

# USLE y análisis isotópicos en la reconstrucción de la historia erosional en una cuenca lacustre\*

USLE and isotopic analysis to determine the historical soil erosion in a lacustrine watershed

ALBERTO ARANEDA, MARCO CISTERNAS, ROBERTO URRUTIA

Unidad de Sistemas Acuáticos, Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción,  
Casilla 160-C, Concepción, Chile, e-mail: [aaarana@udec.cl](mailto:aaarana@udec.cl)

## SUMMARY

Two different methodologies were used for estimating the historical variations in soil losses for a lacustrine watershed in the Nahuelbuta Mountain Range (Laguna Chica de San Pedro, VIII Region). The first approach is based on the Universal Soil Loss Equation (USLE), while the second one focuses on an isotopic analysis ( $^{210}\text{Pb}$ ) of the lake sediments. In both cases, important temporal variations in sediment production were obtained. Values estimated with the USLE equation ranged from 0.45 to 1.00  $\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ . Alternatively, values determined by isotopic analysis were between 0.10 and 1.16  $\text{t ha}^{-1} \text{yr}^{-1}$ . Comparing the results of both methodologies, similar tendencies can be observed for the years 1955-1981. However, some significant differences appeared both at the beginning and at the end of 1943-1955 and 1981-1994. This could be explained by the low resolution of USLE, since in this study it cannot distinguish the differential soil protection offered by native forest or exotic forestry.

*Key words:* erosion, sediments, USLE,  $^{210}\text{Pb}$ , land use.

## RESUMEN

Se utiliza la ecuación USLE (Universal Soil Loss Equation), junto con análisis isotópicos del sedimento ( $^{210}\text{Pb}$ ), para estimar montos históricos de pérdidas de suelo en una cuenca lacustre de la Cordillera de Nahuelbuta (Laguna Chica de San Pedro, VIII Región). La producción histórica de sedimentos desde la cuenca, estimada a través de USLE, indica que el proceso erosivo ha presentado importantes variaciones a través del tiempo. La oscilación fluctuó entre 0.45 y 1.00  $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ . De igual forma, el análisis isotópico también reconoce una variación entre 0.1 y 1.16  $\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ . Comparando los resultados obtenidos mediante ambas metodologías, se observan tendencias similares en algunos períodos temporales (1955-1981). Sin embargo, durante las décadas extremas (1943-1955; 1981-1994) los resultados de ambos métodos difieren, a pesar de mantenerse dentro del mismo orden de magnitud. Esta diferencia podría estar explicada por la baja resolución de USLE, puesto que al nivel en que se utilizó en este estudio no es capaz de distinguir la protección diferencial ofrecida al suelo por el bosque nativo y las plantaciones forestales.

*Palabras claves:* erosión, sedimentos, USLE,  $^{210}\text{Pb}$ , uso del suelo.

## 1. INTRODUCCION

La erosión es uno de los fenómenos más graves que afectan al hombre en la actualidad, debido a que disminuye considerablemente la fertilidad del recurso suelo, alterando, entre otros, la producción agrícola, el desarrollo forestal y a las comunida-

des biológicas asociadas a los bosques. En nuestro país existen serios problemas de erosión; sólo en la hoya hidrográfica del Biobío se estima que el 48% de su superficie presenta severos daños producto de erosión hídrica (Peña y Carrasco 1992). Esto hace imperativo conocer la magnitud del daño, e identificar aquellas áreas susceptibles de ser erosionadas, para establecer oportunos planes de control erosivo y de gestión en el uso del suelo a fin de evitar su pérdida.

\* Trabajo financiado por los proyectos Fondecyt N° 1980529 y DIUC P.I. N° 96.310.021-1.1.

Para llegar a conocer cabalmente las características del fenómeno erosivo se hace necesario comprender que se trata realmente de un proceso a largo plazo, producto de una interacción entre el sustrato físico, los agentes atmosféricos y las actividades humanas. Por lo tanto, no es posible estudiar al fenómeno sólo desde una perspectiva contemporánea. En este sentido, adquieren una enorme importancia los estudios que tratan de inferir, mediante diferentes metodologías, el comportamiento histórico de los procesos erosivos.

Durante el último tiempo las investigaciones científicas orientadas a obtener data erosional de largo término han intentado resolver una serie de problemas que pueden ser resumidos en: i) Diferenciación entre "erosión natural" "background" y "erosión acelerada"; ii) Crear o probar modelos erosionales a diferentes escalas temporales; iii) Identificar procesos de erosión y cambios pedológicos de largo término; iv) Reconstrucción de los balances sedimentarios de una cuenca; y v) Identificar las respuestas erosionales a los cambios ambientales, generalmente debido a impactos de origen antrópico (Battarbee *et al.* 1985, Dearing *et al.* 1987, Dearing 1991, Gaillard *et al.* 1991, O'Hara *et al.* 1993, De Boer 1994, Foster *et al.* 1994).

Entre las metodologías más ampliamente utilizadas para estimar y predecir la magnitud de los procesos erosivos, se encuentra la ecuación USLE (Universal Soil Loss Equation; Wischmeier y Smith 1978). Esta ecuación estima pérdidas de suelo a partir de la interacción de factores físicos, bióticos y antrópicos. Sin embargo, la aplicación del modelo tiene algunas limitantes geográficas, debido a que fue concebido sobre datos específicos para Norteamérica, por lo que debe ser validada a escala regional (González del Tánago 1991, Oyarzún 1993).

Otro método, conceptualmente diferente al anterior, es el estudio del producto final del proceso erosivo: los sedimentos. En las últimas décadas se ha reconocido que los sedimentos, especialmente los de origen lacustre, reflejan los procesos erosivos que están ocurriendo en el entorno terrestre del lago. Esto se debe a que el cuerpo de agua y su cuenca tributaria funcionan como un solo sistema, en el cual la mayoría de los materiales que son generados en la cuenca llegan al lago, donde finalmente se depositan formando capas o estratos en el fondo (Dearing *et al.* 1987, Dearing 1991, De Boer 1994).

Considerando la importancia de estimar los montos de pérdidas de suelo y la existencia de diferentes metodologías para obtenerlos, la presente investigación pretende cuantificar, utilizando la ecuación USLE y sedimentos lacustres, las respuestas erosionales acontecidas en la cuenca de drenaje de Laguna Chica de San Pedro durante los últimos cincuenta años. De modo que la "historia erosionar y, por ende, la proyección futura del recurso suelo y del lago pueda ser reconocida y evaluada, sirviendo sus conclusiones de base científica para futuros planes de manejo acordes con las respuestas ambientales del sistema (cuenca y cuerpo acuático).

