

EVALUACIÓN ESPACIAL DE PROCESOS GEODINÁMICOS EN EL AMBIENTE MONTAÑOSO DE LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL, CHILE CENTRAL¹. IMPACTO GEODINÁMICO SOBRE EL POTENCIAL CORREDOR DE COMERCIO LAS LEÑAS, VI REGIÓN DEL LIBERTADOR GRAL. BERNARDO O'HIGGINS

Roberto Daniel Fernández Torres*
Carmen Paz Castro Correa**

Resumen

En el contexto de la posible habilitación de una ruta entre Chile y Argentina a través del paso fronterizo Las Leñas en Chile central, alternativo al Cristo Redentor, se procedió a analizar las vulnerabilidades y los impactos provocados por la geodinámica en áreas montañosas. Se evaluaron procesos erosivos en los ambientes de baja, media y alta montaña en el valle del río Cachapoal. La alta energía de estos paisajes es causante de la generación y el aporte de sedimentos mediante erosión, la que es activada por las precipitaciones intensas y la acción periglacial. Las diferencias erosivas se entienden por la presencia de distintas formas del paisaje; así, los depósitos basales en alta montaña están asociados a movimientos del terreno en masa, y la erosión lineal se desarrolla sobre las terrazas fluviales ubicadas en fondo de valle, las que se encuentran estabilizadas por la mayor cobertura vegetal.

Palabras clave: Unidades de Respuesta a la Erosión (ERUs), Vulnerabilidad erosiva, Área de montaña.

Recepción: 30 de abril de 2008. Aceptación: 13 de agosto de 2008

* Geógrafo, Universidad de Chile.

** Geógrafo, Departamento de Geografía, Universidad de Chile.

SPATIAL EVALUATION OF GEODYNAMIC PROCESSES IN THE MOUNTAINOUS AREA OF THE BASIN OF THE CACHAPOAL RIVER, CENTRAL CHILE¹ GEODYNAMIC IMPACT ON THE POTENTIAL COMMERCE CORRIDOR IN LAS LEÑAS, REGION VI OF THE LIBERTADOR GRAL. BERNARDO O'HIGGINS

Abstract

The vulnerabilities and impacts of the geodynamics in mountainous areas have been analyzed within the context of the plausible opening of a route between Chile and Argentina through the Las Leñas border crossing in central Chile, alternative to the Cristo Redentor crossing. Erosive processes in low, mid and high mountain areas of the Cachapoal river valley were evaluated. These landscapes' high energy causes sediment production and input through erosion, which is activated by heavy rains and periglacial action. The erosion differences are understandable because there are different landscapes; thus, the basal deposits in the high mountain terrains are associated with mass land movement, and the lineal erosion is developed on the river terraces located in the valley bottom, which are stabilized by the greater vegetation coverage.

Key words: Erosión Response Units (ERUs), Erosión susceptibility, Mountain area.

Introducción

La consolidación de la economía chilena en el escenario mundial de globalización implica hacer significativas inversiones en infraestructuras, que permitan estructurar una red de transporte capaz de acercar tecnologías y capitales a las áreas de producción, ofreciendo a su vez accesibilidad a mercados regionales, nacionales e internacionales. Así, la habilitación de rutas a través de la Cordillera de Los Andes representa el establecimiento de ejes para el desarrollo económico y la integración transfronteriza.

La ruta que une Chile con Argentina por el paso Cristo Redentor concentra el mayor flujo de bienes y personas entre ambos países, aunque sufre de

cierres temporales, principalmente en invierno. En este contexto, el corredor Las Leñas, ubicado en la VI Región, representa una alternativa complementaria de conexión, con la finalidad de mantener una continua comunicación e intercambio comercial.

Sin embargo, la accesibilidad en áreas de montaña está condicionada por una serie de factores de tipo ambiental, que interactúan para generar procesos geodinámicos propios de estos paisajes, ante lo cual surge la necesidad de diagnosticar y evaluar los fenómenos morfogenéticos para poder identificar niveles de vulnerabilidad en torno a las infraestructuras de transporte, y permitir de esta manera una planificación estratégica de la nueva carretera. En este sentido, Börgel (2004) plantea que los estudios de impacto ambiental deben conocer la realidad estructural del territorio y su evolución morfoclimática, para otorgar una mayor vida útil a las obras civiles que intervienen sobre el paisaje, y asegurar así una óptima relación costo-beneficio y costo-eficiencia.

Para Sancho (en Peña; 1997), la combinación de elementos terrestres y las unidades geodinámicas del paisaje permiten representar una serie de cualidades significativas y útiles en la planificación. Según Castro *et al.* (2003), el análisis y mapeamiento de las formas con una alta dinámica actual, y su evaluación en términos del aporte de masas hacia el fondo de valle, permiten determinar la magnitud de estos fenómenos, para su valorización en los estudios de riesgos naturales. Blikra y Nemec (1998) afirman que la dinámica en los depósitos modernos se caracteriza por rápidos movimientos de detritos o nieve en ambientes con fuerte pendiente, como son los encontrados en la parte alta del corredor.

