

**EVALUACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL EN ZONAS
ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS DE CHILE CENTRAL
EVALUATION OF SURFACE WATER EROSION
IN ARID AND SEMI-ARID ZONES OF CENTRAL CHILE**

Pizarro, R.¹, Morales, C.², Vega, L.³, Valdés, R.⁴, Olivares, C. y Balocchi, F.⁵

Resumen

En el presente documento, se analiza la erosión hídrica superficial junto al conglomerado de procesos erosivos que toman lugar en la IV Región de Coquimbo, a través del método de parcelas de clavos de erosión. Los datos fueron obtenidos mediante mediciones realizadas en parcelas experimentales, en 30 sectores a lo largo de la Región, durante los años 2007 y 2008, en el marco del proyecto "Restauración Hidrológico Forestal y Oasificación: Herramientas Claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo", desarrollado por el Instituto Forestal y la Universidad de Talca. Junto a esto, se obtuvieron las densidades aparentes y texturas de cada suelo, además de las lecturas de 18 pluviógrafos instalados en la región.

En este sentido, se demostró a nivel general que las densidades de los suelos no difieren en demasía entre el total de sectores, sin embargo, se observó un amplio mosaico de texturas, predominando los suelos del tipo franco arenoso. Los resultados pluviométricos evidenciaron una amplia variabilidad para los períodos considerados, asimismo, se observó un leve aumento en la cuantía e intensidad de las precipitaciones al avanzar hacia el sur. Respecto a los procesos erosivos considerados (erosión, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado) se observó una pérdida de suelo neta decreciente de Norte a Sur, lo que no fue representativo para el total de procesos, los cuales presentaron fluctuaciones.

Finalmente, es importante señalar que en este estudio se trazaron los primeros lineamientos, con el fin de lograr la modelación de los procesos erosivos para la Región de Coquimbo y sus provincias, lo cual se puede lograr relacionando gráficamente los procesos analizados, con las variables pluviométricas consideradas. Debido a lo anteriormente señalado, en este estudio se deja de manifiesto que resulta de suma importancia seguir recopilando información durante los años siguientes, mediante la metodología aquí propuesta.

Palabras clave: Erosión, sedimentación, parcelas de clavos de erosión, erosión neta, suelo movilizado

Abstract

In this document discusses de surface water erosion along the conglomerate of erosive processes taking places in the Coquimbo Region, through the method of erosion plots nails. The data were obtained from measurements made in experimental plots in 30 sectors throughout the region, during 2007 and 2008 years, under the project "Restoring forest hydrological and oasification: key tools for increasing productivity of degraded soils of the Coquimbo Region", developed by the Forest Institute and the University of Talca. Alongside this, was the obtained the apparent densities and textures of each floor, plus reading of 18 recording rain gauges installed in the Region.

It showed that, in general, the densities of soil do not differ too much between total sectors, however, there was a lot a broad mosaic textures, the predominant type of frank sandy soils. The results showed a wide variability rainfall for the periods concerned, and, though weak, was seen an increase in amount and intensity of rainfall as they move southward. Whit regard to the erosive processes in question (erosion, sedimentation, net erosion and mobilized soil) showed a net loss of soil decreasing from north to south, which was not representative for the total processes, whit showed fluctuations.

Finally, this study charted the first guidelines to achieve shaping the erosive phenomenon in the Coquimbo Region, linking graphically processes studies whit rainfall variables considered. For the foregoing, it is imperative to continue the study proposed here.

Key words: Erosion, sedimentation, plots of nails of erosion, net erosion, mobilized soil.

INTRODUCCIÓN

La erosión corresponde a la pérdida de suelo, proceso que se inicia cuando las gotas de lluvia impactan en el suelo y disgregan las partículas de éste; asimismo, la magnitud con que ocurre el fenómeno, depende del tamaño y la velocidad de las gotas de lluvia. De esta forma Pidwirny (2006) define la erosión

como la degradación de los suelos, los sedimentos, el regolito, los fragmentos de roca y el paisaje, a través de distintos medios externos como el viento, el hielo y el agua.

Así, las partículas del suelo disgregadas son arrastradas después por escurrimiento superficial y algunas de ellas se depositan en los poros del suelo,

¹ Facultad de Ciencias Forestales, Escuela de Ingeniería Forestal, Universidad de Talca, Chile. rpizarro@utalca.cl

disminuyendo la capacidad de éste para infiltrar el agua de lluvia, hecho que aumenta la probabilidad de generar procesos erosivos, ya que la erosión se produce cuando la intensidad de las precipitaciones supera a la capacidad de infiltración del suelo.

El proceso de pérdida de suelo por la erosión es mucho más rápido que el proceso de formación de éste. Por eso, la pérdida de la capa superficial del suelo disminuye la fertilidad y ocasiona una disminución de los rendimientos de las cosechas. La tierra arastrada contribuye además a la contaminación y el aterramiento de los ríos. Asimismo, la Corporación Chilena de la Madera (CORMA, 2005) agrega que en términos prácticos el suelo no es un recurso natural renovable, por lo que su pérdida debe considerarse irreversible.

Aunque la erosión hídrica es un proceso natural ocasionado fundamentalmente por las lluvias intensas; la topografía, el bajo contenido de materia orgánica del suelo, así como el porcentaje y tipo de cobertura vegetal, coayudan a producirla. De esta manera, las actividades humanas como las técnicas de cultivo inapropiadas, las modificaciones de las condiciones hidrológicas, la deforestación y la marginalización o abandono de tierras, contribuyen a intensificarla y acelerarla. Adicionalmente, cabe señalar que este tipo de erosión constituye uno de los principales procesos de pérdida de suelo y representa una de las formas más completas de degradación, englobando tanto la degradación física del suelo como la química y la biológica (De Regoyos, 2003 citando a Colomer, 2001).

En el mismo contexto, se debe señalar que la degradación de las tierras en Chile, verificada en zonas áridas y semiáridas, adquiere una alta importancia, dada la fragilidad de estos ecosistemas, en donde predominan condiciones de cobertura vegetal reducida o casi ausente, ligadas a eventos de precipitación escasos, pero de alta intensidad; ello conduce irremediablemente a procesos de desertificación, fenómeno que según Pizarro et al. (2003a), se ha constituido en uno de los problemas socio-económico-ambientales más serios del país. Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) en 1994, concordaron en señalar que la distribución de los terrenos erosionados en Chile no sigue un patrón regular, y es posible encontrar tanto áreas escasamente erosionadas, como sectores en los cuales la pérdida y el deterioro hacen irre recuperable el recurso, tanto en términos físicos como productivos.

