

Indicadores geomorfológicos de la fragilidad de paleodunas*

CONSUELO CASTRO AVARIA**, MAURICIO CALDERÓN SÁNCHEZ***,
ÁLVARO ZÚÑIGA DONOSO**

RESUMEN

El efecto combinado de la fragilidad de las dunas antiguas, por sus condiciones naturales y de los usos del suelo, produce la desestabilización de las mismas y el desencadenamiento de procesos geomorfológicos que llevan a su rápida transformación y degradación.

Se precisan las condiciones de ocurrencia y los mecanismos de dichos procesos morfodinámicos que son los indicadores geomorfológicos de la fragilidad de las paleodunas del litoral de Chile central. Dichos indicadores de fragilidad son: regueras y cárcavas (por incisión lineal de las lluvias) y movimientos en masa que afectan a los sedimentos de las dunas antiguas estabilizadas. La determinación de la fragilidad de estos ambientes naturales, a través de los indicadores geomorfológicos, es de gran utilidad para la definición de unidades ambientales de diagnóstico territorial con fines de evaluación y para la planificación física del borde costero.

Palabras claves: Geomorfología litoral, paleodunas, indicadores geomorfológicos, erosión, fragilidad ambiental.

ABSTRACT

The combined effect of the fragility of old coastal dunes due to its natural conditions and the human activities on dunes, produce their destabilization and the beginning of geomorphological processes that lead them to a rapid transformation and landscape degradation.

The occurrence and the mechanism of these morphodynamic processes are precised in this paper. In essence, they are geomorphological indicators of the fragility of paleodunes of the littoral of central Chile. These indicators of fragility are rills and gullies (due to vertical erosion due to the rain) and mass movement that affect the stability slopes of the old fixed dunes. The determination of the fragility of these natural environments, done through the geomorphological indicators, is of great utility in the definition of environmental units of territorial diagnosis for land evaluation purposes and for the physical planning of the coastal zone.

Key words: Coastal geomorphology, geomorphological indicators, ancient dune, erosion.

INTRODUCCIÓN

En el litoral entre Longotoma y San Antonio, la combinación de la fragilidad del medio natural y la vulnerabilidad de los usos humanos se manifiesta en la desestabilización de las dunas antiguas (paleodunas) que cubren las planicies litorales y que son un componente importante del paisaje costero.

Se presentan los resultados del estudio de la degradación de las paleodunas localizadas en la costa entre Papudo y Zapallar y al interior de la Bahía de Quintero. Esta investigación se llevó a cabo con el objeto de definir las condiciones de

ocurrencia de movimientos en masa y de erosión pluvial en dunas estabilizadas, considerando estos procesos como indicadores geomorfológicos de utilidad para evaluar la fragilidad de las paleodunas.

Los indicadores geomorfológicos de erosión son las manifestaciones que deja la erosión cuando se está produciendo o ya se ha producido. El proceso desencadenado y la forma producida sirven de indicador ambiental y de elemento de comparación con los sitios no alterados y dan, en una magnitud aproximada, el daño que se ha originado al medio natural.

La presencia de regueras y cárcavas es un indicador de la degradación del suelo por efecto de la erosión de la lluvia y se manifiesta con claridad en aquellos terrenos que poseen una pendiente superior a 6°. El volumen del material perdido en

* Proyecto Fondecyt N° 1990586.

** Pontificia Universidad Católica.

*** Corporación Nacional Forestal.

una cárcava, medido en metros cúbicos, constituye una medida de la envergadura y estado de avance de los procesos de incisión, socavamiento y erosión lateral que se generan cuando el flujo de escorrentía sobre una ladera se concentra y canaliza generando formas de erosión (Calderón, M., 1999).

Por otra parte, los movimientos en masa del terreno, cuando se encuentra sometido a esfuerzos superiores a su resistencia al corte o cizallamiento, también son un indicador geomorfológico del grado de inestabilidad de las laderas. Se combinan muchos factores naturales y humanos para que se produzca este tipo de movimiento de los materiales, aunque los fundamentales son dos fuerzas: el esfuerzo cortante que tiende a producir el deslizamiento y la resistencia al corte que se opone a aquel. La estabilidad del terreno dependerá del equilibrio entre ambas fuerzas; si predomina la primera la pendiente es inestable (MOP, 1993).

La predicción de estos indicadores geomorfológicos ambientales en los estudios de diagnóstico del medio físico es de utilidad como antecedente para la elaboración de instrumentos de regulación del territorio, en las evaluaciones de impacto ambiental y en la orientación para la toma de decisiones en la gestión territorial.

I. ANTECEDENTES

El litoral entre Longotoma y San Antonio corresponde a una *costa abrasivo-acumulativa* con bahías lobuladas protegidas. En el borde costero alternan los acantilados rocosos con horst graníticos y playas arenosas asociadas a campos dunarios. A partir del litoral hacia el interior se reconoce una sucesión de planicies costeras escalonadas, con un ancho variable de algunos kilómetros (aproximadamente entre 3 a 20 km). La acción abrasiva del mar en el borde costero rocoso modela plataformas de abrasión (Papudo-Zapallar); actúa sobre acantilados vivos (Papudo, Maitencillo, Quintero, Algarrobo, El Quisco), y también ejerce erosión diferencial en las rocas fracturadas del basamento cristalino (Quintero, Punta de Tralca, Punta Tres Cruces) generando relieves ruñiformes y de escollos.

Sin embargo, los campos dunarios y las playas arenosas próximas a la desembocadura de los ríos o de los esteros costeros locales constituyen el rasgo característico y más atractivo del sistema costero. Entre los principales campos dunarios se reconocen: las dunas de Longotoma al norte del río La Ligua; las de Ritoque al norte del río

Aconcagua; las de Santo Domingo al norte del río Maipo. Dichas playas y dunas son el sustento del turismo balneario de Chile central.