## 2. AREA DE ESTUDIO

La cuenca de Laguna Chica de San Pedro (figura 1) es parte de la zona de contacto entre la Cordillera de la Costa, representada por el bloque sollevantado de Nahuelbuta, y la Planicie Costera, conformada por los depósitos fluviomarinos originados hacia el Cuaternario antiguo (Ilabaca 1979).

El lago está rodeado por la cordillera de Nahuelbuta que alcanza los 400 msnm, con pendientes variables entre 0° en las mesetas y 45° en las vertientes. Su cuenca tiene una extensión de 4.5 km<sup>2</sup>, con un espejo de agua de 0.87 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 17 m. Presenta un emisario temporal en invierno que drena hacia Laguna Grande de San Pedro. Administrativamente, Laguna Chica está ubicada dentro de la nueva comuna de San Pedro de la Paz, en el sector noroccidental de Nahuelbuta, al sur del río Biobío y distante 5 km del centro de la ciudad de Concepción (Parra 1989).

Las condiciones climáticas de la cuenca, aun cuando no alcanzan a diferenciarse de las de Concepción, presentan algunos rasgos característicos determinados por el relieve, las masas de agua de los lagos y la situación del área respecto de los vientos. El clima es templado cálido, tipo mediterráneo, con estación o temporada seca. La temperatura media anual es de 12° C, con el mes más cálido en enero (16.1° C) y el más frío en julio (8.5° C). Esta pequeña oscilación térmica evidencia la fuerte influencia marítima costera. Las precipitaciones presentan una media anual de 1.234.9 mm, con un incremento durante los meses de mayo, junio, julio y agosto; esta concentración de las precipitaciones dinamiza los procesos de erosión en los sectores de pendiente (Devynck 1970).

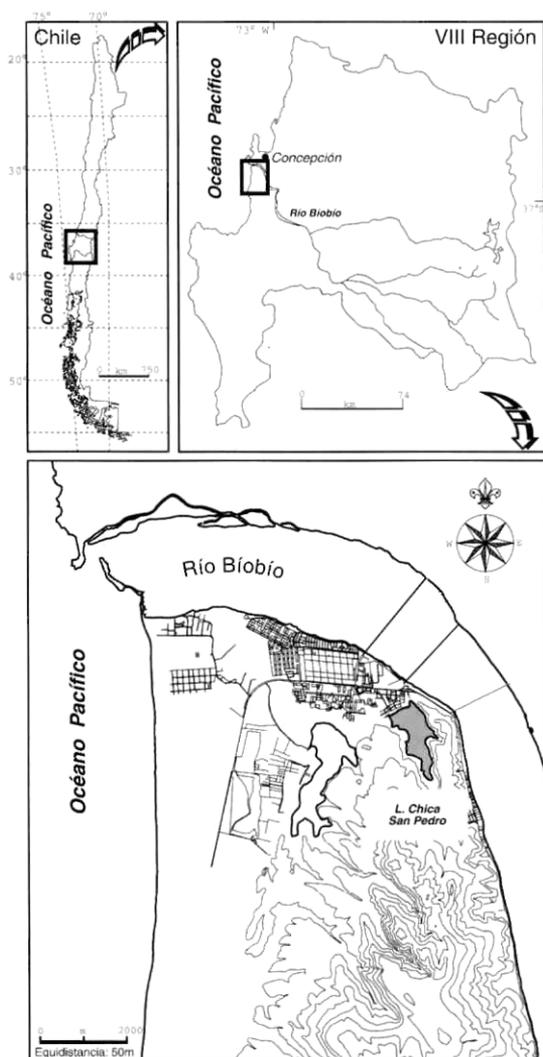


Figura 1. Localización de Laguna Chica de San Pedro y topografía circundante.

Location and topography of Laguna Chica de San Pedro.

En cuanto a la composición vegetal, Barrientos (1990) señala que a pesar de existir actualmente importantes plantaciones forestales (principalmente pino y eucalipto), aún es posible distinguir, especialmente en las quebradas profundas, relictos de vegetación nativa compuesta principalmente por olivillo, peumo, avellano, boldo, litre, lingue, canelo, maqui y arrayán.

Desde un punto de vista histórico, la cuenca del lago ha experimentado diferentes usos del suelo a través del tiempo. En épocas precolombinas probablemente estuvo cubierta por vegetación nativa. Posteriormente, con la llegada de los conquistadores españoles el bosque habría sido utilizado como

fuelle de madera para construcciones y como combustible. A mediados del siglo XIX la demanda del auge cerealero probablemente implicó la utilización de parte de la cuenca con sembradíos. Luego, desde inicios del presente siglo, se dio comienzo a las plantaciones forestales intensivas sobre la cuenca, que desplazaron los remanentes nativos hacia las quebradas. Actualmente, en la cuenca se desarrollan importantes proyectos inmobiliarios (Parra, 1989, Morales, 1993).

### 3. METODOLOGIA

3.1. *Estimación de la erosión mediante USLE.* La ecuación USLE estima pérdidas de suelo a partir de seis factores que son: la erosividad de las lluvias (R), la erodabilidad del suelo (K), largo y ángulo de ladera (LS), uso del suelo o cobertura vegetal (C) y las prácticas de manejo (P) del área estudiada. De este modo, la erosión (A) es definida por:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (1)$$

Para la aplicación de USLE, en el área de estudio, se utilizaron los factores K y LS estimados por Oyarzún (1993) en el sector oriental de la Cordillera de Nahuelbuta. El factor P no se consideró puesto que no existen prácticas de manejo en el área estudiada.

Las unidades de medidas de los factores considerados en la ecuación son: A ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), R ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), K ( $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ ). Los factores LS, C y P son adimensionales.

En la obtención del factor R local se utilizaron los registros continuos de precipitaciones de la estación pluviométrica Hualpén, localizada en las proximidades de la cuenca. Se determinó la intensidad máxima en treinta minutos de precipitación, multiplicándola por las intensidades horarias de cada evento de lluvia.

