superficie forestal cosechada, el flujo diario de camiones, el manejo de los residuos de la cosecha, el tipo de maquinaria utilizada en la cosecha y en la construcción de caminos, la época de cosecha, el período de replante, entre otras. Además, influye la cantidad de superficie destinada a otras actividades como cultivos, frutales, praderas y bosque nativo.

Una vez identificadas las variables, se procedió a obtener la información hidrológica y de sólidos suspendidos entre los años 1988 y 1990, registradas por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas de Chile. También se

empleó información sobre los procesos productivos en los predios forestales de la zona, entre los años 1987 y 1991.

Posteriormente, y de acuerdo a las características de la información obtenida, se definió el período de estudio entre enero de 1988 y septiembre de 1989 (Fuentes, 1999).

La precipitación se obtuvo de registros diarios de pluviógrafos de las estaciones Cerro el Padre (37°47'S, 71°52'0) y San Carlos de Purén (37°35'S, 72°16'0), a partir de los cuales se calcularon los valores de precipitación para cada mes.

En el caso del caudal y los sólidos suspendidos, la información se obtuvo de registros diarios de limnógrafos de la estación Biobío en Coihue, ubi-

cada en 37°33'S y 72°35'0 (Q₁ en figura 1), por estar a la salida de la cuenca. Con esta información se obtuvieron los promedios mensuales de estas dos variables.

Para el caso de las variables forestales (área cosechada, flujo de camiones, longitud de caminos, tipo de carpeta de rodado, etc.), fue necesario identificar los predios con plantaciones forestales dentro de la subcuenca de estudio y posteriormente aquellos que fueron cosechados entre 1987 y 1990. Al respecto, es importante indicar que los predios cosechados en esos años permanecieron descubiertos durante un año hasta su posterior reforestación. Sin embargo, una vez reforestado el terreno, éste no poseía una cubierta vegetal capaz de atenuar los procesos erosivos, por lo cual se consideró que el cubrimiento del suelo sólo se alcanzaba después de un año de la forestación o reforestación del predio. Este supuesto también es aplicado por trabajos anteriores, que confirman la hipótesis de que una cubierta en el suelo por pequeña que sea reduce la pérdida de suelo (Infante, 1985; Guevara, 1997; Megahan *et al.*, 1995).

Producto de lo anterior, se obtuvieron las superficies descubiertas para cada mes en estudio; el resto de la superficie de la cuenca consistía en cultivos, praderas, bosque nativo, suelos en barbecho y estériles, construcciones, suelo original o sin cubierta vegetal específica, las que fueron estimadas a partir de los Censos Agropecuarios de 1978 y 1997. No obstante, para poder apreciar la influencia de estos tipos de superficies en la cuenca se procedió a ponderarlas para obtener una variable que no fuera constante en el tiempo. Esto se hizo de acuerdo al porcentaje de suelo cubierto por cada tipo de superficie y para lo cual se tomó como base el modelo propuesto por Jansen y Painter (Almorox *et al.*, 1994); la ponderación de cada mes, sin considerar los suelos en barbecho y las construcciones, que son insignificantes para el cálculo, se hizo con la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \text{Superficie otros usos} &= \text{Cultivos} \times 8\% + \\ &\text{Praderas} \times 29,5\% + \text{Plantaciones} \times 23,3\% + \\ &\text{Bosque Nativo} \times 27\% + \text{Suelos Estériles} \times 9\% \quad (1) \end{aligned}$$

Por otra parte, al contar con los volúmenes cosechados y suponiendo que cada camión carga 28 m³, se calculó el flujo de camiones diario para cada mes además se empleó la densidad promedio de caminos en la subcuenca para calcular la longitud total de caminos utilizada en los predios cose-

chados cada mes, dividiendo la superficie cosechada por la densidad promedio de caminos.

Sin embargo, debido al tamaño y características de la subcuenca de estudio, algunos de los factores mencionados permanecen constantes en el corto plazo, como la pendiente, el tipo de suelo y el área de la cuenca, por lo que no pudieron ser incluidos en este trabajo ya que se busca desarrollar un modelo en base a regresiones. Además, hay otros factores que por sus características de manejo también presentan poca variabilidad, como son el período de replante, el tipo de carpeta de rodado, el período de mantención de caminos, el tipo de maquinaria usada y el manejo de residuos, siendo descartada su inclusión en la modelación desarrollada.