De acuerdo a su dinámica y edad, se reconocen: las *dunas litorales vivas* que están sometidas a la dinámica eólica actual, poseen escasa vegetación y están directamente relacionadas con una playa que las abastece de arenas; las *dunas antiguas* que cubren las terrazas marinas interiores localizadas detrás de los campos de dunas vivas actuales, que poseen suelos evolucionados y están naturalmente estabilizadas por una cubierta vegetal fijadora.

A. Fragilidad natural de las dunas litorales y los usos humanos

Las dunas litorales por su localización en la interfase mar-tierra son medios muy frágiles con una dinámica natural particular; asimismo, constituyen hábitat originales, altamente específicos para flora y fauna. Algunos tipos dunarios como, por ejemplo, las dunas borderas asociadas a una playa, son muy inestables y sólo pueden sustentar algunas actividades humanas controladas que no afectan su dinámica. Las dunas antiguas o paleodunas (estabilizadas por la vegetación) son capaces de soportar usos humanos con algunas restricciones que las protejan de la removilización; ciertas dunas antiguas que se encuentran colgadas sobre acantilados y que ya no se vinculan con una playa son también muy frágiles, como ocurre con las dunas de Punta Concón. Las actividades humanas más dañinas practicadas en dunas son aquellas que provocan su nivelación; activan la erosión y su removilización; o bien las que interrumpen el intercambio sedimentario entre la playa y su duna bordera asociada (Castro, C., 1984).

En cuanto a las dunas localizadas próximas a centros urbanos y/o industriales, ellas sufren amenazas serias de desnaturalización y son las más vulnerables en el presente. Actualmente en Chile el mayor riesgo de degradación de los medios dunarios se debe principalmente a causas antrópicas más que a causas naturales (Castro, C., 1984).

B. El contexto morfogenético de las paleodunas

Las condiciones en que se formaron las dunas antiguas se encuentran relacionadas con variaciones climáticas ocurridas durante el Cuaternario; las paleodunas de la costa chilena se generaron en períodos interglaciales anteriores al actual y

su edad de acuerdo a las observaciones de Fuenzalida, H. (1956) corresponde a los períodos Holocénico y Pleistocénico, lo que también fue establecido posteriormente en los estudios de C. Caviedes (1966) y R. Paskoff (1970). Se señala que en los períodos climáticos correspondientes a los Interglaciales ocurrieron condiciones de climas similares al actual, con una estación seca prolongada y con vientos predominantes y eficaces del SW que formaron las dunas. Estas dunas, una vez formadas, quedaron expuestas a las condiciones ambientales y comenzaron a sufrir procesos de pedogénesis y a ser gradualmente colonizadas por la vegetación que las estabilizó.

Las paleodunas chilenas pertenecen a varias generaciones, separadas unas de otras por paleosuelos interestratificados, como los descritos por Fuenzalida, H. (1956) y Paskoff, R. (1970) en el sector de Ventana. Estos paleosuelos se formaron en un período pluvial que permitió la generación de fenómenos de alteración y pedogénesis. Se reconocen depósitos similares de paleodunas con suelos interestratificados en Punta Concón, cuyos horizontes areno-arcillosos, de alrededor de 1 metro de espesor en promedio, son una evidencia de que durante el Pleistoceno hubo varios episodios con actividad morfogenética del viento en que la arena depositada formó los campos dunarios que hoy se encuentran estabilizados.

Las paleodunas poseen en la actualidad el aspecto de superficies suavemente onduladas cuyas arenas no están cementadas y se encuentran alteradas por rubefacción; su clasificación granulométrica es buena y poseen la estratificación entrecruzada eólica característica. La falta de cementación de los sedimentos que componen las dunas posibilita su reactivación al perder la cubierta vegetal.

Si bien algunas actividades humanas como la deforestación y el cultivo de los suelos han activado o acelerado los procesos de formación de dunas en nuestro país, las evidencias señaladas por los autores mencionados demuestran que la mayor parte de las dunas existentes en el litoral de Chile son anteriores a la intervención antrópica y tienen causas naturales de formación.

C. Las condiciones del ambiente natural en las paleodunas de Chile central

Las dunas antiguas del litoral central de Chile subsisten bajo las condiciones de un clima templado cálido con lluvias invernales y gran nubosidad (Csb), con un promedio anual de lluvias de 330 mm. El máximo de las lluvias ocurre entre

los meses de julio y agosto, siendo el viento del SW el que predomina en el 85% de los meses del año.

La vegetación de las planicies litorales con paleodunas corresponde a la estepa costera subárida, caracterizada por especies como la malva o malvita del cerro (*Sphaeraecea obtusiana*), el romerillo (*Baccharis linearis*), el palqui (*Cestrum parqui*), la añaña (*Rhodophiala advena*), el cardo (*Argemone subfusiformis*), la correhuela rosada (*Convolvulus dissectus*) y Don Diego de la noche (*Oenothera stricta*). En las quebradas y esteros, el matorral mediterráneo costero se asocia al bosque esclerófilo, conformando una asociación de arbustos bajos entremezclados con abundantes hierbas anuales. En tramos de la costa, como en el sector de Zapallar-Cachagua, la vegetación natural ha sido reemplazada por especies exóticas forestales como *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*; actualmente es frecuente la replantación en taludes con *Carpobrotus chilensis*.

Las paleodunas constituyen formaciones superficiales que generan suelos de gran fragilidad por la naturaleza de sus propiedades físicas como es su textura arenosa y su estructura de grano simple y también por su consistencia suelta y profundidad efectiva. La textura del suelo en las paleodunas de Maitenes tiene 96% de arena y sólo 4% de limo, constituyendo una textura arenosa y liviana.

II. METODOLOGÍA

Para definir la *potencialidad a la ocurrencia de movimientos en masa* en paleodunas se establecieron los factores condicionantes de la estabilidad de las laderas (Tabla 1) y, considerando estos factores y sus elementos asociados, se elaboró una ficha de levantamiento de terreno en la cual se incluyó una ponderación relativa para cada tipo de factor, de acuerdo a la investigación llevada a cabo por Zúñiga, A. (2000; a partir de estas observaciones se evaluó el grado de estabilidad potencial de las laderas en paleodunas (Tabla 2).