Para la estimación del factor cobertura vegetal (C) se procedió a interpretar fotografías aéreas de los años 1943, 1955, 1961, 1978, 1981 y 1994. Posteriormente, la información fue digitalizada e ingresada al SIG ARC/INFO, reconociéndose los diferentes usos del suelo y el porcentaje de ocupación respecto del área total de la cuenca, durante los últimos 50 años. Una vez identificadas las diferentes tipologías vegetacionales y sus porcentajes, se agruparon en cuatro categorías (pastizales,

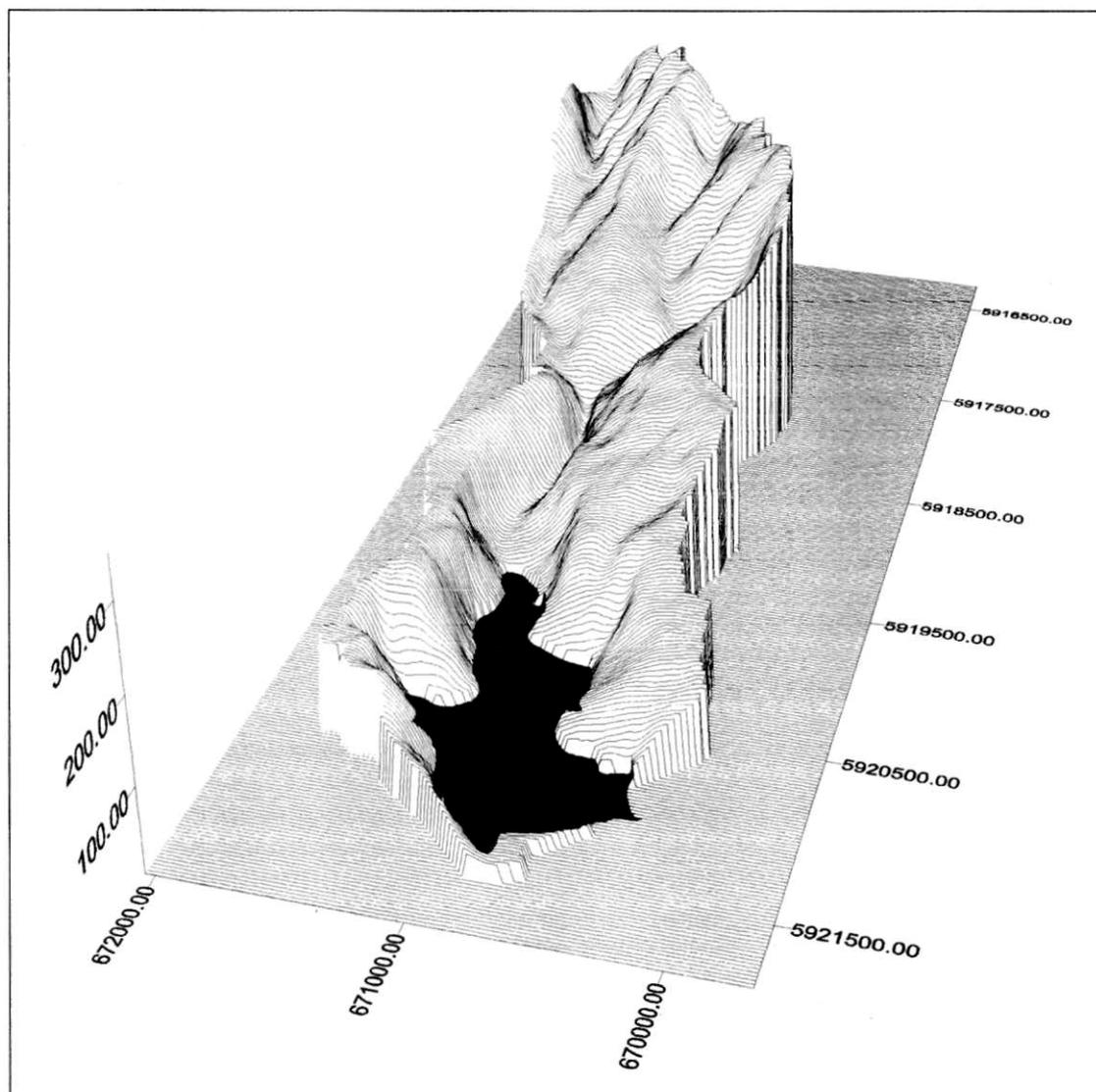


Figura 2. Representación tridimensional de la cuenca de Laguna Chica de San Pedro.  
Three dimensional representation of the Laguna Chica de San Pedro watershed.

matorrales, arboles y áreas deforestadas) a fin de facilitar el calculo del factor (obertura (C), que fue obtenido utilizando las tablar propuestas por Wischmeier y Smith (1978) De este modo, fue posible obtener un valor del factor C que integro las diferentes tipologías vegetacionales.

3.2. *Estimación de la erosión mediante registros isotópico-sedimentarios ( $^{210}\text{Pb}$ )* La obtención de las tasas de erosión mediante el análisis isotópico del sedimento comprende necesariamente tres fases fundamentales i) establecimiento de la geocronología isotópica de la columna de sedi-

mento, ii) determinación de las tasas de sedimentación y iii) la estimación de las tasas de erosión

Sin embargo, para realizar un adecuado análisis isotópico es necesario demostrar que la columna sedimentaria no ha sido mezclada por bioperturbacion o por algún proceso físico. En este sentido, se procedió a obtener radiografías de la columna inmediatamente después de colectada, siguiendo la metodología propuesta por Axelsson (1983).

En general la geocronología isotópica determina, cuantitativamente, la distribución vertical de un radioisótopo contenido en una columna de se-

dimento. Debido a su desintegración natural, los sedimentos más antiguos, situados a niveles más profundos, contienen una proporción menor del isótopo (Crickmore *et al.* 1990). Dicha proporción es utilizada para determinar la edad del sedimento, conociendo el tiempo de vida media del radioisótopo estudiado. Una vez fechada la columna estratigráfica, es posible estimar, basándose en modelos establecidos, la tasa de sedimentación del cuerpo lacustre, es decir, conocer la cantidad de sedimento que arriba al fondo del lago por unidad de tiempo. Posteriormente, utilizando otras premisas, es factible determinar las tasas de erosión de la cuenca (Dearing 1991).