En este tipo de estudios es necesario diferenciar los procesos específicos de cada ambiente, para así diseñar respuestas adecuadas a ciertas problemáticas. La presente investigación se centró en el análisis erosivo del valle montañoso del río Cachapoal, donde está planificado el corredor de comercio de Las Leñas. Se determinaron unidades espaciales homogéneas, mediante el diagnóstico de las características físico-naturales y la geodinámica actual, lo que permitió establecer la vulnerabilidad a la erosión a nivel de sistemas de vertientes, formas fluviales y formas basales de contacto, considerándose a su vez, los diferentes pisos altitudinales.

Área de estudio

Específicamente, el área corresponde al valle de baja, media y un sector de alta montaña del río Cachapoal, en la cordillera de Los Andes de Chile central, VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. La zona es una

sección de tres kilómetros de ancho en torno a la ruta de comercio, ubicada entre el embalse El Sauzal y la confluencia del río Las Leñas, con una superficie total de 13.144 ha (Figura 1).

Las alturas fluctúan entre los 600 y los 1.500 metros sobre el nivel del mar (m. s. n. m.), de oeste a este, enmarcado por cumbres que sobrepasan los 3.000 m. s. n. m. En este sentido, Castro *et al.* (2003) determinaron el límite entre los pisos montañosos de esta área según criterios de altura, pendiente, vegetación, ambientes morfoestructural y tectónico. El límite superior de *baja montaña* se localiza en la confluencia del río Pangal con el Cachapoal, mientras la *media montaña* tiene su límite superior en la confluencia con el río de Los Cipreses.

El sistema general del valle cordillerano del río Cachapoal es resultado de procesos que poseen edades y génesis diferentes, como el solevantamiento y el plegamiento endógeno terciario, el modelado glacial y los procesos exógenos dinamizadores del sistema (Soto *et al.*; 2004). Este es un ambiente templado, que se caracteriza por una estacionalidad marcadamente seca en verano y lluviosa en invierno, con un régimen hidrográfico de tipo pluvio – nival.

Se trata de un área sin uso actual, por lo cual se analizó un paisaje donde el sistema natural casi no ha sido intervenido por la acción antrópica. El único centro poblado a lo largo del corredor Las Leñas, de acuerdo al censo de población del año 2002, es la localidad de Coya, que tiene la categoría de pueblo con 2.932 habitantes.

Materiales y métodos

En este estudio se utilizó una adaptación de la metodología aplicada en Africa del sur por Märker *et al.* (2001), para el modelamiento de escenarios de vulnerabilidad erosiva en cuencas hídricas: se empleó el concepto de Unidades de Respuesta a la Erosión (*Erosión Response Units*, ERUs), las que fueron definidas como entidades territoriales homogéneas sujetas a diferentes condiciones geodinámicas, que son el resultado del análisis de las variables que se indican en la Figura 2.

El sistema físico-natural ha sido analizado desde un enfoque descriptivo, a partir de la interacción entre relieve, vegetación y atmósfera, entendido como un ecosistema que posee características capaces de controlar su comportamiento (Märker *et al.* 2001). Se entiende que el medio natural es estimulado por la entrada de energía y de materia, factores de erosividad, ante lo cual

éste responde de una manera específica en función de la erodabilidad que presenta el terreno.

Respecto a la precipitación, Fournier (en Morgan; 1997) hace referencia a la capacidad que esta tiene para desencadenar procesos de erosión en función de su agresividad, lo cual se expresa en el Índice de Erosividad correspondiente a la relación p^2/P , donde p^2 es la más elevada precipitación media mensual y P es la precipitación media anual. En la representación de este índice, se utilizó como base cartográfica el Mapa Santiago del Balance Hídrico de Chile (Peña y Vidal; 1987).

El análisis topográfico se dividió entre pendiente y exposición, determinadas a partir de cartas topográficas regulares IGM, escala 1:50.000, con un Modelo Digital de Elevación (DEM). Para el primer caso, se aplicaron los rangos según los umbrales geomorfológicos definidos por Araya y Börgel (1972), estableciendo una proyección dinámica de los procesos que ocurren en vertientes y ambientes de montaña. La exposición se clasificó según la disposición del relieve a la precipitación, de acuerdo a las isoyetas de precipitación media anual del Balance Hídrico de Chile (MOP – DGA, 1987); las laderas ubicadas a barlovento son las que poseen la mayor erodabilidad.

Las características litológicas fueron identificadas y analizadas, a partir de la cartografía elaborada por Charrier (1983) para el área de estudio. En este sentido, la erodabilidad potencial de estas unidades se basó en el criterio aplicado por Kuhni y Pfiffner (2001) en los Alpes suizos, usado para examinar el efecto del sollevamiento en la evolución de la red de drenaje. Por esta razón, fue posible aplicar esta clasificación en la cuenca alta del río Cachapoal, pues su evolución también responde a un levantamiento generalizado del continente.

El concepto de morfoedafología se centró en el estudio de las relaciones, como también en la correspondencia directa e indirecta, entre elementos geomorfológicos y del suelo, como plantean Butterworth *et al.* (2000) y Espinosa (2005). Así, la integración de estas variables permitió evaluar el paisaje, en función de los procesos erosivos, utilizando los antecedentes entregados por la Carta Geomorfológica de Chavez (2005) y el Estudio Agrológico de la VI Región (CIREN – CORFO; 1996). Para la evaluación de la erodabilidad, se consideraron las características de los suelos y su asociación con el relieve y la cobertura vegetal.