Para la determinación de la *efectividad de la erosión pluvial en paleodunas* se realizaron mediciones en algunas cárcavas representativas con el objeto de estimar el volumen de los materiales sedimentarios posibles de ser removidos. Lo anterior consiste en medir algunos parámetros geométricos de las cárcavas, a partir de levantamientos altimétricos de secciones que definen el corte transversal de la misma; posteriormente, los datos se aplican en ecuaciones que reflejan la

correlación entre los parámetros geométricos de dicha cárcava, según el Método de la Suma Geométrica utilizado anteriormente en estudios de erosión de suelos en la isla Robinson Crusoe por Calderón, M. (1999).

Los parámetros geométricos más importantes de una cárcava son la Profundidad Máxima (PMX); el Ancho entre Riberas (ANC); el Área de la Sección Transversal (AST) y la Distancia

desde la Cabecera (DDC). Con estos parámetros geométricos se establecen los modelos matemáticos de las relaciones conformadas por PMX-DDC, ANC-DDC, AST-DDC, el Volumen Removido v/s la Distancia desde la Cabecera (VRE-DDC), la Masa de Suelo Removido v/s la Distancia desde la Cabecera (MSR-DDC) y la Masa de Suelo Acumulada v/s la Distancia desde la Cabecera (MSA-DDC).

TABLA 1

FACTORES Y ELEMENTOS CONDICIONANTES DE ESTABILIDAD DE LADERAS

<i>Factores condicionantes</i>	<i>Elementos asociados</i>
<i>Materiales</i>	Tipo de roca Grado de meteorización Grado de resistencia Espaciamiento de diaclasas Continuidad de diaclasas Apertura de diaclasas Estructura de las rocas Tamaño del bloque rocoso Tipo de suelo Consistencia Erosión Resistencia al corte Erosión al pie del talud Profundidad del perfil Material incoherente sobre coherente
<i>Morfometría del relieve</i>	Pendiente Perfil del terreno Quiebres de pendiente
<i>Evidencias geomorfológicas</i>	Nichos de despegue Depósitos de material Coluviones Cornisas de rocas Grietas o fracturas
<i>Vegetación</i>	Tipos de vegetación Cobertura
<i>Drenaje</i>	Densidad de drenes Agua permanente en quebradas Quebradas intermitentes Incisiones recientes Pendiente del dren
<i>Actividades antrópicas</i>	Excavaciones Cortes Depósitos de material (escombros) Embalses o tranques Canales Caminos, senderos Terraplén Estructuras (viviendas)

TABLA 2
LISTA DE CHEQUEO PARA DETERMINAR ESTABILIDAD DE LADERAS

Factores	Grados de estabilidad Potencial de laderas				
	Alta	1	Medio	Baja	Muy Baja
1. Materiales					
Tipo de suelo	Suelos cohesivos: arcillas	1,00	Compacto	Poco compacto	Suelos no cohesivos
Consistencia	Muy compacto	1,00			No coherente
Erosión	Ausente	1,00			Presente
Resistencia al corte	Muy alta: gravas, arenas	1,00	Alta: arena y limo	Media: limos, arcillas francas	Baja: limos orgánicos
Erosión al pie del talud	Ausente	1,00			Presente
Profundidad del perfil	Pequeño	1,00			Grande
Mat. incoherente sobre coherente	Ausente	1,00			Presente
2. Morfometría					
Pendiente	Poco inclinadas: < 5°	2,00	Moderadamente inclin.: 5 y 15°	Inclinadas: entre 15° y 25°	Muy inclinadas: > a 25°
Perfil del terreno	Laderas cóncavas	2,00	Laderas rectas	Laderas convexas o rectilíneas	Convexas
Quebres de pendiente	Ausentes	2,00			Presentes
3. Evidencias geomorfológicas					
Nichos de despegue	Ausentes	3,00			Presentes
Depósitos de material	Ausentes	3,00			Presentes
Coluviones	Ausentes	3,00			Presentes
Comisas de roca	Ausentes	3,00			Presentes
Grietas o fracturas	Ausentes	3,00			Presentes
4. Actividades antrópicas					
Cortes	Ausentes	4,00			Presentes
Depósitos de material	Ausentes	4,00			Presentes
Embalses o tranques	Ausentes	4,00			Presentes
Canales	Ausentes	4,00			Presentes
Caminos	Ausentes	4,00			Presentes
Senderos	Ausentes	4,00			Presentes
Terraplén	Ausentes	4,00			Presentes
Estructuras	Ausentes	4,00			Presentes
Datos materiales	Ausentes	4,00			Presentes
5. Vegetación					
Tipo	Pastizales	5,00	Matorral bajo	Matorral alto	Bosque exótico
Cobertura	Muy alta: entre 80 y 100%	5,00	Alta: entre 60 y 80%	Media: entre 40 y 60%	Muy baja: entre 20 y 40%
6. Hidrografía					
Densidad de drenes	Baja: 0-4,5 km/km ²	6,00	Media, 4-6-9 km/km ²	Alta: 9,1-13 km/km ²	Alta: >13,1 drenes km ²
Agua permanente	Ausentes	6,00			Presentes
Quebradas intermitentes	Ausentes	6,00			Presentes
Incisiones recientes	Ausentes	6,00			Presentes
Pendiente del dren	Suave	6,00	Moderada	Alta	Muy alta
		104			
	Estabilidad Alta: < 106,8		E. Media: 106,7-76,3	E. Baja: 76,2-45,8	E. Muy Baja: >45,7
					25,7

Los cálculos de estas relaciones se realizan aplicando la función de Volumen de Suelo Removido, mediante la Metodología del Área Terminal Promedio (Calderón, M. 1999), lo que se expresa en la relación:

$$V = L/2 * (A_i + A_{i+1})$$

donde:

- V = volumen de sedimentos removidos (m³).
- A_i, A_(i+1) = áreas terminales de 2 secciones transversales consecutivas (m²).
- L = distanciamiento entre dos secciones transversales consecutivas (m).