En la presente investigación se utilizó la radiactividad del isótopo natural <sup>210</sup>Pb, procedente de la cadena de disociación del <sup>238</sup>U. El isótopo llega a los ambientes lacustres vía depositación seca o húmeda desde la atmósfera. Tiene un tiempo de vida media de 22.3 años, lo que permite la reconstrucción de los eventos desarrollados dentro de los últimos 150 años (Appleby y Oldfield 1978, Binford *et al.* 1991, Blais *et al.* 1995).

Para el análisis isotópico se procedió a recolectar un núcleo de sedimento mediante buceo autónomo, utilizándose un tubo acrílico de 5 cm de diámetro por 50 cm de largo. Una vez en laboratorio, el núcleo fue seccionado a intervalos de 1 cm. Las muestras así obtenidas fueron transportadas al Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (CNRS), en l'Université Joseph-Fourier, Grenoble, Francia. La determinación de <sup>210</sup>Pb, se realizó siguiendo los métodos propuestos por Eakins y Morrison (1978) y Binford *et al.* (1991).

Los datos de actividad se ingresaron al modelo CRS (Constant Rate Supply; Appleby y Oldfield, 1978) para obtener las tasas de sedimentación y geocronología de Laguna Chica. De acuerdo al CRS, el inventario total de <sup>210</sup>Pb (cantidad de <sup>210</sup>Pb en Bq cm<sup>-2</sup>) presente en la columna de sedimento es definido por la siguiente ecuación:

$$A_{(0)} = \sum (C_i * D_i) \quad (2)$$

La tasa a la cual los sedimentos se acumulan (Appleby y Oldfield, 1978) se obtiene por:

$$r = (\lambda * A_i) / C_i \quad (3)$$

La edad de los sedimentos en cada estrato se calculó mediante:

$$t = 1/\lambda * \ln (A_{(0)} / A_i) \quad (4)$$

Donde:

- C<sub>i</sub> = Concentración de <sup>210</sup>Pb "en exceso" ("unsupported") en el centímetro (i).
- D<sub>i</sub> = Masa del centímetro (i) expresada en área.
- λ = Constante de decaimiento del <sup>210</sup>Pb.
- A<sub>(0)</sub> = Inventario de <sup>210</sup>Pb en todo el núcleo.
- A<sub>i</sub> = Inventario de <sup>210</sup>Pb, en el centímetro (i) del sedimento,
- r = Tasa de sedimentación,
- t = Edad de cada estrato.

Finalmente, conociendo las tasas de sedimentación a través del tiempo, fue posible estimar las variaciones temporales de erosión (Dearing *et al.* 1987, Dearing 1991), asumiendo que:

- La sedimentación es homogénea en todo el fondo del lago.
- La totalidad del material producido en la cuenca llega a la columna de agua.
- El material que sedimenta en el fondo del lago sólo es producido en la cuenca.

De este modo, fue posible estimar, conociendo las áreas del fondo del lago y de la cuenca, la producción de sedimentos durante cada período de tiempo, mediante la fórmula:

$$T_e = (r * A_f) / A_c \quad (5)$$

Donde:

- T<sub>e</sub> = Tasa de erosión promedio
- A<sub>f</sub> = Área del fondo del lago
- A<sub>c</sub> = Área de la cuenca

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. *Tasas de erosión históricas mediante USLE.* En la tabla 1 se pueden apreciar las diferentes tipologías vegetacionales, los porcentajes relativos respecto del área total de la cuenca y el valor del factor cobertura (C) obtenido. Se observa que el porcentaje de ocupación de árboles fue mayor en 1943, para luego disminuir el año 1981. Posteriormente se aprecia un aumento del porcentaje en el año 1994. En cuanto a pastizales y matorral, no se observa una clara tendencia a aumentar o disminuir. Sin embargo, es evidente el au-

mentó de la deforestación a partir de 1961 hasta 1981, para luego disminuir en 1994.

Con respecto a la erosividad de las lluvias (R), se obtuvo un valor anual de  $235.28 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para el año en que se disponía de datos. Asumiendo que la precipitación sobre la cuenca ha sido relativamente constante a través del tiempo, es posible utilizar, como una primera aproximación, el valor de R para todos los años en estudio. El valor de R obtenido quedó comprendido de acuerdo a la clasificación de Foster *et al.* (1981), como "baja erosividad". En otras estimaciones realizadas en la vertiente oriental de la Cordillera de Nahuelbuta, Oyarzún (1993) determinó un factor de  $2.648 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , que de acuerdo con la misma clasificación está comprendido como "moderada erosividad".

Esta importante diferencia en los valores de erosividad de la lluvia podría estar explicada por

la falta de una adecuada serie de tiempo en el cálculo del factor R, del presente estudio. Para la estimación del factor erosividad se requieren datos continuos de precipitaciones de un período considerable de años (González del Tánago 1991). Sin embargo, en este trabajo sólo se tuvo acceso a registros continuos de precipitaciones de un solo año. Por este motivo, el valor de R obtenido estaría subestimando la verdadera erosividad de la lluvia existente en el área de estudio. Esta condición provocaría a su vez una subestimación de los montos de pérdidas de suelo.

Considerando los factores R y C estimados para el área de estudio, junto con los factores K, L y S obtenidos desde Oyarzún (1993), fue posible estimar, sobre la base de la ecuación (1), las pérdidas de suelo para cada año en que se contaba con fotografías aéreas (tabla 2).

TABLA 1

Porcentajes de cobertura y estimación del factor C (cobertura) ponderado para cada año en estudio.  
Covers percentages and estimation of the C factor (cover), for the time interval considered.

Años	% Pastizales	% Matorral	% Arboles	% Deforestado	C
1943	4	22	74	0	0.054
1955	5	30	65	0	0.058
1961	4	25	54	16	0.096
1978	5	19	57	14	0.090
1981	1	28	43	22	0.119
1994	0	28	59	8	0.057

TABLA 2

Estimación de la erosión A ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), en diferentes años, utilizando los factores K y LS estimados por Oyarzún (1993) y el factor R calculado para el área de estudio.  
Erosion estimated in different years for the study area, utilizing the K and LS factor estimated by Oyarzún (1993).