Para el reconocimiento de la erosión actual, se empleó el concepto de Unidades de Referencia a la Erosión (*Erosión Reference Units*, ERefUs), que son entidades espaciales determinadas según aquella clasificación que rela-

ciona la densidad vegetal y la geodinámica, citada por Märker *et al.* (2001), y reconocidas a través del Índice Normalizado de Diferencias Vegetales (*Normal Difference Vegetal Index*, NDVI), obtenido del tratamiento de las bandas satelitales roja e infrarroja, pertenecientes a la imagen Landsat 7 ETM, en el software Idrisi 32. En este sentido, fue relevante conocer el tipo de vegetación asociada a la cobertura; se utilizaron a modo de antecedente los pisos fitogeográficos de la cordillera de Los Andes de Chile definidos por Quintanilla (1983), los que fueron constatados con visitas a terreno.

Por último, la evaluación final se realizó a través de la formulación de un modelo estructurado, según la metodología multicriterio que pertenece al Proceso Analítico Jerárquico (*Analytical Hierarchy Process*, AHP) que, según Saaty y Kearns (1991), es un procedimiento sistemático que ordena racional y eficientemente los elementos de un estudio. Mediante este método, es posible ponderar las variables y las categorías, para así determinar la importancia relativa que cada una posee sobre el valor total del problema, a través de la comparación entre ellas. Finalmente, mediante superposición cartográfica, se determinaron las ERUs, que son empleadas en la identificación de la vulnerabilidad erosiva del paisaje estudiado.

Resultados

Relación entre Geodinámica y Medio Físico-Natural

En el valle montañoso del río Cachapoal las precipitaciones medias anuales van desde los 600 mm al noroeste, aumentando con la altura hasta los 1.600 mm en el sureste; julio es el más lluvioso del año, con el 23% de las precipitaciones anuales (Peña y Vidal; 1987).

De acuerdo a Garreau (en Chavez; 2005), a partir de las mediciones hechas por estaciones meteorológicas automáticas en el año 2002, los sectores de Rancagua, Coya y Las Leñas alcanzaron 800, 2100 y 3000 mm, respectivamente. Se observó que el aumento de la precipitación acumulada con la altura no es uniforme, pues entre los dos primeros puntos esta es de 430 mm/100 m, a diferencia del segundo tramo, donde es de 120 mm/100. Es evidente que la ubicación de Coya en los primeros contrafuertes de la cordillera produce un significativo aumento en la precipitación.

Por esta razón, la agresividad pluvial aumenta gradualmente en función del incremento de las precipitaciones y el efecto orográfico del relieve, con una orientación general NO – SE, donde los valores fluctúan entre 30 p²/P y 80 p²/P. Según la clasificación hecha por Morgan (1997), estas cifras varían

de una erosividad media a alta. En el primer rango, bajo los 50 p²/P, las precipitaciones anuales se distribuyen durante todo el año, localizadas en baja y media montaña del área en estudio. Por el contrario, la erosividad alta, sobre los 50 p²/P, es reflejo de un régimen pluviométrico de carácter estacional con una temporada húmeda acentuada, distribuida sobre el piso altitudinal alto.

Los relieves montañosos de Chile central están expuestos a la acción de los sistemas frontales provenientes del Océano Pacífico. En este sentido, las masas nubosas que penetran en la cuenca alta del río Cachapoal adquieren una dirección NO – SE debido a la configuración del valle, lo que provoca diferencias en el impacto sobre la superficie, ya que las vertientes ubicadas a barlovento, exposición noroeste, reciben directamente la agresividad pluvial, lo que favorece el desarrollo de procesos dinámicos, a diferencia de aquellas localizadas en sotavento, exposición sureste, en lo que se denomina sombra pluviométrica.

Gran parte del área estudiada posee un potencial erosivo alto asociado a pendientes fuertes (10° – 20°) y de escarpe moderado (20° – 30°), que están ubicadas en vertientes monoclinales y plegadas de baja y media montaña. Las laderas muy escarpadas (30°-45°) y acantiladas (sobre 45°) corresponden principalmente a vertientes estructurales de alta montaña, donde la muy elevada erodabilidad está ligada a movimientos en masa del terreno.

Según Charrier (1983), las rocas más antiguas en el área pertenecen a la Formación Coya – Machalí, que es una secuencia de carácter volcánico de lavas, piroclastitas y conglomerados con una erodabilidad moderada, localizada en el ambiente de baja montaña. Sin embargo, sobre estas rocas se disponen otros depósitos volcánicos, del Mioceno Superior, de coladas y piroclastitas que son moderadamente erosionables, pertenecientes a la Formación Farellones, en vertientes de tipo estructural de los pisos altitudinales medio y alto. Esta última unidad litológica fue intruida durante el Terciario por plutones de diorita y granodiorita, rocas compactas, en torno a la confluencia del río Cortaderal. En el fondo de valle del río Cachapoal se encuentran aquellos depósitos cuaternarios aluviales, glaciares y materiales no consolidados, con una vulnerabilidad alta frente a los agentes de erosión.