En la aplicación realizada en Los Maitenes se consideró un distanciamiento regular de L = 10 metros, de modo que se comienza por estacar una cárcava desde la cabecera hacia la boca, con el fin de identificar tramos de 10 metros de longitud cada uno. Luego, frente a cada estaca se efectúa un levantamiento altimétrico midiendo el perímetro de la sección. Con los datos obtenidos para cada sección se procede a estimar el Área de la Sección Transversal a partir de triangulaciones y aproximaciones geométricas del área comprometida. Finalmente, el volumen de sedimentos comprometidos en este tramo se calcula mediante la relación expresada en la fórmula antes señalada.

III. LOS INDICADORES GEOMORFOLÓGICOS DE LA FRAGILIDAD DE PALEODUNAS

En este trabajo se define la fragilidad del medio natural como el conjunto de condiciones que conducen a una aceleración del ritmo de erosión y a la degradación del ecosistema; la fragilidad se puede evaluar definiendo indicadores geomorfológicos de la degradación del medio con aplicación de las listas de chequeo o fichas de observación en terreno.

A. Caso de estudio del litoral Papudo-Maitencillo: Potencialidad a la ocurrencia de movimientos en masa en paleodunas

Las dunas antiguas en este sector se encuentran cubriendo una terraza marina cuyo cuerpo lo constituyen los sedimentos marinos de la formación Horcón. Dichas paleodunas están compuestas por arenas finas no consolidadas, enrojecidas por alteración química y con una fina estratificación eólica entrecruzada. Su topografía es suave-

mente ondulada, encontrándose limitadas hacia el este por la vertiente occidental de la Cordillera de la Costa y hacia el oeste por el océano a través de un acantilado muerto con laderas de pendientes que superan los 15° de inclinación (Figura 1A y 1B).

La estabilidad de las laderas se encuentra definida por la forma como se conjuguen en terreno los factores y elementos condicionantes, como se ilustra en la Tabla 1.

Entre *las condiciones ambientales* que favorecen los movimientos en masa y los deslizamientos, **la lluvia** juega un rol determinante en las dunas antiguas estabilizadas. Se determinó que el umbral o valor crítico para la generación de movimientos en masa en las paleodunas del litoral central es de una intensidad de lluvias 37 mm en 24 horas, umbral que fue establecido por Monett, A. (1995) en Valparaíso y por Zúñiga, A. (2000) en Papudo-Maitencillo, que hizo observaciones similares. El período de retorno es de 1,4 año con un 60% de probabilidad de que lluvias con dicho umbral de intensidad puedan generar movimientos en masa en las paleodunas.

Respecto de las **pendientes** de las laderas, se constata que se requieren umbrales de valores bajos para el desencadenamiento de movimientos en masa; éstos comienzan a generarse a partir de 5° de pendiente en el litoral de Cachagua.

Los factores antrópicos que contribuyen al desencadenamiento de movimientos en masa en paleodunas son: la modificación de la geometría de las laderas, la pérdida de la cobertura vegetal y la consecuente concentración de la energía erosiva de la lluvia en algunos sectores de las laderas. En consecuencia, algunas obras de infraestructura, y en particular los caminos paralelos al litoral construidos en laderas con cubiertas de paleodunas, afectan la estabilidad de las mismas como se observa en la Figura 2.

Al relacionar la ocurrencia de los procesos morfodinámicos en paleodunas y los usos de suelo permitidos por el plano regulador (Tabla 3), se pueden advertir contradicciones con algunas de las categorías de usos de suelo. Por ejemplo, las laderas acantiladas situadas al oeste de la ruta costera, en donde los procesos morfodinámicos son muy efectivos (Figura 2), soportan una densidad de 4 viviendas por hectárea, con superficies de subdivisión de 2.500 m² de acuerdo al plano regulador; en cambio, al oriente de dicha ruta, sobre laderas suavemente inclinadas en donde los procesos son menos agresivos y peligrosos, la densidad asignada es de 2 viviendas por hectárea; lo anterior demuestra la necesidad de efectuar al-