De esta manera, las variables seleccionadas para realizar la calibración del modelo fueron: la superficie forestal cosechada (ha), la superficie de cada uno de los otros usos del suelo en la subcuenca (ha), la superficie cosechada acumulada (ha), el caudal de los ríos (l/s), la precipitación promedio (mm), el flujo de camiones que transportan madera (número de camiones/día) y la longitud de caminos al interior de los predios en faenas de cosecha (km).

Para calibrar el modelo se utilizó el programa Statgraphics plus v.4, donde se hicieron regresiones lineales simples y múltiples con las variables seleccionadas. En la modelación simple se hicieron regresiones lineales de cada variable por separado con los sólidos suspendidos para determinar la influencia de cada una de ellas, para posteriormente establecer regresiones lineales múltiples que incluyen el conjunto de variables seleccionadas.

Para el análisis de los resultados se utilizaron coeficientes estadísticos como la t de Student, el de Durbin-Watson, el R², la desviación estándar y la probabilidad.

Además, es importante mencionar que las variables forestales no provocan un efecto instantáneo sobre el medio ambiente, sino que se manifiestan después de algún tiempo, por lo que se hicieron regresiones con desfases en el tiempo, por ejemplo la superficie cosechada en diciembre podría tener influencia en la producción de sólidos suspendidos de junio.

De esta forma, se calibraron varios modelos en los cuales se fue cambiando la combinación y los desfases de las variables, además de probar con modelos logarítmicos, que en diversos estudios

mostraron buenos resultados en este tipo de modelaciones, y así poder observar con cuál se obtenían mejores resultados. En este proceso se eliminaron algunas variables al no ser estadísticamente significativas, dado por los estadígrafos utilizados, con lo cual se fue observando qué variable tuvo mayor influencia dentro del conjunto.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Al analizar los resultados de la modelación simple se observó que cada una de las variables seleccionadas tiene una influencia significativa sobre la concentración de sedimentos, determinada principalmente por el R^2 que varió entre 0,44 y 0,67, correspondiendo el valor más alto a la precipitación promedio mensual. Además, todas las variables fueron estadísticamente significativas al 95% de confianza.

Sin embargo, en la calibración múltiple algunas no mostraron una influencia estadísticamente significativa al 90% de confianza, como fue el caso de la superficie cosechada cada mes, la superficie cosechada acumulada y la superficie destinada a otros usos en la cuenca, eliminándolas de la modelación.

Asimismo, el período de calibración también fue una variable que determinó la influencia del conjunto de variables sobre la concentración de sedimentos, obteniendo mejores resultados al calibrar con períodos de doce meses.

De esta forma, se eligió el modelo con mejores resultados estadísticos, que resultó de la calibración entre julio de 1988 y junio de 1989, con un desfase de cinco meses para el flujo de camiones y de seis meses para la longitud de caminos y aplicando el logaritmo en base 10 (Fuentes, 1999). Los resultados de esta regresión se observan en el cuadro 1.

CUADRO 1

Resultados de la regresión entre julio de 1988 y junio de 1989.

Results of the regression between July 1988 and June 1989.

Variable	Coficiente	Desviación estándar	T de Student	Probabilidad
Constante	0,9421	0,2774	3,3953	0,0115
$\text{Log}_{10} Q$	-0,3600	0,1783	-2,0190	0,0832
$\text{Log}_{10} P$	0,4049	0,0815	4,9675	0,0016
Log_{10} Flujo C.	0,1899	0,0774	2,4517	0,0440
Log_{10} Long. C	0,1377	0,0527	2,6104	0,0349
Valor crítico de F	R^2	Desviación estándar modelo	Durbin-Watson	Grados de libertad
0,0013	0,9	0,0909	2,16	11

Nota: Q: caudal (l/s); P: precipitación promedio (mm), Flujo C.: flujo diario de camiones (número camiones/día) y Long. C: longitud de caminos (km)

De acuerdo a esto, el modelo propuesto es el siguiente:

$$\text{Log}_{10} \text{SS}_i = 0,9421 - 0,3600 * \text{Log}_{10} Q_i + 0,4049 * \text{Log}_{10} P_i + 0,1899 * \text{Log}_{10} \text{FC}_{i-} + 0,1377 * \text{Log}_{10} \text{LC}_{i-6} \quad (2)$$

Donde SS: sólidos suspendidos (mg/l)
 Q: caudal (l/s)
 P: precipitación (mm)
 FC: flujo de camiones (número/día)
 LC: longitud de caminos (km)
 i: mes (enero a diciembre)

En esta ecuación, el i-6 es el mes desfasado de la variable en 6 meses, es decir, en julio (mes 7) el i-6 será enero, lo mismo ocurre con el i-5, para el caso del flujo de camiones, donde i-5 será febrero.