La relación que existe entre los diferentes depósitos y materiales con la geomorfología del lugar permitió identificar una serie de unidades morfoedafológicas para el área en estudio. Así, los terrenos rocosos se distribuyen en las vertientes estructurales y monoclinales que enmarcan al río Cachapoal, donde los materiales consolidados de poca permeabilidad poseen una baja susceptibilidad a ser erosionados por los agentes externos como la precipi-

tación. Las formas de contacto, abanicos coluviales y aluviales, poseen sedimentos de textura gruesa y erodabilidad moderada, localizadas en media y alta montaña. En fondo de valle, las terrazas fluviales inundadas, de manera frecuente o periódica, poseen textura gruesa y permeabilidad alta, con un potencial erosivo que es moderadamente alto; a diferencia de las terrazas fluviales pleistocénicas medias y altas con suelos franco arenosos y saturación moderada, que tienen una erodabilidad alta.

Sistema Geodinámico Actual

A partir de la relación que hay entre el sistema morfoedafológico y la densidad y el tipo de vegetación, se determinaron cuatro tipos o clases de geodinámica actual, definidas como Unidades de Referencia a la Erosión (ERefUs), para el área de estudio (Figura 3 y Tabla 1).

En términos generales, las terrazas fluviales ubicadas en el ambiente de baja montaña se encuentran estabilizadas por densos bosques esclerófilos constituidos por boldo, peumo y litre, lo cual se asocia a una geodinámica actual de baja o moderada intensidad, de erosión lineal generada por flujos hídricos. Paralelamente, en las vertientes de baja y media montaña la cobertura de matorral esclerófilo mantiene la situación de estabilidad, sosteniendo los suelos delgados a través de sus raíces. Por otro lado, en el ambiente de alta montaña predomina la geodinámica alta y muy alta, ya que las vertientes de influencia estructural aportan materiales por la caída de rocas, y forman depósitos inconsolidados y activos, correlativos a estas laderas (taludes), como también conos aluviales de lecho torrencial asociados a las quebradas, donde se producen coladas o flujo de detritos.

Análisis jerárquico

A partir de la comparación entre factores que interactúan en la generación de procesos erosivos en la cuenca alta del río Cachapoal, a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), se definió que la geodinámica actual posee el mayor nivel de importancia como antecedente para la evaluación de la erosión, seguida por la precipitación debido a su poder desencadenador, y por último las características propias del terreno como la topografía, la geología y el sistema morfoedafológico (Figura 4 y Tabla 2).

El valor de inconsistencia calculado fue de 0,01; por lo tanto, la estructura jerárquica y los pesos asignados poseen una lógica aceptable con respecto al objetivo planteado, pues no supera la cifra 0,1 establecida como límite por Saaty y Kearns (1991).

Determinación de ERUs y vulnerabilidad erosiva

A partir de la interacción entre las variables ya ponderadas se determinaron las entidades territoriales con características erosivas homogéneas (ERUs) para el valle montañoso del río Cachapoal. Los valores de estas unidades espaciales fluctúan entre 4.233 y 12.773, reclasificadas según las categorías aplicadas por Märker *et al.* (2001), para identificar la vulnerabilidad erosiva en torno a la ruta Las Leñas (Figura 5 y Tabla 3).

Respecto del análisis de la vulnerabilidad a la erosión, su configuración espacial se debe fundamentalmente a la elevada erosividad pluvial y geodinámica actual en la alta montaña, con respecto a los paisajes de baja y media montaña. Así, el ambiente de influencia estructural, que está asociado a la formación geológica Farellones, con vertientes rocosas de pendientes escarpadas a muy escarpadas, se producen los desprendimientos de materiales que han formado abanicos coluviales en el piso altitudinal alto (Figura 6), además del aporte de detritos a los lechos de carácter estacional de las quebradas de Retamal, Peralitos y El Tinajón, susceptibles de ser activados durante el invierno y los deshielos primaverales, que provocan movimientos en masa en forma de flujos. Por otra parte, las terrazas fluviales pleistocénicas entorno a las confluencias de los ríos Cortaderal y de Los Cipreses poseen una vulnerabilidad alta, por la presencia de cárcavas en suelos de textura areno francosa, debido a la baja estabilidad generada por la cobertura vegetal de matorral subandino.

Desde la confluencia del río de Los Cipreses, con dirección hacia el oeste, predominan los niveles de vulnerabilidad erosiva bajo y medio, asociados a la mayor estabilización que produce la biomasa sobre el paisaje, compuesta por matorral subandino y bosque esclerófilo. En el ambiente de baja montaña, con vertientes de estructura monoclinas que pertenecen a la Formación Coya – Machalí, la geodinámica actual responde a erosión lineal sobre laderas expuestas a sotavento, con pendientes de tipo moderada, y terrazas fluviales con suelos de textura superficial franco arenosa donde se producen deslizamientos en los escarpes de las terrazas (Figura 7). En media montaña, la condición de estabilidad se mantiene a pesar de que la erosividad pluvial

aumenta sobre las vertientes de tipo estructural de la Formación Farallones y los conos aluviales, que poseen una cobertura vegetal densa de matorral y estepa subandina.

Discusión

Del análisis se desprende la importancia que tiene la interacción entre los factores del medio natural sobre el modelado superficial, desde el punto de vista morfodinámico, y su relación con el ordenamiento espacial de los procesos y los niveles de vulnerabilidad erosiva en el paisaje montañoso del río Cachapoal, lo cual responde al principio de intercambio de energía y materia entre los elementos del medioambiente, considerado como un sistema que tiende al equilibrio, ya que existen diferencias morfoestructurales, topográficas, climáticas y litológicas.