En este marco, la Región de Coquimbo, ubicada aproximadamente a unos 350 Km. al norte de Santiago de Chile, es la Región que presenta la situación más crítica del país, en donde las precipitaciones torrenciales, a pesar de ser escasas, arrastran consigo significativas porciones de suelo con las mejores condiciones de fertilidad (Benedetti y Pizarro, 2006). Por lo tanto, se puede señalar que es una zona en

donde los procesos de desertificación y erosión tienen una alta importancia, a pesar de las múltiples medidas aplicadas. Ello es función principalmente de la sobreexplotación de los recursos edáficos y vegetacionales, aunque las altas tasas de migración campo ciudad producidas en esta zona, en los últimos 10 años, han aliviado la presión sobre los recursos naturales y han permitido una incipiente recuperación de los ecosistemas, hecho que aún corresponde a zonas específicas y no es una generalidad del territorio de esta Región.

En este ámbito, se debe señalar que la falta de información cuantitativa sobre el tema de la erosión en Chile, es un problema evidente y ello es más explícito en zonas áridas y semiáridas. Por tanto, resulta de alta importancia el contar con herramientas matemáticas y/o computacionales que permitan estimar las tasas de erosión, con el propósito de facilitar la toma de decisiones técnicas y con ello conseguir un manejo sustentable del recurso suelo.

En función de lo anteriormente expuesto, y dado que no existen referencias de estudios similares que aborden la temática de la erosión hídrica en el país, este estudio se enmarca en la evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Región de Coquimbo, Chile, mediante la aplicación de la metodología de parcelas con clavos de erosión.

METODOLOGIA

La metodología empleada en este estudio para la medición de la erosión y/o sedimentación, corresponde a la utilización de parcelas con clavos de erosión, cuya instalación y mediciones se han efectuado en el marco del proyecto "Restauración hidrológico forestal y Oasificación: Herramientas claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo", proyecto que fue financiado por la Agencia Estatal Corfo/Innova de Chile, y el cual ha tomado lugar los años 2006, 2007, 2008 y 2009. Los resultados entregados en este artículo, corresponden a los de los años 2007 y 2008.

El método de las parcelas con clavos de erosión, corresponde a parcelas rectangulares, abiertas en términos de permitir el flujo líquido y sólido desde la parte alta de la ladera hasta la parcela, a las cuales se les instalan clavos, los que son medidos inicialmente desde la cabeza de cada clavo, hasta el nivel del suelo, medida que fija la lectura inicial. De forma posterior a la ocurrencia de una tormenta, se vuelve a repetir el proceso de medición, y si la distancia entre la cabeza del clavo y el nivel del suelo se ha incrementado, con respecto a la medición inicial, entonces se entiende que ha existido un proceso erosivo. Si por el contrario, dicho vector ha visto reducida su dimensión, entonces ha ocurrido un proceso de sedimentación (Figura 1). Lo anterior permite establecer un balance entre pérdidas y entradas de suelo, y al-

canzar una mejor estimación de los procesos erosivos. (Pizarro y Cuitiño, 2002).

Respecto a lo expuesto, Pizarro y Cuitiño, 2002, señalan que si existen procesos de erosión (E) y sedimentación (S), entonces es posible establecer un nuevo concepto, llamado erosión neta (En), que se entiende como la diferencia entre ambos procesos, es decir, $En=E-S$; por tanto si el valor de En es posi-

tivo, entonces se advierte que hubo un predominio de la erosión sobre la sedimentación; y si es negativo, es la sedimentación la que prevaleció sobre la erosión. Asimismo, es importante agregar el concepto de suelo movilizado, SM, entendido como el total de suelo que se movilizó sobre la superficie, y que corresponde a la suma de los procesos de erosión y sedimentación, es decir, $SM=E+S$.

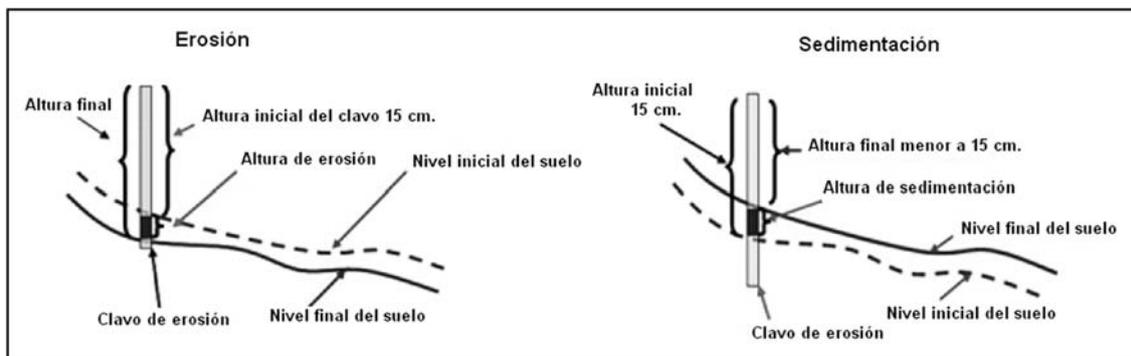


Figura 1. Forma de medición de la altura de erosión y la altura de sedimentación.

En relación al emplazamiento del experimento en cada parcela, éste consta de clavos de unos 30 cm de largo, los cuales se instalan verticalmente en cada sitio, siendo el número de éstos función del grado de exactitud que se quiera lograr. Para una mayor precisión, lo recomendable es que cada parcela posea dos repeticiones en el lugar, lo que da un total de tres parcelas en cada área en estudio.

Por otra parte, los clavos se instalan sobre suelo desnudo, debido a que la existencia de vegetación hace muy difícil la medición, y ello es aún más importante, si se considera que las mediciones se hacen con un diferencial de un tercio de milímetro. Por tanto, estas parcelas son muy adecuadas para zonas áridas y semiáridas y no son recomendables para zonas húmedas en donde existe abundancia de vegetación. Si se visualiza presencia de vegetación, es necesario eliminarla. De esta manera, la estimación de erosión que se hace por estas parcelas, es la máxima o potencial para cada situación, dado que la presencia de vegetación reduciría la escorrentía sólida.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la Región de Coquimbo, Chile, la cual se extiende entre los 29°20' - 32°10' Latitud Sur y los 69°49' - 71°43' Longitud Oeste, abarcando una superficie aproximada de 40.579,9 km². La región se divide administrativamente en tres provincias, las que ubicadas de norte a sur, corresponden a Elqui, Limarí y Choapa. Asimismo, cada provincia está subdividida en comunas o municipios (Figura 2).