Estos resultados muestran que el modelo es estadísticamente significativo, ya que las variables son significativas al 90% de confianza, lo que se ve reflejado en los valores del estadígrafo *t*, que son mayores al valor absoluto de 1,96. También se puede apreciar que los estimadores no presentan autocorrelación en las perturbaciones (Durbin-Watson > 1,4), lo que implica que el ruido del modelo, constituido por aquellas variables que no son consideradas en él pero que afectan el valor de la variable dependiente, no están correlacionadas. Esto indica que los estimadores calculados son eficientes, es decir, tienen varianza mínima, por lo que se

pueden establecer intervalos de confianza adecuados y probar hipótesis (Gujarati, 1997).

Otro estadígrafo de importancia es el R², que en este caso explica un 90% de la variabilidad en los sólidos suspendidos. Este índice es adecuado si se compara con el estudio de Hirschi y Barfield (1988), que analizó el modelo de erosión KYERMO, obteniendo un R² de 0,99, o con el estudio de Nearing *et al.* (1989), que determinó parámetros de erodabilidad como el K_r (tasa de erosión en y entre canalículos), el K_i (espaciamiento entre canalículos) y el T_c (espaciamiento en canalículos), para un modelo de erosión donde se obtuvieron valores de R² entre 0,86 y 0,99 para distintas series de datos.

El R² obtenido es alto al compararlo con el estudio de Laflen *et al.* (1978), que analizó un modelo que predice sedimentación, obteniendo un R² entre 0,50 a 0,52 dependiendo de la localización. Un estudio más amplio, desarrollado por Williams y Berndt (1977), predice la producción de sedimentos a partir de variables hídricas en 50 cuencas de Estados Unidos, obteniendo valores de R² entre 0,32 y 0,95.

Basado en lo anterior, el modelo desarrollado en este estudio explica adecuadamente la variación de la concentración de sólidos suspendidos en una cuenca forestal de la VIII Región. La comparación del R² con otros modelos se puede ver en el cuadro 2, donde también se indican las variables utilizadas en cada uno.

CUADRO 2

Modelos para predecir producción y concentración de sedimentos.

Models to predict sediment production and concentration.

Modelo	Hirschi <i>et al.</i> (1988)	Nearing <i>et al.</i> (1989)	Laflen <i>et al.</i> (1978)	Williams y Berndt (1977)
VARIABLES	- Gradiente de pendiente	- Intensidad de lluvia	- Tamaño del sedimento	- Volumen de escorrentía
	- Densidad de canalículos	- Gradiente de pendiente	- Forma de terraza	- Caudal máximo instantáneo
	- Separación de canalículos	- K _r , K _i , t _c	- Tasa de infiltración	- Superficie de cuenca
			- Tasa de escurrimiento	- Pendiente media
				- Longitud media
R ² (%)	0,99	0,86-0,99	0,50-0,52	0,32-0,95

Se puede apreciar que los modelos del cuadro 2 sólo incluyen variables hidrológicas y físicas del terreno, por lo que la ventaja del modelo desarrollado es la inclusión de variables forestales como el flujo de camiones y la longitud de caminos. Esto último es avalado por estudios que demuestran que estas variables influyen significativamente sobre la concentración de sedimentos (Reid y Dune, 1984; Bilby *et al.*, 1989), siendo, en este caso, la longitud de caminos levemente más significativa que el flujo de camiones al tener un mayor valor del estadígrafo t ($2,61 > 2,45$).