Años	R ( $\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )	K ( $\text{t ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ )	LS	C	A ( $\text{t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )
1943	235.28	0.024	1.49	0.054	0.457
1955	235.28	0.024	1.49	0.058	0.492
1961	235.28	0.024	1.49	0.096	0.811
1978	235.28	0.024	1.49	0.090	0.758
1981	235.28	0.024	1.49	0.119	1.003
1994	235.28	0.024	1.49	0.057	0.479

Es posible observar que la tendencia erosional en la cuenca de Laguna Chica no ha sido un proceso constante durante los últimos 50 años, sino que ha experimentado importantes variaciones a través del tiempo (figura 3). Hacia 1943, la erosión alcanzó un valor de  $0.457 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , manteniendo esta tendencia relativamente constante hasta 1955 con  $0.492 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Posteriormente, los montos aumentaron casi al doble, a comienzos de la década de los sesenta ( $0.811 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), estabilizándose, con una leve disminución, hasta fines de los años setenta ( $0.758 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Los mayores índices de erosión, durante el intervalo temporal estudiado, se registran hacia mediados de los ochenta, alcanzando  $1.003 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . La tendencia histórica finaliza con una marcada disminución de la erosión hasta valores similares a los de mediados de siglo ( $0.479 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).

Tanto la oscilación ( $0.45 - 1.00 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) como el valor medio de los últimos 50 años ( $0.66 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), estimados mediante USLE resultan bajos al contrastarlos con anteriores estudios. Oyarzún (1993) obtiene tasas de erosión de  $3.38$  y  $6.66 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en parcelas forestales con y sin residuos de explotación respectivamente. Siempre sobre suelos forestales, Gayoso e Iroumé (1989) reconocen una pérdida edáfica de  $5.16 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Alvarez (1989) informa índices de  $3.51 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en pendientes superiores al 37%. Lo anterior confirma de alguna manera la subestimación de la verdadera erosividad de las lluvias. No obstante, se debe considerar que las estimaciones de pérdidas de suelo sobre parcelas forestales trabajan con un sustrato previamente alterado por las faenas de preparación y plantación.

A pesar de lo anterior, otros trabajos realizados en Nahuelbuta han cuantificado valores que se aproximan notoriamente a los resultados obtenidos en la presente investigación. Así, Peña *et al.* (1993) reconocen tasas de  $0.45$  y  $1.89 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , mientras que Oyarzún (1997) estimó una tasa de erosión de  $0.25 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , para un bosque nativo inalterado y  $0.52 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  para otro alterado. Estos antecedentes permiten inferir que, a pesar de existir algún grado de subestimación en la erosividad, los montos de pérdidas de suelo obtenidos mediante USLE están dentro del orden de magnitud de estimaciones realizadas por otros autores.

Por otra parte, al considerar los factores K y LS obtenidos por Oyarzún (1993) para el cálculo de las pérdidas de suelo del área de estudio, se asume

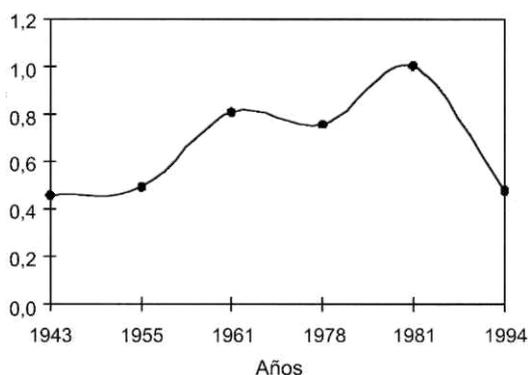


Figura 3. Patrón temporal de erosión, estimado mediante USLE, en la cuenca de Laguna Chica de San Pedro.

Temporal erosion pattern estimated by USLE in the Laguna Chica de San Pedro watershed

que la erodabilidad del sustrato y la pendiente, entre la vertiente occidental y oriental de Nahuelbuta, son similares. En este sentido, las variaciones observadas en los montos de erosión se deberían a diferencias en la estimación de la erosividad (R) y en la cobertura vegetal (C). Tradicionalmente, las cuantificaciones de erosión en parcelas forestales han obtenido el factor C desde tablas estandarizadas para un determinado tipo de plantación (Wischmeier y Smith 1978). En cambio, el presente trabajo utilizó un factor cobertura obtenido desde la realidad, integrando las diferentes tipologías vegetacionales y considerando la totalidad de la cuenca. Sobre la base de lo anterior, fue posible obtener la evolución temporal durante los últimos cincuenta años de la cobertura, lo que implica una representación más real de la verdadera evolución erosiva del sistema.

4.2. *Tasas de erosión históricas mediante  $^{210}\text{Pb}$ .* Las radiografías de la columna obtenidas presentaron, a una intensidad de 50 Kv, una estratigrafía sedimentaria a modo de capas fácilmente distinguibles. De acuerdo a esto, es posible afirmar que no ha existido una mezcla física de la estratigrafía. Situación similar ocurre con la factibilidad de mezcla biológica, pues no se reconocen restos de organismos bentónicos ni galerías de origen biológico que pudiesen haber afectado a la estratigrafía en forma posdeposicional.

En la figura 4 se observan los resultados del análisis isotópico del sedimento. Se aprecian variaciones en la actividad "en exceso" del  $^{210}\text{Pb}$ ; sin

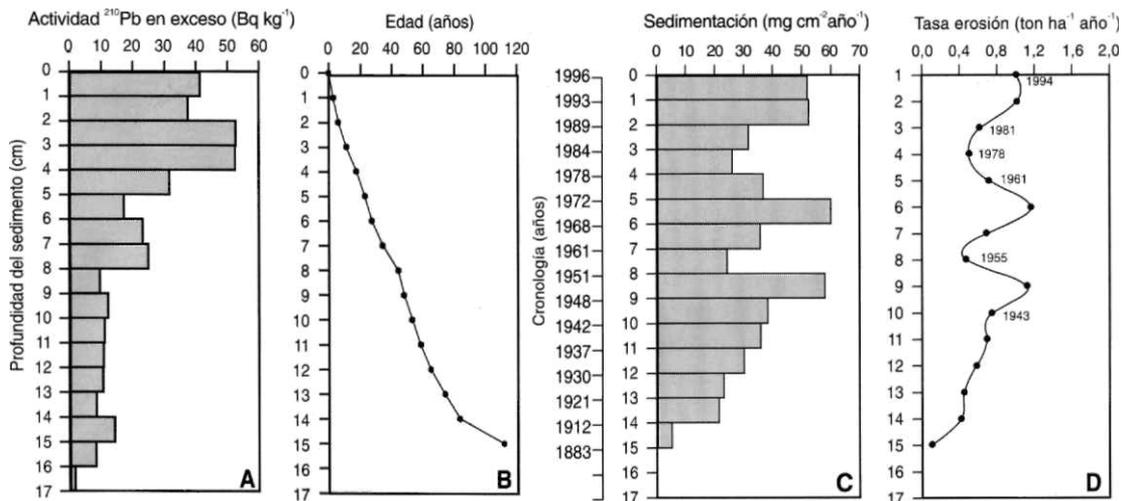


Figura 4. a) Actividad del isótopo  $^{210}\text{Pb}$ ; b) Modelo cronológico; c) Tasas de sedimentación y geocronología; d) Tasas de erosión.