La Región de Coquimbo es llamada zona de los Valles Transversales. Presenta tres unidades de relieve definidas, de este a oeste y estas son: La Cordillera

de Los Andes, la depresión intermedia y la Cordillera de la Costa.

La Cordillera de los Andes se presenta con altas cumbres, sobre los 6000 m y desciende de norte a sur. También se puede señalar que no presenta volcanismo activo.

En la depresión intermedia, en las cuencas de Elqui, Limarí y Choapa, y en sus valles correspondientes, se verifica la presencia de cordones montañosos, conocidos como Valles Transversales. Los principales ríos, que llevan el nombre de las cuencas, desembocan en el mar y están formados de la siguiente forma; el río Elqui está formado por los ríos Turbio, Claro y Cochiguaz; el río Limarí por los ríos Hurtado, Grande, Los Molles y Cogotí; y el río Choapa está formado por los ríos Cuncumén, Illapel y Chalinga. El agua transportada por estos ríos proviene del derretimiento de las nieves depositadas en la Cordillera de Los Andes y de las lluvias experimentadas durante el año, por lo que generalmente sus caudales son irregulares, y producto de las sequías cíclicas que experimenta la región, en algunos años, son bastante escasos. Ésto ha hecho necesaria la construcción de embalses para una mejor administración del recurso hídrico, como el Puclaro (en el río Elqui), Cogotí (en el río Cogotí), Recoleta (en el río Hurtado) y La Paloma (en el río Grande).

La Cordillera de la Costa es amplia y deja una zona de Planicies litorales, en contacto directo con el Océano Pacífico. Estas son especialmente anchas en la desembocadura del río Limarí

Selección de los sectores y ubicación de las parcelas

Tal como lo muestra el cuadro 1, en la región se seleccionaron 30 sectores, 10 por cada provincia ad-

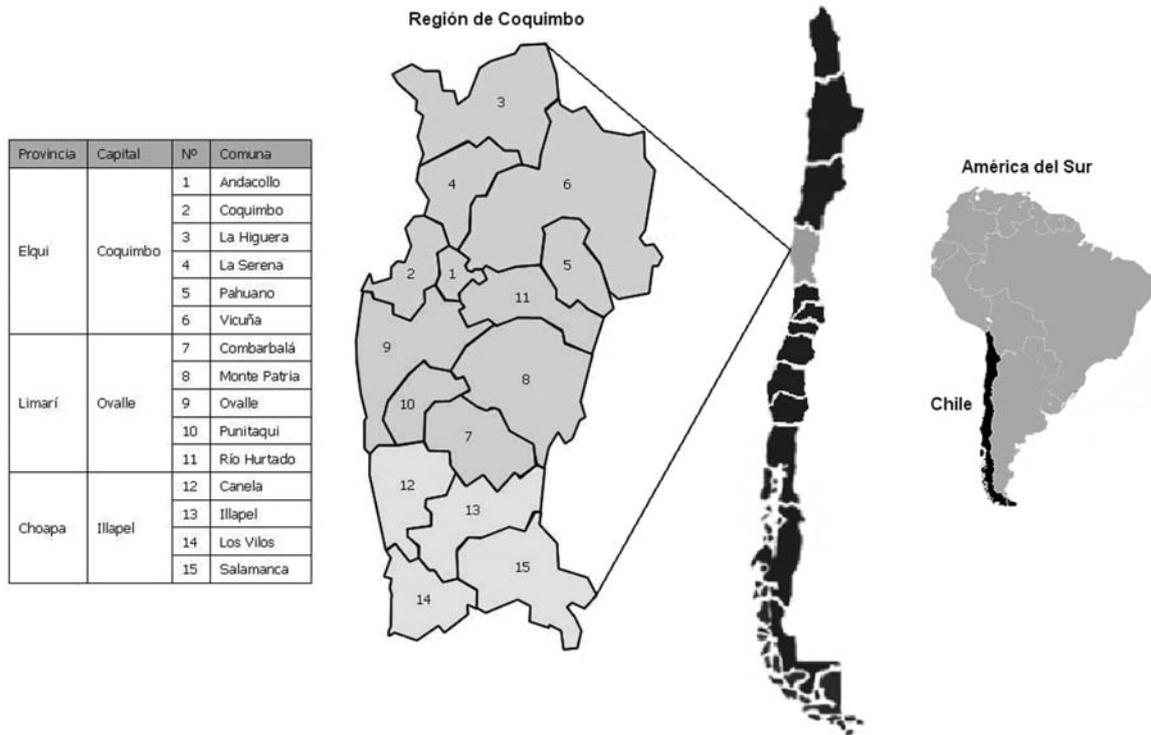


Figura 2. Mapa administrativo de la Región de Coquimbo, Chile.

ministrativa, los cuales fueron objeto de estudio de los procesos erosivos, mediante la implementación y medición de parcelas de clavos de erosión.

Para el experimento se consideró la instalación y medición de 130-135 clavos por parcela, considerando 3 parcelas por sector y para los 30 sectores analizados. Esto significa que después de cada tormenta, la medición total involucró aproximadamente 11.970 clavos. Es importante mencionar que las parcelas se instalaron sobre suelo desnudo, donde en ocasiones fue necesaria la aplicación de matamalezas.

Las mediciones se efectuaron con una huincha métrica al costado de cada clavo, expresadas en milímetros. Los datos fueron capturados de manera periódica tras cada tormenta, resultando en un total de 4 medidas de datos realizadas como promedio anual, dado que ciertos lugares en estudio presentan una mayor frecuencia de eventos de lluvia, en relación con otras zonas de la región. Asimismo, la medición de los clavos se realiza al menos 1 semana después de ocurrida la tormenta, para que dicha medición se haga a un mismo nivel de humedad presente en el suelo (figura 3)