Respecto al caudal, es importante notar que presenta un coeficiente negativo, es decir, a un mayor nivel de esta variable habrá una menor cantidad de sólidos suspendidos. Esto se debe a que la cantidad de sólidos en los cursos de agua es más diluida cuando el caudal es mayor, por lo tanto habrá un menor nivel de sólidos suspendidos cuando mayor sea el agua transportada por los cursos de agua. No obstante, esto no significa que en los meses de invierno, cuando el caudal es mayor, habrá una menor producción de sedimentos, ya que se liberan más sólidos suspendidos a los cursos de agua por efecto de la precipitación y

la cosecha forestal, implicando que esta mayor cantidad de sedimentos se encuentra distribuida en un mayor volumen de agua. Lo anterior genera que las mediciones arrojen concentraciones más bajas en comparación a caudales menores, pero no altera la cantidad de sedimentos total producida en la cuenca.

Por otra parte, al analizar la figura 2, se ve que la mayor concentración de sedimentos se produce en los meses de invierno y específicamente en agosto (31 mg/l), que corresponde al segundo mes más lluvioso, con alrededor de 314 mm. Esta relación se ve reflejada en el modelo al observar que la variable con mayor influencia es la precipitación, con un valor del estadígrafo $t = 4,96$ y un nivel de confianza del 99%. Esta influencia de las lluvias se debe en gran parte a las faenas forestales realizadas en el verano anterior (por su desfase), principalmente la cosecha, que incrementa el transporte de madera en camiones, a través de los caminos habilitados al interior de los predios. Esto provoca, en último término, una mayor contribución de sedimentos a los cursos de agua (Megahan, 1978).

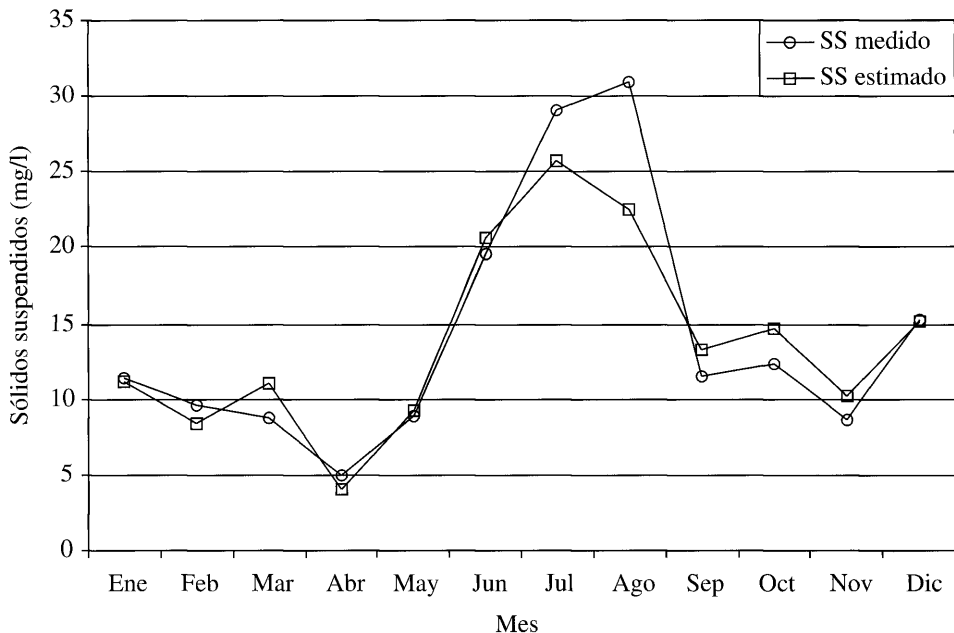


Figura 2. Sólidos suspendidos medidos y estimados por el modelo propuesto.

Suspended solids measured and estimated by the model (between July 1988 and June 1989)

Considerando lo anterior, la superficie cosechada es una variable de gran importancia para estimar la concentración de sedimentos, pero no es considerada en el modelo final al ser estadísticamente poco significativa, sin embargo, influye directamente sobre el flujo de camiones y la longitud de caminos usados, por lo que está incluida implícitamente.