En este sentido, como plantea Märker *et al.* (2001), la incorporación de conceptos como áreas homogéneas es relevante en el análisis de las dinámicas erosivas actuales y potenciales, capaces de integrar aspectos físico – naturales. Se reconoce el papel de estos fenómenos en diferentes escalas espaciales, entre flujos canalizados y formas de gran potencia.

Considerando las apreciaciones hechas por Araya (1985), fue posible observar que es efectivo que la degradación actual en alta montaña responde a procesos asociados a vertientes estructurales que aportan materiales desde las paredes rocosas, lo que genera formas basales donde se desarrollan procesos como desprendimientos, deslizamientos y flujos, lo que también fue planteado por Blikra y Nemec (1998). El modelado exógeno es causante de la geodinámica presente en baja y media montaña, lo que obedece a la estabilidad que provocan la densidad y el tipo de vegetación sobre las vertientes.

La vulnerabilidad erosiva y su distribución espacial en el valle del río Cachapoal, según los diferentes pisos altitudinales, puede ser correlacionada a ciertos patrones descritos para esta área por Castro *et al.* (2003), en el ordenamiento de las categorías de riesgo natural, en función de la condición estabilizadora que poseen la vegetación y la dinámica de las vertientes. Así, la elaboración de la carta de vulnerabilidad a la erosión debe ser utilizada como instrumento eficaz en la planificación del corredor Las Leñas en función de estos fenómenos, pues los sectores de mayor riesgo pueden generar dificultades para el buen funcionamiento de la ruta, lo que se traduciría en costos marginales elevados.

Conclusiones

La interacción entre los elementos del medio físico-natural en ambientes montañosos genera como resultado procesos de carácter morfogenético, en los cuales aquellos factores dinamizadores del sistema, como la erosión actual y la agresividad pluvial, determinan el patrón espacial de ordenamiento; las características topografías, la litología y el ambiente morfoedafológico son receptores activos en esta dinámica. Entonces la erosión no es sólo un hecho de carácter multivariado, pues tiene una dimensión territorial en virtud de la cual se debe entender como un sistema que provoca relaciones entre los elementos de interdependencia.

Existen diferencias entre los niveles altitudinales, reflejadas en el aumento sistemático de los niveles de vulnerabilidad erosiva desde baja a alta montaña, lo que se asocia a las formas del paisaje presentes en cada uno de los pisos. El ambiente de alta montaña, con vertientes estructurales y formas basales geodinámicamente activas, representa el área de mayor peligro en torno a la ruta de Las Leñas, en función de movimientos en masa de tipo estacional, asociados a una mayor detritificación. Por el contrario, la estabilización generada por la cobertura vegetal en baja y media montaña disminuye el impacto de los procesos de denudación y erosión sobre este camino.

La eventual habilitación de un corredor de comercio a través del valle montañoso del Río Cachapoal debe incluir una planificación integrada y sistémica del área, acorde a las características dinámicas de cada nivel altitudinal. Finalmente, como esta investigación se enfoca específicamente en la evaluación de procesos geodinámicos, la información generada puede ser integrada como insumo cartográfico para determinar puntos de mayor riesgo dinámico sobre el tramo montañoso de la ruta.

Bibliografía

- ARAYA-VERGARA José (1985) "Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del Mapocho". *Informaciones Geográficas*, nº 32, pp. 31-44.
- ARAYA-VERGARA José y BÖRGEL, Reinaldo (1972) *Definición de parámetros para establecer un banco nacional de riesgos y amenazas naturales, criterios para su diseño*. Santiago de Chile, Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI) – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). Universidad de Chile, 219 pp.

- BLIKRA, L. y NEMEC, W. (1998) "Postglacial colluvium in Wester Norway: Depositional processes, facies and paleoclimatic record". *Sedimentology*, nº 45, pp. 909-959.
- BÖRGE, Reinaldo (2004) "La estructura del relieve como patrón principal de los estudios de impacto ambiental". *Revista de Geografía Norte Grande*, nº 31, Santiago de Chile, pp. 115-122.
- BUTTERWORTH, R.; CUNNINGHAM, R.; GREENE, R.; HERRON, N. y WILSON, C. (2000). "Geomorphic controls on the physical and hydrologic properties of soils in valley floor". *Earth Surface Processes and Landforms*, nº 25, pp. 1161-1179.
- CASTRO, Carmen Paz; SOTO, María Victoria y CHAVEZ, Carolina (2003) "Aporte moderno de masa y su implicancia en la definición de niveles de riesgo natural". *Tiempo y Espacio*, nº 13, pp. 185-199.
- CIREN – CORFO (Centro de Información de Recursos Naturales – Corporación de Fomento de la Producción) (1996) *Estudio agrológico, descripciones de suelos, materiales y símbolos, VI Región*. Publicación 114. Santiago de Chile, 512 pp.
- CHARRIER, R. (1983) *Carta Geológica de Chile. Hoja El Teniente: Santiago*. Santiago de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minas. Inédito.
- CHAVEZ, Carolina (2005). *Amenazas naturales en media y baja montaña asociadas al corredor de comercio Las Leñas, VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins*. Santiago de Chile, Departamento de Geografía, Universidad de Chile, 104 pp.
- ESPINOSA, Luis Miguel (2005) "Morfoedafogénesis: un concepto renovado en el estudio del paisaje". *Ciencia Ergo Sum*, nº 2. Toluca, Universidad Autónoma del Estado de México, pp. 162-166.
- KÜHNI, A. y PFIFFNER, O. (2001) "The relief of the Swiss Alps and adjacent areas and its relation to lithology and structure: topographic analysis from a 250 – m DEM". *Geomorphology*, nº 41, pp. 285-307.
- MÄRKER, Michael; MORETTI, Sandro y RODOLFI, Giuliano (2001) "Assessment of water erosion processes and dynamics in semi – arid regions of Southern Africa (kwazulu / Natal, RSA, and Swaziland) using the Erosion Response Units concept (ERU)". *Geografía Física e Dinámica Cuaternaria*, nº 24, pp. 71-83.
- MORGAN, Roy (1997) *Erosión y conservación del suelo*. Madrid, Ediciones Mundi – Prensa, 343 pp.