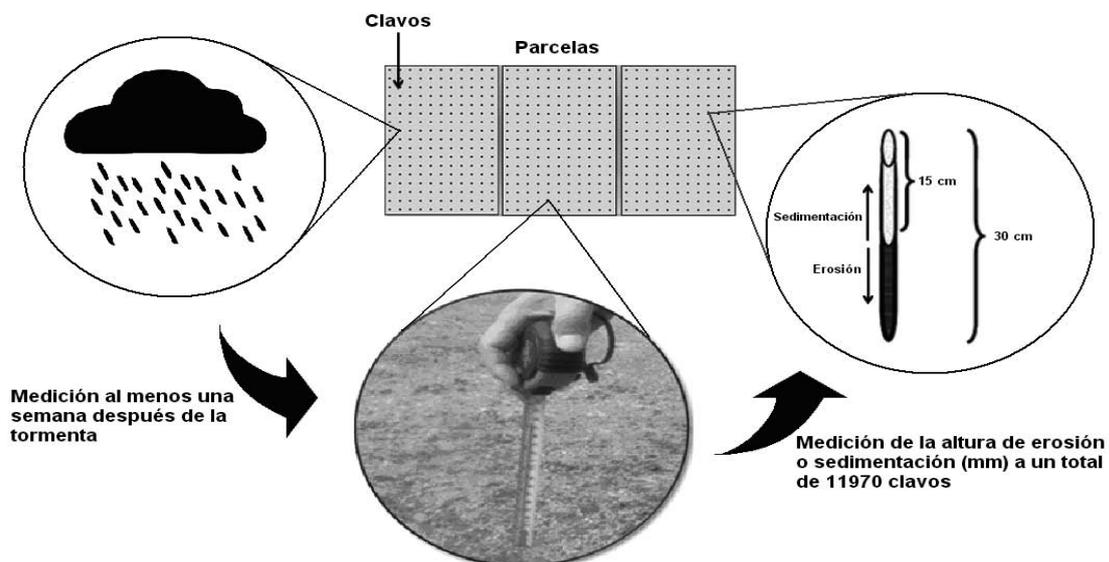


Figura 3. Descripción de parcelas, clavos y herramientas de medición.

Cuadro 1. Resumen de los sectores analizados.

Región	Provincia	Sectores Analizados	Coordenadas geográficas	
			Latitud	Longitud
Coquimbo	Elquí	El Tambo	30°1,600'	70°46,825'
		Gualliguaica	29°59,751'	70°48,565'
		Quebrada Talca	30°0,565'	71°2,457'
		Quebrada Honda	29°35,137'	71°12,507'
		Caldera y Damas	30°17,702'	71°9,190'
		Las Cardas	30°17,389'	71°16,362'
		El Chacay	29°40,583'	71°11,869'
		Quitallaco	30°8,584'	71°14,450'
		Tangué N°1	30°21,013'	71°33,204'
		Tangué N°2	30°27,534'	71°27,774'
	Limarí	Alcones	30°44,135'	71°31,199'
		Fray Jorge	30°40,281'	71°37,808'
		El Sauce	31°04,036'	71°07,715'
		Cogotí 18	31°06,222'	70°57,211'
		Pichasca	30°23,618'	70°52,768'
		La Colpa	30°29,513'	71°04,839'
		Romeralsillo	30°27,990'	71°09,215'
		Barraza	30°41,245'	71°28,044'
		El Espinal	30°44,237'	71°24,701'
		La Rinconada	30°50,976'	71°21,571'
	Choapa	Huanque	31°44,343'	70°55,211'
		Las Chinchillas	31°30,802'	71°05,565'
		Tunga Norte	31°38,023'	71°19,060'
		Atelcura	31°33,394'	71°21,770'
		Agua Fría	31°29,293'	71°22,221'
		Carquindaño	31°28,173'	71°24,756'
		El Chilcal	31°21,893'	71°26,097'
		Yerba Loca	31°33,394'	71°21,770'
		Cañas del Choapa	31°44,883'	71°18,650'
		Caracas los Vilos	31°53,762'	71°27,771'

Determinación de los valores de erosión y sedimentación

Para cuantificar los procesos erosivos, se procedió a lo planteado por Pizarro y Cuitiño, 2002. Así, después de cada evento de lluvia, se sumó el valor de cada uno de los clavos que denotó la presencia de una altura de erosión en la parcela, sin considerar los clavos que presentaron sedimentación, y el valor de esa sumatoria, fue dividido por el número total de clavos medidos. Para estimar la sedimentación, se sumó el valor de la altura de sedimentación que denotó cada clavo, sin considerar para ello a los que mostraron erosión, y la suma total fue dividida por el número total de clavos medidos. De esta manera se tuvo un valor promedio de la altura de erosión y de sedimen-

tación para la parcela, y ello tras cada tormenta o evento de lluvia. Asimismo, cada sector en estudio entregó un valor promedio de altura de erosión y de sedimentación, por medio de la obtención del promedio entre las tres parcelas establecidas en cada uno de los sectores señalados. Para definir el valor de la erosión y la sedimentación en ton/ha, se usa la expresión siguiente:

$$X = Y * Da * 10$$

Donde X es el suelo erosionado o sedimentado (ton/ha); Y es la altura media de suelo erosionado o sedimentado (mm) y Da corresponde a la densidad aparente del suelo (ton/m³). Por tanto, con esta información fue posible estimar adicionalmente los valores de erosión neta y suelo movilizado.

Cuadro 2. Resumen de los sectores con instrumental pluviográfico.

Región	Provincias	Pluviógrafo		
Coquimbo	Elqui	El Tambo	Quebrada Honda	Las Cardas
		Gualiguaica	Caldera y Damas	Tangue N°1
	Limarí	Fray Jorge	Pichasca	Barraza
		El Sauce	Romeralsillo	La Rinconada
	Choapa	Huanque	Atelcura	Cañas del Choapa
		Las Chinchillas	El Chilcal	Caracas los Vilos

Cálculo de las precipitaciones e intensidades de lluvia

La información pluviométrica de los sectores se obtuvo mediante las lecturas de 18 pluviómetros instalados en los sectores que señala el cuadro 2. Cada pluviómetro instalado midió y presentó la información registrada en rangos de 0,2 milímetros (mm), especificando la fecha y hora exacta en la cual se produjeron los eventos de precipitación. Con esta información, se identificaron en sus montos y comportamientos las tormentas a analizar, además de seleccionar tormentas con un monto igual o superior a 0,4 mm de lluvia. Posteriormente, para cada tormenta se obtuvieron los montos totales de precipitación, MTpp, la intensidad promedio IT y la intensidad máxima para 1 hora lmax1h.

Los pluviómetros instalados cubrieron una superficie correspondiente a más de un sector en estudio; para determinar los sectores que fueron cubiertos por uno u otro pluviómetro, se utilizó la metodología de los Polígonos de Thiessen, que permitió definir el área de influencia de cada pluviómetro, utilizando para ello el software de libre distribución GeoDATM.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados se logró determinar para los 30 sectores analizados, que la textura predominante del suelo fue franco-arenosa. Cabe mencionar que dicha textura presenta entre un 50-70% de arena y aproximadamente un 20% de arcilla.

Por otra parte, se puede señalar que para la región de Coquimbo la densidad aparente del suelo alcanzó un valor promedio de 1,31 gr/cm³. En el Cuadro 3, se observan las clases texturales predominantes y las densidades promedio del suelo, por provincia.