a)  $^{210}\text{Pb}$  activity, b) chronological model, c) sedimentation rate and geochronology, d) erosion rate.

embargo, el gráfico muestra una tendencia general a la disminución en la actividad del isótopo a medida que aumenta la profundidad del sedimento. El rango de actividad osciló entre 1.20 Bq kg $^{-1}$ , en el centímetro 17, y 52.20 Bq kg $^{-1}$ , en el centímetro 3 (figura 4a). Aplicando el modelo CRS (Constant Rate Supply), sobre los datos de actividad del  $^{210}\text{Pb}$ , se obtuvo la edad de cada estrato sedimentario. Al realizar un perfil entre la profundidad del sedimento y edad (figura 4b) se aprecia una buena correlación ( $r^2=0.97$ ), evidenciando que los centímetros inferiores del sedimento tienen mayor edad que los centímetros superiores; esta aseveración válida, de alguna forma, el modelo cronológico aplicado.

La figura 4c presenta la cronología (edad) de los sedimentos junto con las tasas de sedimentación de Laguna Chica, obtenidas mediante las ecuaciones (3) y (4). La tendencia indica que la sedimentación en el lago no ha sido constante, por el contrario, el aporte de sedimentos fluctuó drásticamente entre 5.20 mg cm $^{-2}$  año $^{-1}$ , a inicios de siglo, y 60.00 mg cm $^{-2}$  año $^{-1}$  hacia fines de los años sesenta. Se observan importantes variaciones en el perfil, identificándose claramente tres eventos sedimentarios a través de aumentos y disminuciones en las tasas de sedimentación.

Mediante la fórmula (5) y las tasas de sedimentación obtenidas anteriormente se realizó la estimación de las tasas de erosión para los últimos

ciento trece años (figura 4d). Se observa que el comportamiento de los montos erosivos coincide con la sedimentación, debido a que es producto de ella. Al considerarlos años 1943, 1955, 1961, 1978, 1981 y 1994 se determinó un patrón decreciente, a partir de 1943, con 0.741 ha $^{-1}$  año $^{-1}$  hasta alcanzar las 0.47 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$  en 1955. Posteriormente, los índices se incrementan hacia 1961 con 0.68 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$ , para disminuir hacia fines de la década del setenta (0.50 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$ ). Finalmente, la tendencia aumenta a partir de 1981 (0.61 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$ ), hasta alcanzar, a mediados de los años noventa, el valor de 1.00 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$ .

Los montos erosivos determinados anteriormente mediante isotopía están dentro de los órdenes de magnitud indicados por otros estudios realizados en Europa. Foster *et al.* (1985) reconocen, en una cuenca forestada del sur de Inglaterra, una erosión promedio de 0.20 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$ . Dearing *et al.* (1987), en un pequeño lago al sur de Suecia, reconstruyeron la historia erosional del último milenio, destacando que la temprana deforestación aceleró la erosión desde 0.25 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$  a 2.5 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$ . Del mismo modo, Gaillard *et al.* (1991) notifican incrementos en las tasas de producción de sedimentos, debido a los diferentes usos del suelo, desde 0.05 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$  hasta 0.50 t ha $^{-1}$  año $^{-1}$  durante el presente siglo.

Por su parte, O'Hara *et al.* (1993) demuestran en México, a partir de registros sedimentarios

lacustres, que la erosión acelerada, producto del uso intensivo del suelo, existía mucho antes de la llegada de los españoles a América. Lo anterior descarta la teoría de que las prácticas agrícolas traídas desde Europa por los conquistadores fueron las que degradaron por primera vez el suelo de esa parte del continente. Identificaron variaciones entre  $0.05 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (3 mil años atrás),  $0.13 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  (hace 1.600 años) y  $0.36 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  en la actualidad.

Se puede discutir la relevancia de comparar lagos localizados en otras latitudes y con diferentes variables físicas (e.g. precipitaciones, tamaño y topografía de la cuenca, características geológicas y pedológicas), puesto que no tiene la rigurosidad científica necesaria como para ser un procedimiento válido en la interpretación. No obstante, el análisis comparativo sirve en alguna medida para corroborar los órdenes de magnitud y el grado de aproximación a la realidad que tienen los resultados logrados en la presente investigación. De este modo, se observa que la data obtenida para Laguna Chica es perfectamente comparable con la información bibliográfica, demostrándose de alguna forma la buena representatividad de los índices estimados.

**4.3. Comparación de los resultados de ambas metodologías.** Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos por ambos métodos se procedió a traslapar las dos tendencias. La figura 5 muestra el grado de similitud entre las estimaciones. Temporalmente, ambas curvas presentan comportamientos relativamente semejantes, especialmente durante las tres décadas intermedias (1955-1984). Sin embargo, durante las décadas extremas del período estudiado (1943-1955 y 1981-1994), las tendencias son opuestas, invirtiéndose en ambas ocasiones. Entre 1943 y 1955 los montos determinados mediante los registros sedimentarios son mayores que los logrados a través de USLE. Lo mismo ocurre entre los años 1981 y 1994. Llama la atención que ambos métodos pudieron, hacia los años cincuenta, coincidir, con bastante exactitud, en la determinación de los montos de erosión para ese período (Isotopía= $0.47$  y USLE= $0.49 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Del mismo modo, se aprecia el grado de coincidencia entre los promedios finales logrados a través de ambas metodologías (Isotopía= $0.67 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y USLE= $0.66 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Lo anterior afirma que ambas estimaciones tienen algún grado de consistencia entre sí.