- PEÑA, José Luis (1997) *Cartografía geomorfológica básica y aplicada*. Logroño, Geforma Ediciones, 227 pp.
- PEÑA, H. y VIDAL, F. (1987) *Balance Hídrico de Chile: Mapa Santiago escala 1:500.000*. Santiago de Chile. Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras.
- QUINTANILLA, Víctor (1983). *Biogeografía*. Santiago de Chile, Instituto Geográfico Militar, 230 pp.
- SAATY, Thomas y KEARNS, Kevin (1991) *Analytical planning, the organization of systems, the analytic hierarchy process*. Pittsburgh, RWS Publications, vol. IV. 208 pp.
- SOTO, María Victoria; CASTRO, Carmen Paz y CHAVEZ, Carolina (2004) "Caracterización geomorfológica del corredor de comercio Las Leñas: valle del río Cachapoal, Andes de Chile Central". *Revista de Geografía Norte Grande*, nº 31, Santiago de Chile, pp. 85-98.

Notas

¹ Proyecto DID TNAC 11/2001. Departamento de Geografía, Universidad de Chile.

Tablas

Tabla 1: ErefUs para el área de estudio

Clases ERefUs	Condición Geodinámica	Densidad Vegetal	Tipo de Vegetación
1	Baja	Sobre 75%	Bosque esclerófilo
2	Media	50% a 75%	Bosque esclerófilo o matorral subandino
3	Alta	25% a 50%	Matorral subandino o estepa andina
4	Muy alta	Bajo 25%	Estepa andina, gramíneas o plantas reptantes

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2: Pesos de las variables y las categorías según nivel de importancia

Variable	Categoría	Peso%
Precipitación (Agresividad Pp.)	Erosividad media	27,204 9,068
	Erosividad alta	18,136
Topografía Exposición	Erodabilidad baja	17,293 5,764 0,942
	Erodabilidad media	1,712
	Erodabilidad alta	3,110
Pendiente		11,528
	Erodabilidad baja	1,100
	Erodabilidad media	1,846
	Erodabilidad alta	3,195
Geología	Erodabilidad muy alta	5,387
	Erodabilidad baja	9,688 1,136
	Erodabilidad media	2,600
	Erodabilidad alta	5,952
Morfoedafología	Erodabilidad baja	9,688 0,894
	Erodabilidad media baja	1,268
	Erodabilidad media alta	2,862
	Erodabilidad alta	4,664
ERefUs	Erodabilidad baja	36,129 3,448
	Erodabilidad media	5,784
	Erodabilidad alta	10,014
	Erodabilidad muy alta	16,883

Fuente: Elaboración propia

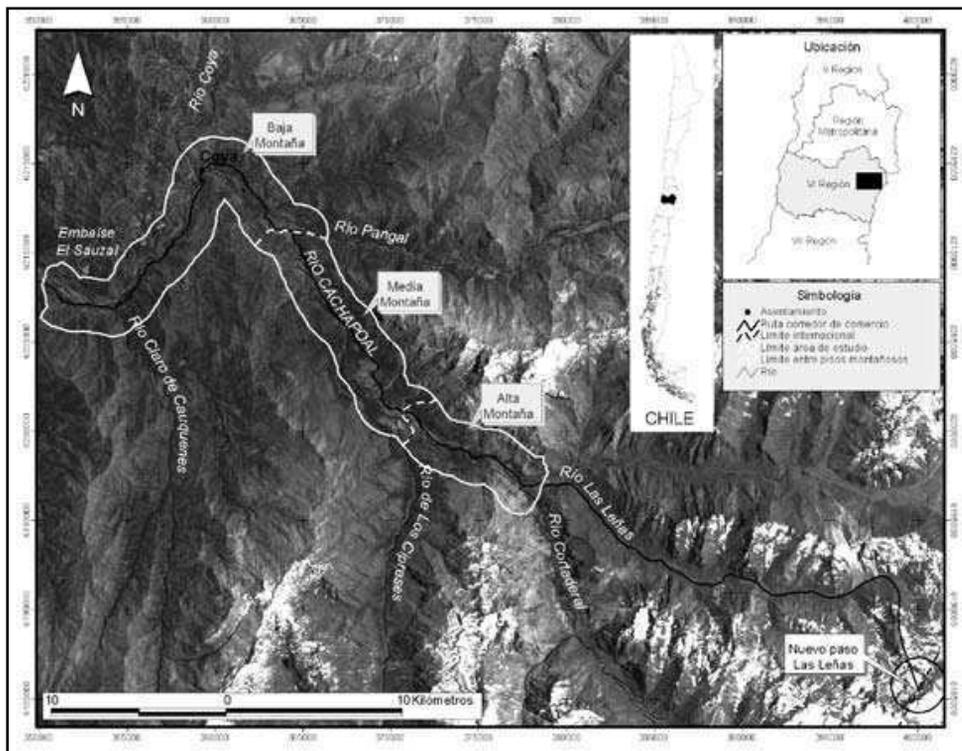
Tabla 3: Reclasificación de ERUs para determinar vulnerabilidad erosiva