Al analizar el comportamiento latitudinal de la textura del suelo, se puede señalar que no se evidenció una relación que permitiera reforzar dicha idea. Así, la mayor variedad de texturas se localizó en el sector Sur, correspondiente a la Provincia de Choapa, en donde se encontraron 6 clases texturales. Asimismo, es importante mencionar que el sector sur es el que denota la mayor presencia de lluvias y por ende es el de mayor vegetación relativa en esta zona.

Cuadro 3. Clases texturales y densidades promedio por provincia.

Provincia	Clase textural predominante	Densidad promedio (g/cc)
Elquí	Franco arcilloso arenoso	1.276
Limarí	Franco arenoso	1.370
Choapa	Franco arenoso	1.293

Con respecto a la pluviometría, es importante referirse al número de tormentas analizadas, con lo cual se puede señalar que en el año 2007 se analizaron 52 tormentas y en el año 2008 se analizaron 98 tormentas, también se debe mencionar que en el primer año 28 sectores tenían registro pluviométrico y en el segundo año 29 sectores, tal como lo muestra el cuadro 4. Adicionalmente, se aprecia que cada sector tuvo en promedio de 3 a 4 tormentas anuales.

Cuadro 4. Número de tormentas y sectores analizados por provincia.

Provincia	Número de sectores y tormentas analizadas			
	2007		2008	
	Sectores	Tormentas	Sectores	Tormentas
Elquí	10	16	10	35
Limarí	8	10	9	31
Choapa	10	26	10	32
Total Regional	28	52	29	98

En el contexto anterior, se puede agregar que el número de tormentas aumentó considerablemente el año 2008 con respecto al año 2007, tanto a nivel regional como provincial. Lo cual deja de manifiesto un posible aumento del monto de precipitación entre un año y otro.

En el cuadro 5, se presentan los resultados promedio de las variables pluviométricas consideradas, a saber MTpp (monto total de precipitación de la tormenta en mm); IT (intensidad promedio de la tormenta en mm/h); e lmax1h (intensidad máxima de la tormenta

Cuadro 5. Resultados promedios para las variables pluviográficas consideradas.

Año	Proceso Erosivo	Provincia			Promedio Regional
		Elqui	Limari	Choapa	
2007	Mtpp (mm)	8,05	11,97	20,80	13,61
	IT (mm/h)	4,41	0,81	1,15	2,12
	Imax1h (mm/h)	19,46	3,28	6,5	9,74
2008	Mtpp (mm)	34,37	21,97	42,05	32,8
	IT (mm/h)	2,39	2,67	1,39	2,15
	Imax1h (mm/h)	8,81	16,34	21,33	15,49
Promedio Provincial	Mtpp (mm)	21,21	16,97	31,43	23,21
	IT (mm/h)	3,4	1,74	1,27	2,14
	Imax1h (mm/h)	14,14	9,81	13,92	12,62

en una hora en mm/h), tanto para la Región de Coquimbo como para las provincias de Elqui, Limari y Choapa. Como se mencionó anteriormente, dichas variables fueron obtenidas luego de la selección y caracterización de tormentas registradas por los pluviógrafos.

Donde MTpp es Monto total de precipitación, IT es intensidad máxima promedio por tormenta e Imax1h corresponde a la intensidad máxima para 1 hora.

A contar de la información anterior, se aprecia que el monto total de precipitación por tormenta (MTpp) para la Región de Coquimbo, fue mayor durante el año 2008, registrándose en promedio 32,80 mm por tormenta. Por su parte, el año 2007 presentó los valores de MTpp promedio más bajos, tanto a nivel provincial como regional, registrándose 13,61 mm por tormenta como promedio para la Región.

A nivel territorial se observa que la provincia que tuvo el mayor monto total de lluvia por tormenta o evento de precipitación, en el total del periodo estudiado (2007-2008), fue Choapa, con un promedio para la provincia de 31,43 mm por tormenta. Por su parte, Limari fue la que presentó el menor valor del monto de precipitaciones por tormenta para el mismo periodo, con un promedio provincial de 16,97 mm por tormenta, en tanto que la provincia de Elqui presentó un valor promedio por tormenta de 21,21 mm.

Con respecto a la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT), en la Región de Coquimbo se observa que el año 2007 es el que ha presentado los valores más bajos de intensidad, con un valor regional de 2,12 mm/h, el cual es superado levemente por el valor encontrado en el año 2008 correspondiente a 2,15 mm/h.

Adicionalmente, es importante mencionar que el comportamiento de la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta, para cada una de las provincias analizadas, es totalmente distinto respecto a lo sucedido con el monto total de precipitaciones. Si

bien, la provincia de Choapa fue la que presentó el mayor MTpp, su intensidad promedio por tormenta (IT) fue la menor de las tres provincias (1,27 mm/h); en segundo lugar se ubicó la provincia de Limari (1,74 mm/h); y en primer lugar la provincia de Elqui, en la cual fue encontrado un valor de intensidad de 3,40 mm/h. De esta forma, es posible afirmar que no existe relación entre el monto y la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta. Dicho de otra manera, las precipitaciones de una provincia o una región pueden ser más intensas cierto año, pero eso no significa que llueva más.

Al analizar la intensidad máxima de la tormenta en una hora (Imax1h), como valor promedio para la región de Coquimbo, se observa un aumento desde el año 2007, con un valor promedio por tormenta de 9,74 mm/h. Luego en el año 2008 dicho valor se incrementó a 15,49 mm/h. Con esto, se puede agregar que existe una importante variabilidad en los eventos pluviométricos de la región y también en los niveles de torrencialidad que se expresan en la intensidad máxima en una hora, la cual es similar a la que presentan como valores máximos otras zonas al sur del país, que están clasificadas como zonas húmedas.

La variabilidad mencionada anteriormente se puede apreciar de mejor forma en la figura 4, que muestra gráficamente el coeficiente de variación para las variables pluviográficas de las estaciones, ubicadas éstas de norte a sur del país, donde la tendencia de la gráfica se muestra variable.

A continuación, en el cuadro 6 se muestran los resultados promedio para cada año, los cuales corresponden a la suma de las erosiones anuales ocurridas por sector, dividida por el número de tormentas o eventos de lluvia de los procesos erosivos. Dichos resultados son presentados en ton/ha, tanto a nivel provincial como regional.

Donde E: Erosión, S: Sedimentación, En: Erosión neta y Sm: Suelo movilizado.