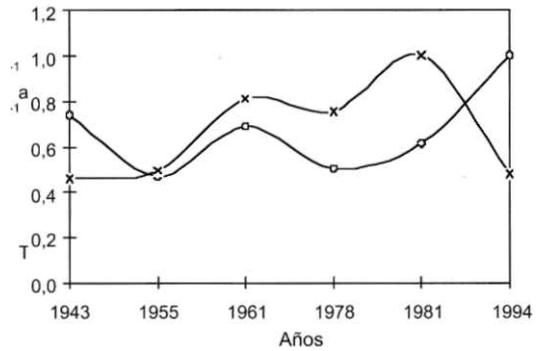


Figura 5. Comparación temporal de los montos de erosión, estimados mediante USLE (x) y a través de isotopía sedimentaria (o).

Temporal comparison of the erosion rate estimated through USLE (x) and by isotopic analysis (o).

Probablemente las anteriores diferencias responden al alto grado de dependencia de la ecuación USLE a la cobertura vegetal. Las décadas extremas, con las menores pérdidas de suelo, presentan los mayores porcentajes de áreas cubiertas por árboles. En el primer caso, se trata de bosque nativo secundario y en el segundo de plantaciones forestales. De este modo, a pesar de tratarse de vegetación cualitativamente diferente, los factores ingresados a la ecuación USLE sólo consideraron el aspecto cuantitativo, sobreestimando, principalmente, el grado de protección ejercido por las plantaciones forestales.

De acuerdo a lo anterior, es posible inferir que las tasas de erosión, obtenidas por isotopía, serían más representativas de la realidad, pues no dependen directamente de la cobertura, sino que simplemente responden al producto final de la erosión: la sedimentación. Si se considera que existe un ajuste entre ambas metodologías, en las décadas intermedias, se puede suponer que la estimación isotópica debiera ser también confiable en los extremos de la tendencia, especialmente si se ha reconocido el sesgo de USLE en aquellos períodos.

Sin embargo, es necesario considerar que la metodología isotópica también presenta sesgos en la obtención de las tasas de erosión. Probablemente, los supuestos necesarios para realizar la estimación sean los puntos más cuestionables de la metodología aplicada.

Respecto al primer supuesto, la sedimentación es homogénea en todo el fondo del lago; lógicamente es esperable que, en la realidad, la mayor sedimentación se presente en los sectores profun-

dos del lago ("focusing effect"; Hilton *et al.*, 1986, Evans, 1991), por sobre el sector costero. En cuanto al segundo (todo el material producido en la cuenca arriba a la columna de agua) considera que no existe retención de sedimento al interior de la cuenca y que por lo tanto todo el suelo erosionado alcanza al lago. Al igual que el caso anterior, no es posible que el supuesto se ajuste completamente a la realidad, pues siempre existirá una fracción de materiales que son retenidos en sectores de poca pendiente, formando cuerpos sedimentarios (e.g. terrazas, conos aluviales, deltas, etc.). Finalmente, el tercer supuesto; (todo el material que sedimenta en el fondo del lago es producido sólo en la cuenca) excluye la posibilidad de que la producción autigénica del lago (e.g. sílica biogénica) sea capaz de afectar las estimaciones de erosión.

A pesar de los anteriores problemas, es necesario considerar que se trata de una primera aproximación cuantitativa a la historia erosional del sistema. En otras palabras, aun cuando las tasas de erosión no sean totalmente confiables, sí lo son los datos desde un punto de vista comparativo entre ellos, para determinar las tendencias y variaciones temporales de los montos de erosión.

## 5. CONCLUSIONES

- El factor erosividad de las lluvias ( $R=235.28 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), obtenido para el área de estudio, quedó comprendido en el rango de "baja erosividad". Sin embargo, para una estimación más precisa de este factor, se requiere una serie de tiempo más larga que la utilizada.
- Los montos de erosión estimados, tanto por la ecuación USLE como por los análisis isotópicos, entregan valores que están dentro de los órdenes de magnitud informados por otros autores. Esta condición válida en algún grado las estimaciones del presente trabajo.
- Comparativamente, la evolución temporal de la erosión, determinada mediante ambas metodologías, presenta diferencias en las tendencias durante los períodos extremos (1943-1955 y 1981-1994). No obstante, existe un buen ajuste entre ambos métodos, durante las tres décadas intermedias (1955-1961-1978-1981).
- La notable disminución en la tasa de erosión, que reconoce la USLE a partir de 1981, se debería a que al nivel en que se utilizó en este estudio no es capaz de distinguir la protección

diferencial a las pérdidas de suelo que ofrece un bosque nativo de la que ofrecen las plantaciones forestales.

- Es posible indicar que las tasas de erosión obtenidas mediante isotopía, serían más representativas que USLE de los procesos erosivos acontecidos en la cuenca. Sin embargo, también debe considerarse que la estimación isotópica se basa en ciertos supuestos que podrían causar algún grado de sub o sobreestimación de los montos.
- Finalmente, se debe considerar a este estudio como una primera aproximación cuantitativa a la evolución erosional de la cuenca. Por lo tanto, a pesar de que los índices de erosión no sean completamente exactos, son útiles comparativamente entre sí, para determinar las tendencias degradativas de los suelos de la cuenca. Igualmente se reconoce la necesidad de realizar estudios más detallados al respecto.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento, por su valiosa cooperación, a los señores: Carlos Oyarzún, Felipe Ríos, Patrick Debels, Jorge Vergara y Ricardo Barra. Reconocimiento especial al Dr. Michel Pourchet del Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (CNRS) de l'Université Joseph-Fourier, Grenoble, Francia.

## BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ, F. 1989. *Evaluación de erosión producida por actividades forestales productivas: II etapa. Unidad manejo, desarrollo y estudios forestales*. Programa manejo de cuencas VIII Región. Corporación Nacional Forestal, 30 p.
- APPLEBY, P.G., F. OLDFIELD. 1978. "The calculation of Lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported  $^{210}\text{Pb}$  to the sediment", *CATENA* 5: 1-8.
- AXELSSON, V. 1983. "The use of X-ray radiographic methods in studying sedimentary properties and rates of sediment accumulation", *Hydrobiologia* 103: 65-69.
- BARRIENTOS, J.C. 1990. *Estructura dinámica de la vegetación en la hoya hidrográfica de la Laguna Chica de San Pedro*. Tesina de Diplomado en Análisis y gestión del ambiente. Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción. 23 p.
- BATTARBEE, R.W., P.G. APPLEBY, K. ODELL, R.J. FLOWER. 1985. " $^{210}\text{Pb}$  dating of Scottish lakes sediments, afforestation and accelerated soil erosion", *Earth Surface Processes and Landforms* 10:137-142.
- BINFORD, M.W., M. BRENNER, D.R. ENGSTROM. 1991. *Patrones de sedimentación temporal en la zona litoral del Huiñaimarca*. En: *El Lago Titicaca*. C. DEJOUX y A. ILTIS (eds.). ORSTOM-Hisbol, La Paz, Bolivia, 584 p.