FIGURA 1A
PALEODUNAS DE CACHAGUA

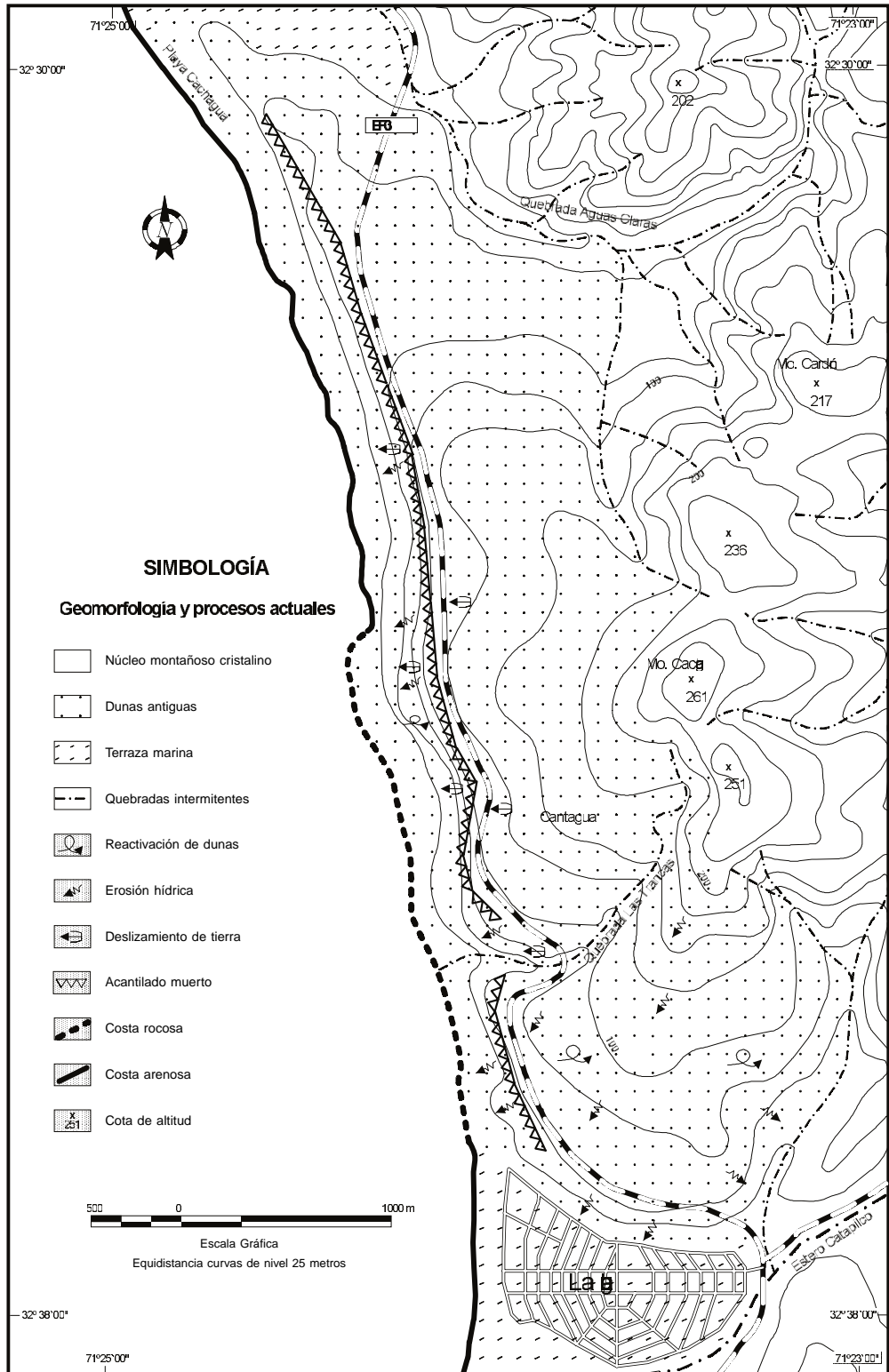


FIGURA 1B
PALEODUNAS DE CACHAGUA

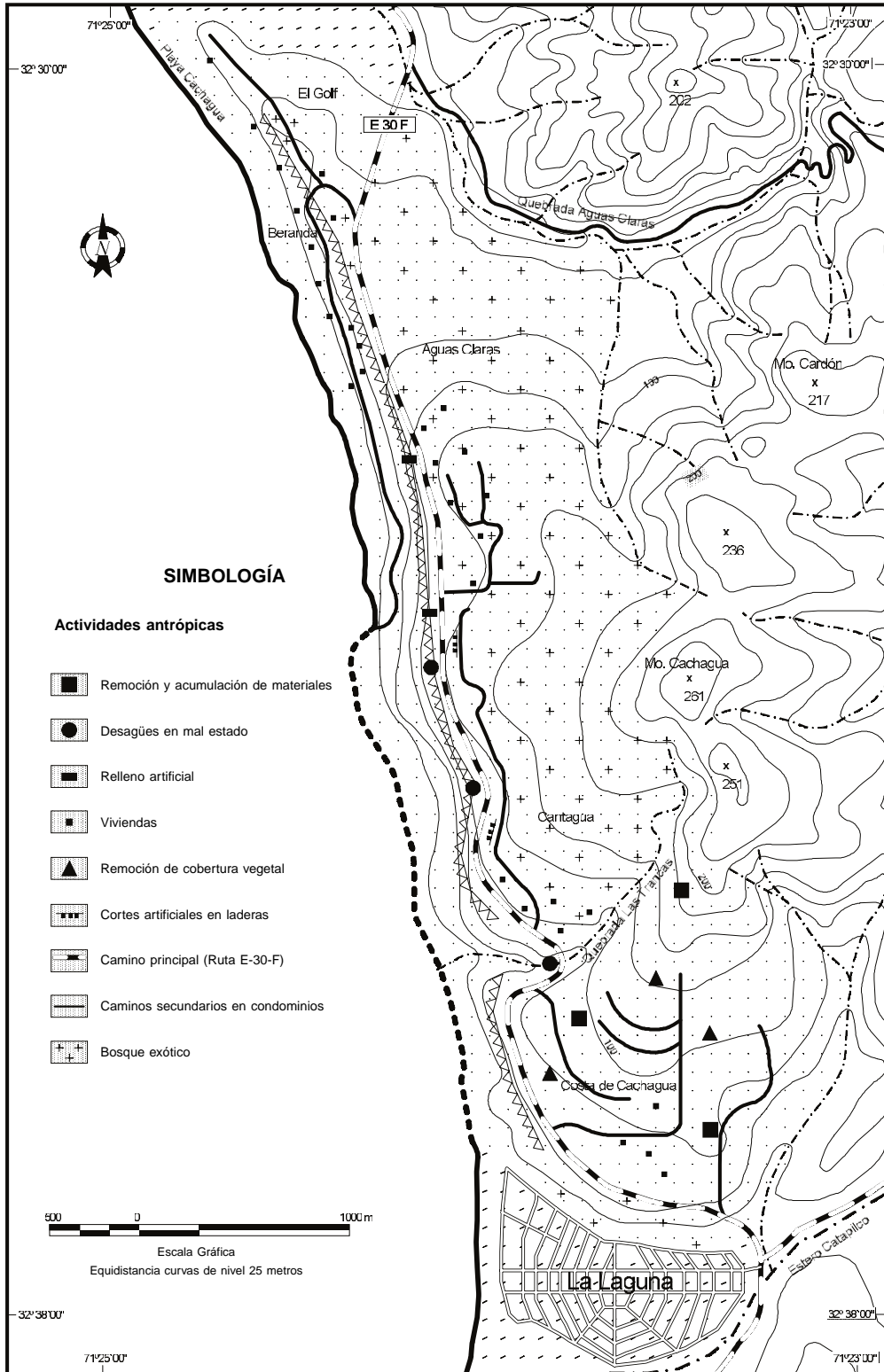
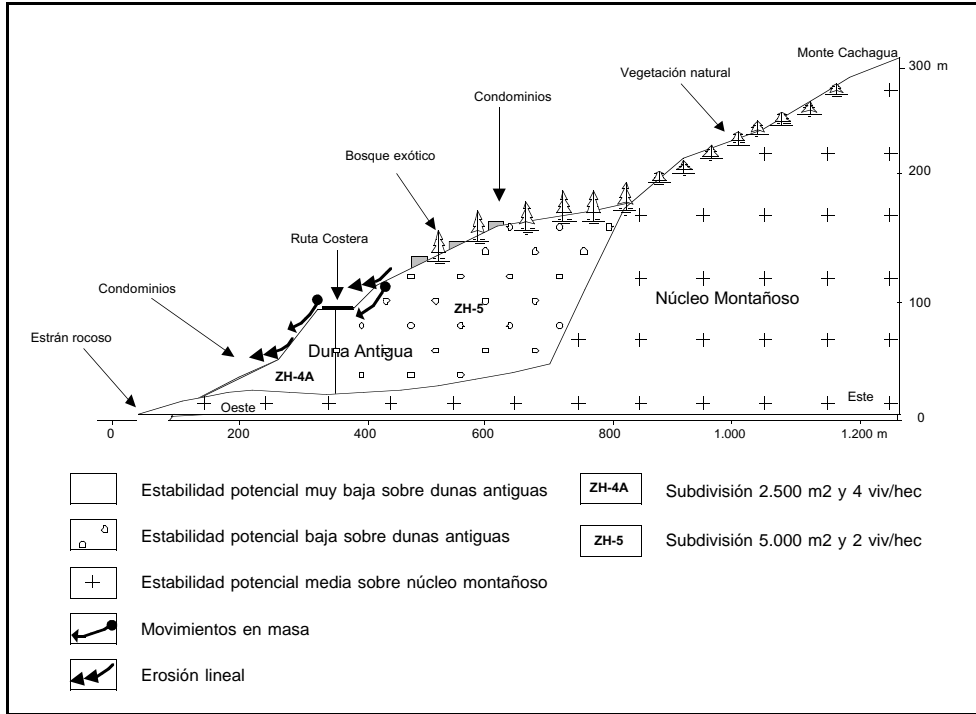