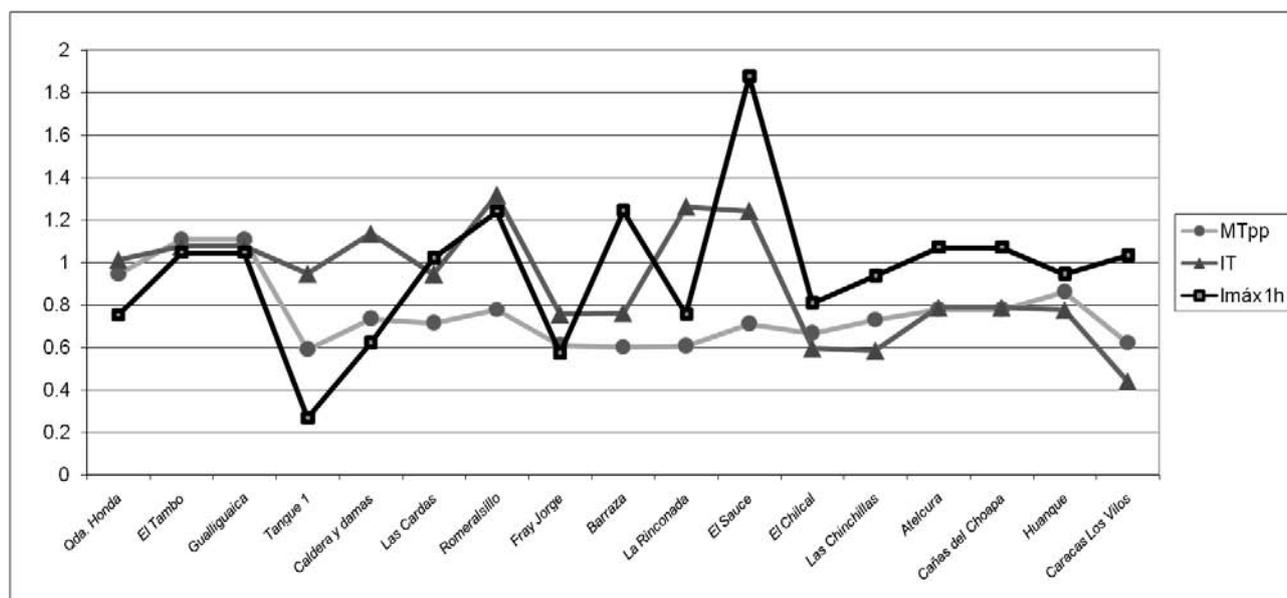


Figura 4. Coeficiente de variación (CV) para las variables pluviométricas por sector en disposición Norte – Sur.

Cuadro 6. Resultados medios para las variables del proceso erosivo.

Año	Proceso Erosivo	Provincia			Promedio Regional
		Elqui	Limari	Choapa	
2007	E(ton/ha)	5,81	4,75	2,96	4,51
	S(ton/ha)	2,47	2,31	3,55	2,77
	EN(ton/ha)	3,34	2,44	-0,59	1,73
	SM(ton/ha)	8,28	7,06	6,51	7,28
2008	E(ton/ha)	3,67	4,75	4,32	4,25
	S(ton/ha)	2,27	2,84	1,46	2,19
	EN(ton/ha)	1,40	1,91	2,86	2,06
	SM(ton/ha)	5,94	7,59	5,79	6,44
Promedio Provincial	E(ton/ha)	4,74	4,75	3,64	4,38
	S(ton/ha)	2,37	2,58	2,51	2,48
	EN(ton/ha)	2,37	2,18	1,14	1,90
	SM(ton/ha)	7,11	7,33	6,15	6,86

De la tabla anterior se desprende que el proceso de erosión ha sido mayor durante el año 2007, con un valor promedio regional de 4,51 ton/ha, el cual supera levemente al valor encontrado en el año 2008, correspondiente a 4,25 ton/ha.

También es importante mencionar que durante el año 2007, los suelos de los sectores de la provincia de Elqui se erosionaron en 5,81 ton/ha, como valor medio de las parcelas existentes en esta provincia, siendo ésta la que presentó el mayor valor de

erosión en dicho año, superando a la provincia de Limarí (4,75 ton/ha) y también sobrepasando en más de dos veces el valor encontrado en la provincia de Choapa (2,96 ton/ha). Durante el año 2008 la provincia de Limarí presentó el mayor valor de erosión de la Región (4,75 ton/ha). Por su parte, la provincia de Elqui presentó un valor de erosión del suelo de 3,67 ton/ha, considerando el mismo año, siendo éste, el valor promedio más bajo encontrado en la Región durante el año 2008. Lo anterior da cuenta de la vari-

abilidad que denotan las zonas áridas y semiáridas, en lo que respecta a los procesos precipitación-es-correntía.

Al analizar los valores promedio de erosión por provincia, para el período estudiado (2007-2008) se observó que la provincia de Limarí presentó el mayor valor, correspondiente a 4,75 ton/ha; en segundo lugar se ubicó la provincia de Elqui con 4,74 ton/ha y finalmente Choapa con 3,64 ton/ha. Esto es particularmente importante, porque estos resultados podrían llevar a la determinación de construir modelos predictivos de erosión, por cada provincia administrativa, derivado que no en toda la Región de Coquimbo se presenta el fenómeno erosivo con similares magnitudes ni relaciones.

Con respecto al proceso de sedimentación, se observa que en términos anuales, el año 2007 fue el que presentó el mayor valor promedio regional (2,77 ton/ha); asimismo, se ha observado una disminución entre los años considerados, observándose que durante el año 2008, se observó un valor promedio regional de sedimentación de 2,19 ton/ha.

Considerando el período 2007-2008, se observa que la provincia que tuvo un mayor promedio de sedimentación fue Limarí (2,58 ton/ha), seguida por Choapa (2,51 ton/ha) y finalmente Elqui con un total de 2,37 ton/ha. En el mismo sentido, se puede agregar que se ha observado en las provincias de Elqui y Choapa una disminución de la sedimentación en los años 2007 a 2008.

Al referirse a la erosión neta, debemos recordar que este proceso es el resultado de la diferencia (resta) entre la erosión y la sedimentación; así se puede señalar que la erosión neta tuvo un resultado negativo en la provincia de Choapa durante el año 2007, en donde el proceso de erosión fue superado por la sedimentación, resultando una erosión neta de -0,59 ton/ha. Sin embargo, durante el año 2008 la erosión neta muestra sólo valores positivos para las tres provincias, lo cual indica que la erosión fue mayor que la sedimentación, derivado de las razones expresadas anteriormente.

En términos regionales y a contar de la información otorgada por el cuadro 6, se verifica que los valores promedio de erosión neta, han aumentado en el año 2008 con respecto al año 2007, con valores para la Región que subieron desde 1,73 ton/ha hasta 2,06 ton/ha.