- BLAIS, J M., J. KALFF, R. J. CORNETT y R. D. EVANS. 1995. "Evaluation of <sup>210</sup>Pb dating in lake sediment using stable <sup>210</sup>Pb, Ambrosia pollen, and <sup>137</sup>Cs". *Journal of Paleolimnology* 13 (2): 169-178.
- CRICKMORE, M.J., P.G. TAZIOLI, P.G. APPLEBY, F. OLDFIELD. 1990. *The use of nuclear techniques in sediment transport and sedimentation problems*. Technical Documents in Hydrology. International Hydrological Programme IHP-III-5, UNESCO, Paris, 170 pp.
- DEARING, J., H. HAKANSON, B. LIEBERG-JONSSON, A. PERSSON, S. SKANSJO, D. WIDHOLM, F. EL-DAOUSHY. 1987. "Lake sediments used to quantify the erosional response to land use change in southern Sweden", *Oikos* 50: 60-78.
- DEARING, J.A. 1991. "Lake sediment records of erosional processes", *Hydrobiologia* 214: 99-106.
- De BOER, D.H. 1994. *Lake sediment as indicators of recent erosional events in an agricultural basin on the Canadian prairies*. In: Variability in Stream erosion and Sediment Transport, Proceedings of the Canberra Symposium, International Association of Hydrological Sciences, Publication N° 224, 125-132.
- DEVYNCK, J.L., 1970. *Contribución al estudio de la circulación atmosférica en Chile y el clima de la región del Bio-Bio*. Depto. de Geofísica, Universidad de Concepción, 164 p.
- EAKINS, J. D., R. T. MORRISON 1978. "A new procedure for the determination of Lead-210 in lake and marine sediments", *International Journal of Applied Radiatives Isotopes* 29: 531-536.
- EVANS, R. D. 1991. "The impact of sediment focusing on total residual <sup>210</sup>Pb: implications for choice of a dating model", *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 24: 2335-2339.
- FOSTER, G.R., D.K. MCCOOL, K.G. RENARD, W.C. MOLDENHAUER. 1981. "Conversion of the universal soil loss equation to SI metric units", *Journal of Soil and Water Conservation* 36 (6): 355-359.
- FOSTER, I.D., J.A. DEARING, A. SIMPSON, A. D. CARTER, P.G. APPLEBY. 1985. "Lake catchment based studies of erosion and denudation in the Merevale catchment, Warwickshire, UK.", *Earth Surface Processes and Landforms* 10: 45-68.
- FOSTER, I.D., H. DALGLEISH, J.A. DEARING, E. D. JONES. 1994. *Quantifying soil erosion and sediment transport in drainage basins, some observations on the use of <sup>137</sup>Cs*. In: Variability in Stream erosion and Sediment Transport, Proceedings of the Canberra Symposium, International Association of Hydrological Sciences, Publication 224: 55-64.
- GAILLARD, M.J., J. A. DEARING, F. EL-DAOUSHY, M. ENELL, H. HAKANSSON. 1991. "A multidisciplinary study of the lake Bjaresjosjon (S Sweden): land-use history, soil erosion, lake trophy and lake-level fluctuations during the last 3000 years", *Hydrobiologia* 214: 107-114.
- GAYOSO, J., A. IROUMÉ. 1989. "Daño en suelos forestales asociado a faenas de maderero", *Medio Ambiente* 10 (1): 70-79.
- GONZALEZ DEL TANAGO, M. 1991. "La ecuación Universal de Pérdidas de suelo Pasado, presente y futuro", *Ecología* 5: 13-50.
- HILTON, J., J.P. LISHMAN, P.V. ALLEN. 1986. "The dominant processes of sediment distribution and focusing in a small, eutrophic, monomictic lake", *Limnology and Oceanography* 31: 125-133.
- ILABACA, G. 1979. *Transgresión marina reciente en el litoral de Concepción Antecedentes morfológicos*. En: Seminario Taller sobre desarrollo e investigación de los recursos marinos, VIII Región, Universidad de Concepción, Chile, 31-40.
- MORALES, J. 1989. *El desarrollo forestal en Concepción*. Univ. Académica de Humanismo Cristiano. Grupo Estudios Agro-Regionales. Serie: Abriendo Caminos. Concepción, 341 p.
- O'HARA, S.L., F. STREET-PERROT, T.P. BURT. 1993. "Accelerated soil erosion around a Mexican highland lake caused by prehispanic agriculture", *Nature* 362: 48-51.
- OYARZUN, C. 1993. "Evaluación del modelo USLE para predecir pérdidas de suelo en áreas forestadas de la cuenca del río Bio-Bio", *Bosque* 14(1): 45-54.
- OYARZUN, C. 1997. "Estudio a mesoescala de la erosión del suelo en una cuenca hidrográfica de montaña Chile central", *Revista de Geografía Meridiano* (5): 23-28.
- PARRA, O. 1989. "La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio", *Ambiente y Desarrollo* 5 (1): 117-136.
- PEÑA, L., P. CARRASCO, M. FIGUEROA, C. OYARZUN, B. LO CASCIO. 1993. *Pérdidas por erosión hídrica en suelos agrícolas y forestales de la cuenca del río Bio-Bio*. En: Elementos cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal. Serie: Propuestas de ordenamiento, volumen 4. Francesco FARANDA, Oscar PARRA (eds). Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción, 105 p.
- PEÑA, L., P. CARRASCO. 1992. *Clasificación preliminar de erosión en los suelos de la cuenca del río Bio-Bio*. En: Elementos cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal Serie: Propuestas de ordenamiento, volumen 4. Francesco FARANDA, Oscar PARRA (eds.). Centro EULA-Chile, Universidad de Concepción, 105 p.
- WISCHMEIER, W.H., D. D. SMITH. 1978. *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning* USDA, SEA/AR, Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture, Washington D.C., 158 p.