FIGURA 2

CACHAGUA: PALEODUNAS Y USO URBANO



gunos cambios en la regulación, considerando la evidencia de los indicadores de fragilidad geomorfológica, al menos en lo que se refiere a la densidad de viviendas permitidas sobre paleodunas.

En la determinación de la estabilidad potencial de laderas en paleodunas, según las observaciones de Zúñiga, A. (2000) entre Papudo y La Laguna, las laderas en paleodunas están en la categoría de baja estabilidad potencial debido a: sus materiales poco resistentes a los agentes de transporte como el agua o la gravedad; la topografía inclinada y suavemente inclinada que favorece la movilización de los sedimentos arenosos por gravedad; la existencia de estructuras artificiales que modifican la geometría de la ladera. La cubierta vegetal, a partir de un cierto porcentaje de cobertura, es el único factor favorable para la conservación de la estabilidad de la ladera en dichos ambientes.

B. Caso de estudio de Los Maitenes: Las condiciones de remoción de paleodunas por erosión de la lluvia

A partir de este análisis se comprueba que los procesos de erosión pluvial en paleodunas (Castro, C. y P. Vicuña, 1986) originan degradación irre-

versible del paisaje. En las dunas antiguas de Los Maitenes esto se manifiesta con la formación de cárcavas profundas desde las cuales es removido un gran volumen de sedimentos de las paleodunas que constituyen la formación superficial y del subsuelo limo/arenoso constituido por depósitos de origen marino de la formación Horcón.

En la Tabla 4 se registran los datos de las mediciones efectuadas en tres cárcavas representativas del área de Los Maitenes, según lo explicado en la metodología. En la última columna se registra la masa de sedimentos acumulados (MSA), lo que corresponde al volumen total del material perdido por una cárcava en la longitud indicada. Por ejemplo, en el registro correspondiente a la cárcava N° 1 de 180 metros de longitud, se mide una pérdida de 1.091 m³ equivalentes a 1.298 toneladas y a una tasa de pérdida de suelo de 7,2 ton/metro lineal. La cárcava N° 2 de 128 metros de longitud pierde 4.920 m³, equivalentes a 5.855 toneladas y a una tasa de pérdida de suelo de 45,7 ton/metro lineal. Por su parte, la cárcava N° 3 de 52 metros de longitud registra un volumen de pérdida de 159 m³, correspondientes a 189 toneladas y a una tasa de pérdida de suelo de 3,6 ton/metro lineal.

TABLA 3

PROCESOS MORFODINÁMICOS ASOCIADOS A USOS DEL SUELO.
BORDE COSTERO DE CACHAGUA

Localización	Actividades antrópicas	Efecto morfodinámico	Uso actual del suelo	Uso del suelo permitido	Umbral de pendiente	Tipo de vegetación asociada
<i>Subunidad acantilada</i>	Concentración de flujos de agua por efecto de ruta costera	Erosión lineal – movimientos en masa	Infraestructura (ruta costera)	ZH-4 A vivienda, equipamiento, áreas verdes	15°-30°	– Matorral esclerófilo – <i>Carpobrotus chilensis</i>
	Desagües en mal estado	– erosión lineal – movimientos en masa	Infraestructura (ruta costera)	ZH-4 A vivienda, equipamiento, áreas verdes	5°-15° 15°-25°	– Matorral – <i>Carpobrotus chilensis</i>
	Rellenos artificiales, terraplén (maicillo)	– erosión lineal – movimientos en masa	Infraestructura (ruta costera) – condominio	ZH-4 A vivienda, equipamiento, áreas verdes	5°-15° 15°-25°	– <i>Carpobrotus chilensis</i>
	Reforestación	– erosión laminar	Reforestación y viviendas	ZH-2 A vivienda, equipamiento, áreas verdes	15°-25°	– <i>Pinus radiata</i>
	Cortes artificiales en laderas	– movimientos en masa	Infraestructura (ruta costera)	ZH-4 A vivienda, equipamiento, áreas verdes	15°-30° >30°	– <i>Carpobrotus chilensis</i>
<i>Subunidad Aguas Claras-Cantagua Planicie litoral</i>	Reforestación	– erosión laminar	Condominio (Cantagua, Aguas Claras)	ZH-2 A vivienda, equipamiento, áreas verdes	<5° 5°-15°	– <i>Pinus radiata</i> – <i>Eucalyptus globulus</i>
<i>Subunidad Costa de Cachagua Planicie litoral</i>	Construcción de caminos	– Erosión lineal – reactivación dunaria	Condominio en construcción (costa de Cachagua)	ZH-6 vivienda, equipamiento, áreas verdes	5°-15°	Matorral esclerófilo
	Remoción de vegetación	– erosión lineal – erosión laminar – Reactivación dunaria	Condominio en construcción (costa de Cachagua)	ZH-6 vivienda, equipamiento, áreas verdes	5°-15°	Matorral esclerófilo
	Remoción y acumulación de materiales	– Erosión lineal – Erosión laminar – Reactivación dunaria	Condominio en construcción (costa de Cachagua)	ZH-6 vivienda, equipamiento, áreas verdes	<5° 5°-15°	Matorral esclerófilo