En términos provinciales se observa que Elqui presentó el mayor promedio de erosión neta durante el período 2007-2008, con un valor de 2,37 ton/ha, lo cual es muy lógico, porque es una zona en donde la vegetación ha sido diezmada por la ganadería caprina, que aún existe, y por tanto cualquier monto de lluvia, inclusive menor, afecta de manera más determinante a Elqui que a las demás provincias. En segundo lugar, se ubicó la provincia de Limarí con 2,18 ton/ha y finalmente Choapa con 1,14 ton/ha. Además, es importante mencionar que en las provin-

cias de Elqui y Limarí se ha observado un aumento de la erosión neta durante los años 2007 y 2008; sin embargo, en la provincia de Choapa, se ha observado una disminución entre los años considerados.

Con respecto a la cantidad de suelo movilizado en la región de Coquimbo, el año 2007 fue el que presentó el mayor valor promedio regional, correspondiente a 7,28 ton/ha. El año 2008 por su parte, presentó un promedio regional de 6,44 ton/ha.

La provincia con mayor cantidad de suelo movilizado durante el año 2007 fue Elqui (8,28 ton/ha), seguida por las provincias de Choapa y Limarí, las cuales fueron cercanas en sus valores promedio de suelo movilizado (7,06 y 6,51 ton/ha respectivamente). Sin embargo, durante el año 2008, la provincia con mayor cantidad de suelo movilizado fue Limarí, con un valor promedio de 7,59 ton/ha. Seguida por Elqui y Choapa con valores similares de 5,94 y 5,79 ton/ha respectivamente. Esta situación deja de manifiesto la variabilidad de los procesos erosivos en las zonas áridas y semiáridas del país.

Al considerar el período 2007-2008, se observa que Limarí tiene el mayor promedio de suelo movilizado, cuyo valor alcanza las 7,33 ton/ha. En segundo lugar se encontró la provincia de Elqui con un valor promedio de 7,11 ton/ha y finalmente Choapa con un valor de 6,15 ton/ha. Al respecto debe señalarse que la explicación a las altas tasas de erosión en general de Elqui y Limarí, y esto con respecto a Choapa, estaría relacionado con la presencia de una vegetación casi inexistente, con una escasa presencia de raíces de todo tipo en el suelo, y en donde montos de lluvia bajos generan procesos erosivos de mayor magnitud que en las otras provincias.

En la figura 5, se presenta el gráfico con los resultados obtenidos para la región de Coquimbo y cada provincia en estudio, durante el período 2007-2008.

Una vez obtenidos los resultados, se estudió la relación entre las variables pluviométricas (MTpp, IT y I_{max}1h) y las variables del proceso erosivo (E, S, EN y SM), la cual fue analizada mediante la elaboración de gráficas de dispersión (período 2007-2008). Con esto se logró conocer la relación entre las variables consideradas. Dicho estudio podría dar luces que permitan llevar a cabo el desarrollo de modelos matemáticos para la estimación de los procesos erosivos. Es importante señalar que el resultado esperable al relacionar las variables pluviométricas con las variables del proceso erosivo, es que dicha relación sea positiva, lo cual quiere decir que a mayor valor de la variable pluviométrica, se espera un mayor valor del proceso erosivo, aunque también es esperable alcanzar relaciones inversas con respecto a la erosión neta, dado que es producto de una diferencia numérica, que en ocasiones puede ser negativa.

Del cuadro 7 se desprende que la provincia de Choapa presentó la mayor cantidad de relaciones positivas entre las variables consideradas, con 9 rela-

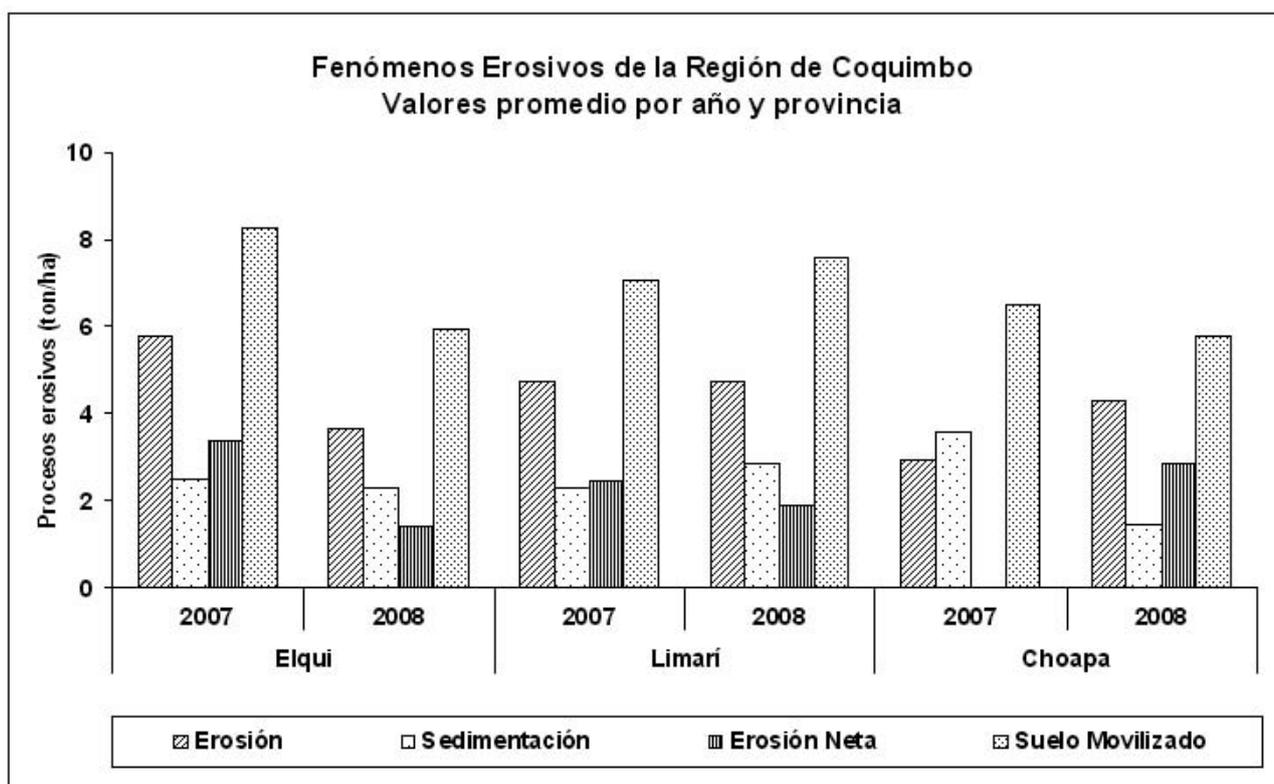


Figura 5. Fenómenos erosivos v/s variables pluviométricas por provincia y año.

ciones positivas de un total de 12 analizadas (75%); en segundo lugar se ubicó la provincia de Limarí con 7 relaciones positivas de un total de 12 (alrededor de un 58,3%). Elqui fue la provincia que presentó una menor cantidad de relaciones positivas (6 de 12), y éstas se encontraron principalmente entre las variables del proceso erosivo y las variables IT e I_{max}1h.