Rango de combinaciones ERUs	Cantidad de ERUs reclasificadas	Criterio de reclasificación	Vulnerabilidad erosiva
4.233 – 5.898	13.773	Bajo – 1 desviación estándar	Baja
5.932 – 8.083	16.537	Entre la media y – 1 desviación estándar	Moderada
8.100 – 10.131	9.170	Entre la media y 1 desviación estándar	Alta
10.256 – 12.773	1.756	Sobre 1 desviaciones estándar	Muy alta

Fuente: Elaboración propia

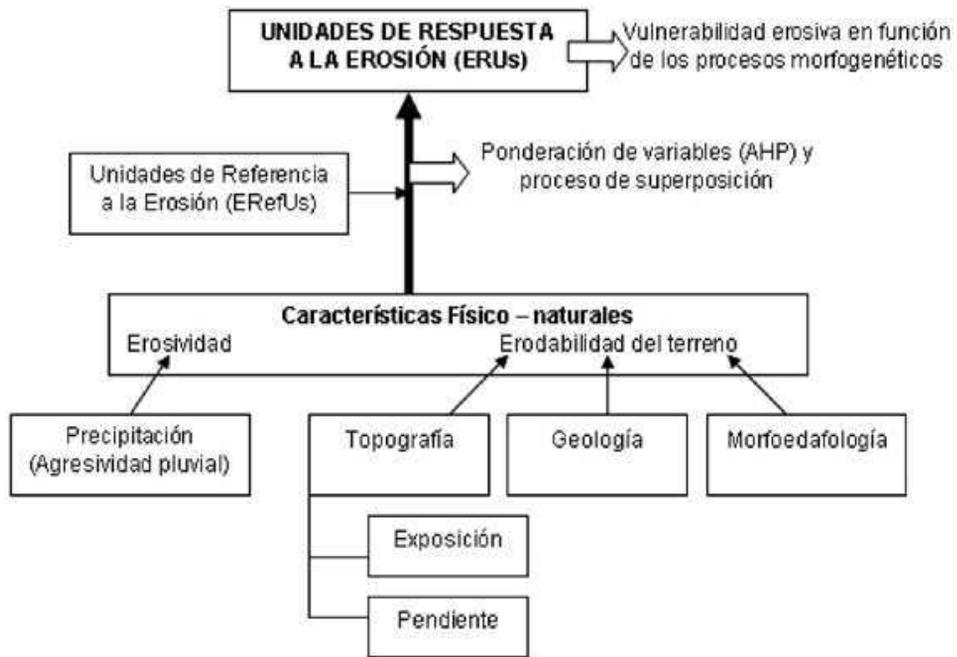
Figuras

Figura 1: Localización área de estudio. Valle montañoso del río Cachapoal, Chile central



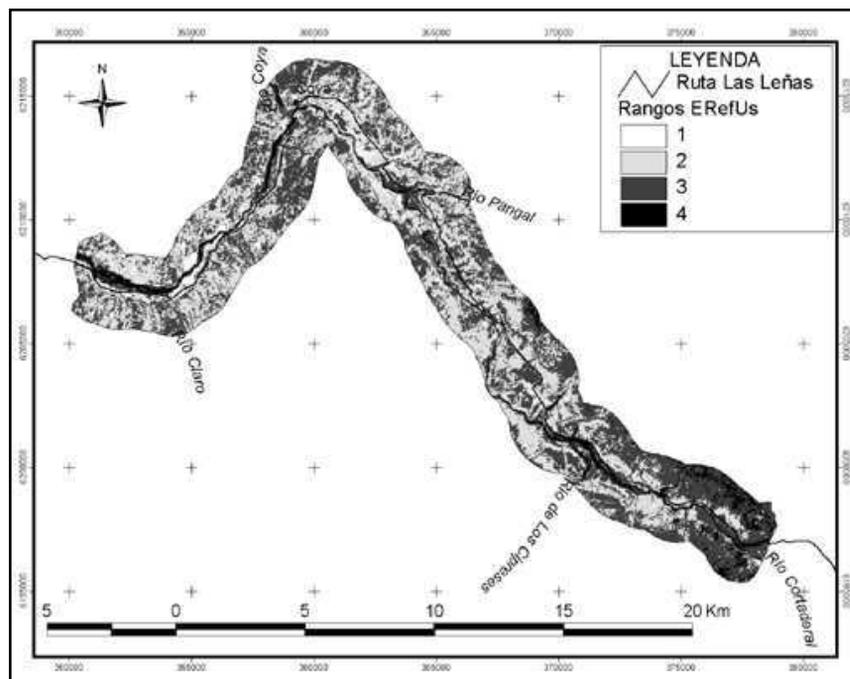
Fuente: Imagen satelital LANDSAT-ETM, año 2001