TABLA 4

LOS MAITENES: PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE CÁRCAVAS;
VOLUMEN Y MASA DE MATERIALES REMOVIDOS*Cárcava N° 1*

<i>Cárcava N° 1</i>	<i>DDC</i>	<i>ANC</i>	<i>PMX</i>	<i>AST</i>	<i>VRE</i>	<i>VRA</i>	<i>MSR</i>	<i>MSA</i>
	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(Ton)	(Ton)
1	0	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	10	0,58	0,68	0,26	1,29	1,29	1,54	1,54
1	20	2,04	2,06	3,65	19,52	20,81	23,23	24,76
1	30	4,54	2,40	7,22	54,31	75,12	64,63	89,39
1	40	3,08	1,35	4,16	56,87	131,99	67,68	157,07
1	50	0,56	0,75	0,39	22,72	154,71	27,04	184,11
1	60	0,47	0,82	0,30	3,43	158,14	4,08	188,18
1	70	0,32	0,22	0,06	1,78	159,91	2,11	190,30
1	80	0,64	0,33	0,16	1,06	160,97	1,26	191,55
1	90	1,17	0,71	0,34	2,48	163,44	2,95	194,50
1	100	0,76	0,42	0,16	2,51	165,96	2,99	197,49
1	110	3,60	4,70	10,81	54,87	220,83	65,29	262,78
1	120	4,64	3,78	14,54	126,75	347,57	150,83	413,61
1	130	5,42	3,54	18,28	164,11	511,68	195,29	608,90
1	140	4,95	3,53	15,16	167,21	678,89	198,98	807,88
1	150	2,36	3,15	8,75	119,54	798,43	142,25	950,13
1	160	5,95	2,98	13,75	112,51	910,94	133,89	1.084,02
1	170	3,83	2,52	8,86	113,05	1.023,99	134,52	1.218,54
1	180	2,23	3,25	4,63	67,44	1.091,42	80,25	1.298,79

Cárcava N° 2:

<i>Cárcava N° 2</i>	<i>DDC</i>	<i>ANC</i>	<i>PMX</i>	<i>AST</i>	<i>VRE</i>	<i>VRA</i>	<i>MSR</i>	<i>MSA</i>
	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(Ton)	(Ton)
2	0	0,00	4,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	8	6,55	6,05	33,63	134,52	134,52	160,08	160,08
2	16	6,89	6,60	34,52	272,60	407,12	324,39	484,47
2	24	9,47	7,21	55,52	360,16	767,28	428,59	913,06
2	32	15,26	6,80	102,54	632,24	1.399,52	752,37	1.665,43
2	40	14,34	6,66	71,11	694,60	2.094,12	826,57	2.492,00
2	48	15,95	6,47	87,58	634,76	2.728,88	755,36	3.247,37
2	56	10,25	6,11	46,33	535,64	3.264,52	637,41	3.884,78
2	64	8,17	5,20	36,95	333,12	3.597,64	396,41	4.281,19
2	72	6,90	4,93	27,00	255,80	3.853,44	304,40	4.585,59
2	80	8,64	4,97	29,92	227,68	4.081,12	270,94	4.856,53
2	88	9,59	4,46	32,75	250,68	4.331,80	298,31	5.154,84
2	96	6,52	3,92	17,75	202,00	4.533,80	240,38	5.395,22
2	104	6,99	3,48	21,97	158,88	4.692,68	189,07	5.584,29
2	112	4,79	2,55	11,08	132,20	4.824,88	157,32	5.741,61
2	120	3,78	1,76	5,25	65,32	4.890,20	77,73	5.819,34
2	128	3,00	1,13	2,29	30,16	4.920,36	35,89	5.855,23

Cárcava N° 3:

<i>Cárcava N° 3</i>	<i>DDC</i>	<i>ANC</i>	<i>PMX</i>	<i>AST</i>	<i>VRE</i>	<i>VRA</i>	<i>MSR</i>	<i>MSA</i>
	(m)	(m)	(m)	(m ²)	(m ³)	(m ³)	(Ton)	(Ton)
3	0	0,00	1,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4	2,85	2,51	7,15	14,31	14,31	17,02	17,02
3	8	3,04	2,31	6,58	27,47	41,78	32,69	49,72
3	12	4,94	2,13	9,26	31,69	73,46	37,71	87,42
3	16	4,40	1,67	6,65	31,81	105,28	37,86	125,28
3	20	4,56	1,39	4,90	23,08	128,36	27,47	152,75
3	24	1,44	1,14	1,47	12,73	141,09	15,15	167,90
3	28	0,86	0,86	0,44	3,82	144,92	4,55	172,45
3	32	0,98	0,79	0,45	1,77	146,69	2,11	174,56
3	36	3,81	0,85	0,42	1,73	148,42	2,06	176,62
3	40	5,20	0,55	0,97	2,77	151,19	3,29	179,91
3	44	3,70	0,55	0,72	3,37	154,55	4,01	183,92
3	48	3,60	0,36	0,61	2,67	157,22	3,17	187,09
3	52	2,50	0,30	0,31	1,84	159,06	2,19	189,29