Este cuadro pretende relacionar las tres variables en análisis en términos de dar a conocer el comportamiento de la erosión, la sedimentación, la erosión neta y el suelo movilizado, como función de la cantidad total de lluvia, de la intensidad media de cada tormenta y de la intensidad máxima en una hora. Así, lo esperable es que estas relaciones sean to-

das positivas, a excepción hecha de la erosión neta, que por tratarse de una diferencia, pudiese presentar un comportamiento algo disímil. Del cuadro se desprende cuáles son las variables que presentan tendencias lineales positivas y esperadas respecto a los procesos estudiados y, permite descartar en primera instancia, la construcción de propuestas matemáticas en función de las variables que no se relacionaron en términos físicos con los procesos erosivos acá estudiados. Esto es particularmente importante en la Provincia de Elqui, especialmente con respecto a la sedimentación y el suelo movilizado. De ahí, se desprende la necesidad de contar con una mayor cantidad de datos que permitan esbozar de mejor forma el comportamiento de las variables y sus relaciones

Cuadro 7. Relación Gráfica entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo.

Provincia	Relación	MTpp	IT	I _{max} 1h
Elqui	E	+	+	+
	S	-	-	-
	En	+	+	+
	Sm	-	-	-
Limarí	E	-	-	+
	S	+	+	-
	En	-	-	+
	Sm	+	+	+
Choapa	E	+	+	+
	S	-	-	-
	En	+	+	+
	Sm	+	+	+

Donde E: Erosión, S: Sedimentación, En: Erosión neta y Sm: Suelo movilizado

entre sí. Ello, en primer lugar, porque las relaciones físicas que no son lógicas, pueden derivarse de una toma errada de datos, especialmente las realizadas en el primer periodo, las cuales demandan pasar por procesos de aprendizaje que incluyen mediciones largas y tediosas. En segundo lugar, porque al contar con una mayor información, existe una mayor posibilidad de que los comportamientos físicos de las variables hidrológicas consideradas sean conforme a lo esperado.

CONCLUSIONES

Se evidenció que los suelos de la Región de Coquimbo, son principalmente francos, con altos porcentajes de arcilla y arena, que varían en función de los sectores analizados. Por su parte, se determinó que los valores promedio de densidad aparente entre sectores y provincias son bastante similares.

- Respecto a la información pluviométrica entregada, en general se advirtió una amplia variabilidad para los valores de monto total de precipitación, intensidad por tormenta e intensidad máxima aproximada para 1 hora, donde resulta frecuente la presencia de valores extremos, algo característico de la zona estudiada.
- Los resultados para los procesos erosivos determinaron que para erosión, los mayores resultados promedio se encontraron en la Provincia de Limarí, seguido por la Provincia de Elqui y finalmente se ubicó la Provincia de Choapa, en donde se observó el menor valor de este proceso.
- Respecto a los resultados de sedimentación, se puede señalar en términos promedio, que este proceso también se manifestó con mayor agresividad en la Provincia de Limarí, seguido por los resultados de la Provincia de Choapa y por último, Elqui.
- Para erosión neta, se presentó un comportamiento decreciente de Norte a Sur. Así, los mayores resultados se encontraron en Elqui, seguido por Limarí y, por último, la Provincia de Choapa.
- En tanto, considerando el total de suelo que se movilizó en terreno, los resultados arrojaron que la mayor cantidad ocurrió en la Provincia de Limarí, en segundo lugar se ubicó Elqui y luego la Provincia de Choapa.
- Por otra parte, al analizar gráficamente los procesos erosivos en función de las variables pluviométricas, se encontraron tendencias lineales positivas y esperadas en la mayoría de las relaciones efectuadas. En otras, sin embargo, se evidenció la presencia de resultados que físicamente resultan poco lógicos, específicamente en la Provincia de Elqui.

- Finalmente, es posible señalar que el método de clavos de erosión resulta adecuado en la cuantificación y análisis de la erosión hídrica superficial, ya que introduce conceptos que permiten establecer un balance entre pérdidas y entradas de material, resultando así en estimaciones más reales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benedetti, S.; Pizarro, R. 2006. Restauración hidrológico forestal y oasisificación: herramientas claves para el aumento de productividad de los suelos degradados de la Región de Coquimbo. (en línea). Santiago, Chile. INFOR. Consultado 5 oct. 2007. Disponible en http://www.infor.cl/areas_investigacion/restauracion_ecosistemas/restauracion_hidrolog_forest_oasisificacion_2006.htm
- CORMA (Corporación Chilena de la Madera, Chile). 2005. Contribución significativa a la sustentabilidad del Proyecto Forestal País para contrarrestar la peor calamidad ambiental de Chile, la erosión de suelo. (en línea). Concepción. Consultado 12 abr. 2008. Disponible en <http://www.chilepaisforestal.cl/Profesores/pdf/Contribuci%F3n.doc>
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia) 1994. Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia. Consultado 3 abr. 2008. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S00.htm>
- De Regoyos, M. 2003. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo geowepp a dos pequeñas cuencas en Madrid. (en línea). Tesis Doctoral. España. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 466 p. Consultado 5 abr. 2008. Disponible en <http://oa.upm.es/450/01/02200329.pdf>
- Pidwirny, M. 2006. Erosion and deposition. In Fundamentals of physical geography. (en línea). Kelowna, Canadá. Consultado 20 oct. 2007. Disponible en <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>
- Pizarro, R.; Cuitiño, H. 2002. Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. In Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (2002, Madrid, España). Actas de la I Reunión del Grupo de trabajo de Hidrología Forestal. Madrid, España. p. 165-170.
- Pizarro, R.; Sangüesa, C.; Bravo, C.; Farías, C. 2003a. Manual de conservación de aguas y suelos. Instructivo N° 1 Zanjales de Infiltración. (en línea). Talca, Chile. Consultado 1 abr. 2008. Disponible en http://eias.atalca.cl/2publicaciones/3manuales/f_instructivo_zanja.pdf