Un aspecto importante de mencionar es que durante los años considerados para el estudio fue común la quema de los residuos de cosecha, lo que provocaría un mayor impacto sobre el suelo y el recurso hídrico, al compararlo con faenas sin quema. Esto ha sido comprobado en diversas investigaciones, tanto nacionales como extranjeras, que concluyen principalmente que el volumen de sedimentos transportados fuera del sitio aumenta considerablemente, hasta en un 97% (Megahan *et al.*, 1995). Sin embargo, en el presente estudio esta variable no se incluyó al no existir períodos sin quema para poder correlacionar la concentración de sedimentos con períodos con y sin quema de residuos y, de esta manera, individualizar el efecto de esta variable.

Por otra parte, se consideró que la superficie destinada a las praderas (30% de la subcuenca) no tuvo un efecto significativo sobre la concentración de sedimentos al tener un pastoreo moderado. Este hecho es apoyado por trabajos anteriores, que indican que no se encuentran diferencias sobre la concentración de sedimentos en comparación al pastoreo moderado y sin pastoreo (Guevara, 1997; FAO, 1997). Además, las praderas en estas condiciones de uso presentan una adecuada protección contra la erosión (Swift, 1984; Nelson *et al.*, 1996).

5. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados de la calibración, el modelo propuesto estima con un alto grado de ajuste la presencia de sólidos suspendidos en los cursos de agua, R^2 : 0,90 con variables al 90% de confianza. Esto permite proponer una herramienta que puede ser usada para estimar la concentración de sedimentos en cuencas forestales de la VIII Región con las características de hidrología, edafoclimáticas y productivas similares a la zona estudiada.

La gran ventaja del modelo desarrollado es la de trabajar en base a variables forestales y ser de fácil aplicación al no incluir engorrosos cálculos para cada variable. A su vez, las variables son de fácil medición y de registro común en los informes de manejo de los predios en las empresas forestales y en el Banco Nacional de Aguas de la Dirección General de Aguas.

Por otra parte, al transformar la concentración de sedimentos en los cauces se obtiene la producción de sedimentos que en este caso es de 0,06 ton/km²/año, valor que resulta bajo al compararlo con otras cuencas empleadas con fines forestales. Esto indica que la cuenca estudiada no se alteró significativamente, pero se debe considerar que esta cuenca presenta un 30% de praderas, las que brindan una buena protección contra la erosión al tener un pastoreo moderado. Además, la producción agrícola, que es la principal fuente de erosión y producción de sedimentos, es mínima.

De este modo, las principales variables que influyen sobre la concentración de sedimentos son el caudal, la precipitación, el flujo de camiones y la longitud de caminos utilizados al interior de los predios cosechados. Variables tales como la superficie cosechada y la superficie destinada a otros usos en la cuenca (agrícola, construcciones, bosque nativo, praderas, suelo original y estéril) fueron descartadas al tener poco efecto en la estimación de los sólidos liberados a los cursos de agua. No obstante, es importante tener presente que la superficie cosechada está incluida implícitamente en el cálculo de las variables forestales finalmente utilizadas en el modelo.

Para estudios futuros existen otras variables que deberían incluirse en un modelo de este tipo, como el tratamiento de los residuos de cosecha, que tiene gran influencia sobre la erosión del suelo y posterior concentración de sedimentos; también la pendiente, exposición, entre otras. Sin embargo, para incluir este tipo de variables se debe contar con información de varias subcuencas, que permitan realizar una comparación entre ellas y para que no permanezcan constantes en el tiempo. Además, para poder ampliar el estudio se debería contar con una información de sólidos suspendidos más amplia que la existente en la actualidad, lo que requeriría varios años de estudio y de toma de muestras.