Figura 2: Concepto de ERUs para el caso en estudio



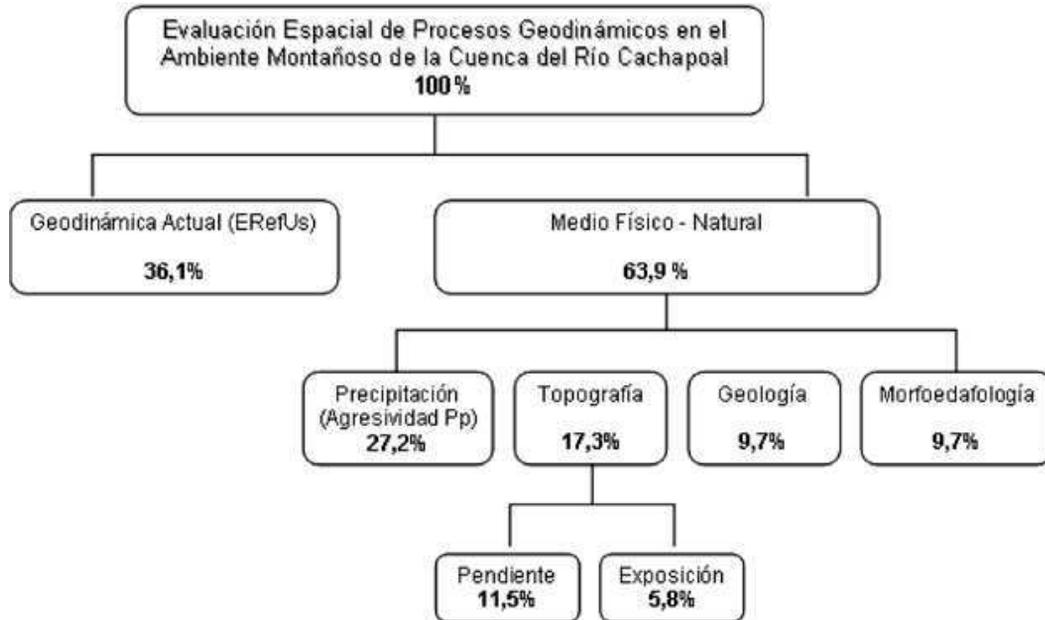
Fuente: Adaptación de metodología elaborada por Mürker *et al.*; 2001

Figura 3: ErefUs para el valle montañoso del río Cachapoal, Chile central



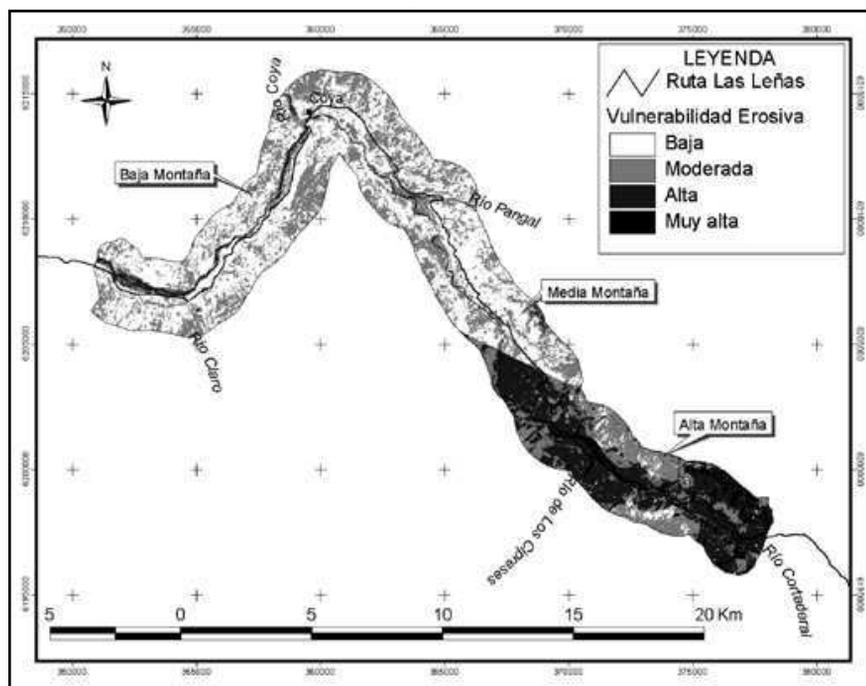
Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Estructura jerárquica según importancia para la problemática



Fuente: Elaboración propia a través del Proceso Analítico Jerárquico (AHP)

Figura 5: Vulnerabilidad erosiva para el valle montañoso del río Cachapoal, Chile central



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Abanicos coluviales en la sección de alta montaña del valle del río Cachapoal



Fuente: Geógrafa Carolina Chávez (2005)

Figura 7: Terraza fluvial escarpada por el lecho del río Cachapoal



Fuente: Geógrafa Carolina Chávez (2005)