BIBLIOGRAFIA

- ACUÑA, M. 1997. Proposición y aplicación de metodologías de evaluación ambiental para caminos forestales. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.
- ALMOROX, J., R. DE ANTONIO, A. SAA, M. CRUZ, J. GASCO. 1994. *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Editorial Agrícola Española, S.A. Madrid, España.
- BILBY, R. 1985. "Contributions of road surface sediment to a Western Washington stream", *Forest Science* 31 (4): 827-838.
- BILBY, R., K. SULLIVAN, S. DUNCAN. 1989. "The generation and fate of road-surface sediment in forested watersheds in Southwestern Washington", *Forest Science* 35 (2): 453-468.
- BROWN, G., J. KRYGIER. 1971. "Clear-Cut logging and sediment production in the Oregon Coast Range". *Water Resources Research*, 7 (5): 1189-1198.
- CORDOBA, M. 1982. Modelación matemática de la erosión hídrica pluvial. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- FAO, 1997. FAO watershed management field manual, gully control. FAO conservation guide 13/2. Roma.
- FRANCKE, S. 1993. Efectos del manejo de residuos de explotación en el suelo y crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus radiata* en las series de suelo Constitución y Cauquenes. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, *Boletín* N° 10: 64-97.
- FUENTES, E. 1999. Estimación de la producción de sedimentos en una subcuenca del río Biobío. Tesis de grado. Ingeniería Forestal, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, 100 p.
- GAYOSO, J. 1982. Pérdida de la productividad del sitio por efecto del madereo. Acta de Reunión de Trabajo: Evaluación de la productividad de sitios forestales, Universidad Austral de Chile.
- GAYOSO, J., A. IROUMÉ. 1991. "Compaction and soil disturbances from logging in Southern Chile", *Ann. Sci. For.* 48: 63-71.
- GUEVARA, E. 1997. Manejo integrado de cuencas. Documento de referencia para América Latina, FAO, Chile.
- GUJARATI, D. 1997. *Econometría básica*, McGraw-Hill, México.
- HIRSCHI, M., B. BARFIELD. 1988. "KYERMO, a physically based research erosion model. Part II. Model sensitivity analysis and testing", *Transactions of ASAE* 31 (3): 814-820.
- HUBER, A., D. LOPEZ. 1993. "Cambios en el balance hídrico provocados por tala rasa de un rodal adulto de *Pinus radiata* (D. Don), Valdivia, Chile", *Bosque* 14 (2): 11-18.
- INFANTE, L. 1985. Evaluación de las pérdidas de suelo por el efecto de la erosión hídrica en un suelo de la provincia de Valdivia, Xª Región. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile.
- JONES, J., G. 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.
- KING, J., L. TENNYSON. 1984. "Alteration of streamflow characteristics following road construction in North Central Idaho", *Water Resources Research* 20 (8): 1159-1163.
- LAFLEN, J., H. JOHNSON, R. HARTWIG. 1978. "Sedimentation modeling of impoundment terraces", *Transactions of ASAE* 21 (3): 1979-1983.
- MCCLURKIN, D., P. DUFFY, N. NELSON. 1987. "Changes in forest floor and water quality following thinning and clearcutting of 20-year-old pine", *Journal of Environmental Quality* 16 (3): 237-241.
- MEGAHAN, W. 1978. Reducing erosional impacts of roads. En: FAO Conservation guide N° 1, Roma.
- MEGAHAN, W., J. KING, K. SEYEDBAGHERI. 1995. "Hydrologic and erosional responses of a granitic watershed to helicopter logging and broadcast burning", *Forest Science* 41 (4): 777-795.
- NEARING, N., D. PAGE, J. SIMANTON, L. LANE. 1989. "Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model", *Transactions of ASAE* 32 (3): 919-924.
- NELSON, P., E. COTSARIS, J. OADES. 1996. "Nitrogen, phosphorus, and organic carbon in streams draining two grazed catchments", *Journal of Environmental Quality* 25: 1221-1229.
- REID, L., T. DUNNE. 1984. "Sediment production from forest road surfaces". *Water Resources Research* 20 (11): 1753-1761.
- SWIFT, L. 1984. "Gravel and grass surfacing reduces soil loss from mountain roads". *Forest Science* 30 (3): 657-670.
- TORO, J. 1991. La mecanización de faenas forestales y su relación con la degradación de suelos. Actas III Taller de Producción Forestal, Grupo de Producción Forestal. Fundación Chile.
- VAN LEAR, D., J. DOUGLASS, S. COX, M. AUGSPURGER. 1985. "Sediment and nutrient in runoff from burned and harvested pine watersheds in the South Carolina Piedmont". *Journal of Environmental Quality* 14 (2): 169-174.
- WILLIAMS, J., H. BERNDT. 1977. "Sediment yield prediction based on watershed hydrology". *Transactions of ASAE* 20, (3): 1100-1104.
- WRIGHT, K., K. SENDER, R. RICE, R. THOMAS. 1990. "Logging effects on streamflow: Storm runoff at Caspar Creek in Northwestern California". *Water Resources Research* 26 (7): 1657-1667.