Esta metodología permite jerarquizar las cárcavas con el objeto de comparar, ordenar y asignar prioridades de rehabilitación de terrenos en función del nivel de actividad erosiva, la factibilidad de incorporación a sistemas productivos y la restauración del paisaje degradado. Por ejemplo, Lobos, C. (1986) señala que para los suelos graníticos del secano costero ubicados en la comuna de Paredones, VI Región, es posible definir 3 niveles de intensidad de la erosión pluvial en función del volumen de suelo removido por una cárcava; en la Tabla N° 5 se comparan estas cifras con los registros obtenidos por los autores en Los Maitenes. Para cada una de estas categorías es posible calcular el costo de una rehabilitación del terreno a partir del control de cárcavas.

TABLA 5

CLASIFICACIÓN DE CÁRCAVAS SEGÚN EL VOLUMEN DE SUELO REMOVIDO

Clasificación de la cárcava	Volumen de suelo removido		
	Paredones, VI Región (C. Lobos, 1986)	Los Maitenes, V Región (autores)	
	m ³	m ³	Cárcava N°
Pequeñas	< 720	159	3
Medianas	720 - 2.970	1.091	1
Grandes	> 2.970	4.920	2

El tipo de materiales es determinante en el tamaño que alcancen las cárcavas y en el tiempo que éstas tarden en formarse; al comparar las cárcavas de las paleodunas de Los Maitenes con aquellas que ocurren en los suelos graníticos del secano costero o en aquellos derivados de materiales volcánicos en la isla Robinson Crusoe, se observa que las cárcavas desarrolladas en paleodunas alcanzan rápidamente dimensiones considerables a través de la profundización de su cauce, el retroceso de la cabecera y la distancia de ancho entre riberas.

Las evidencias geomorfológicas y el levantamiento de terreno muestran que la profundidad de la cárcava aumenta desde la cabecera hacia la boca de la misma, por incisión lineal de la lluvia en materiales arenosos con escasa resistencia al corte o cizalla. Los sedimentos removidos se acumulan en el talweg, reduciendo la profundidad máxima de la sección del cauce de la cárcava, conjuntamente con el área de su sección transversal.

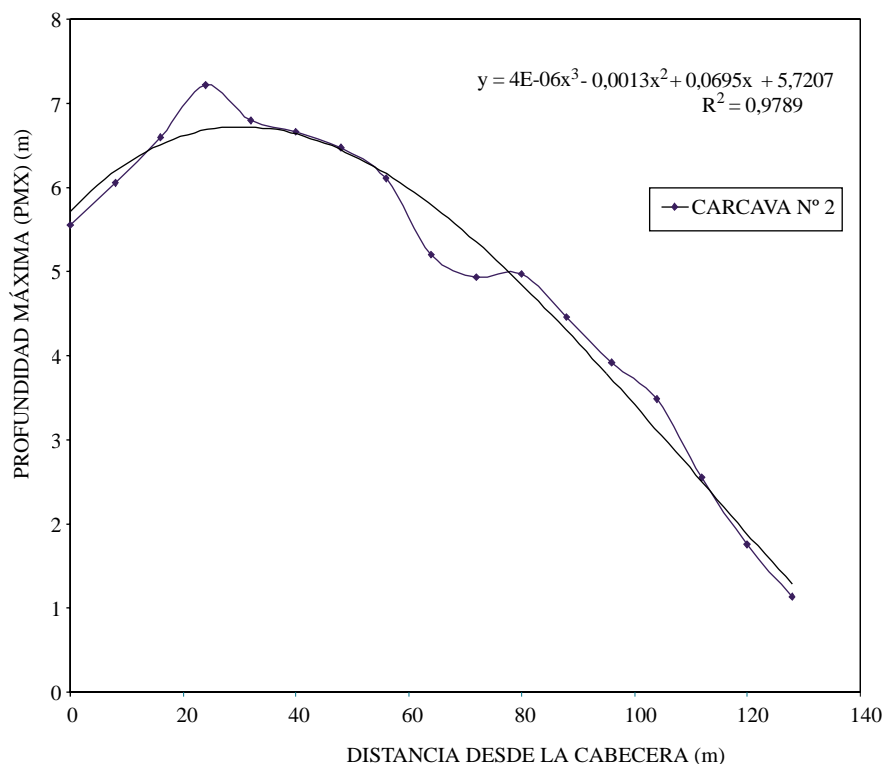
La Figura 3 identifica, a partir de una curva, la evolución de la Profundidad Máxima de las cárcavas en función de la Distancia desde la Cabecera, demostrando que en suelos dunarios se produce la profundización del talweg y la generación de una cascada considerable que en el caso estudiado alcanza a los 6 metros de profundidad; luego, la profundidad de la incisión disminuye progresivamente hacia la boca de la cárcava. El descenso en la profundidad máxima se debe a la sedimentación que se produce en el cauce por la redistribución de los sedimentos removidos.

Recomendaciones

- Se recomienda revisar los instrumentos de regulación de uso del suelo, Plan Intercomunal y Plan Regulador, con el objeto de hacer compatibles los usos propuestos con la fragilidad del sistema natural costero, considerando los estudios existentes de diagnóstico del medio natural.
- Los movimientos en masa en paleodunas están muy asociados a ciertas actividades antrópicas, en especial a los caminos construidos sobre dunas antiguas, los cuales interfieren el escurrimiento del agua; así, los usos del suelo son los principales responsables de la creación de condiciones propicias para la ocurrencia de movimientos en masa. La vulnerabilidad, determinada a través de los usos del suelo según el Plan Regulador, muestra que se debe replantear el uso en las laderas acantiladas de dunas antiguas, en particular en aquellas unidades de dunas sobre las que se han construido caminos. Lo anterior es particularmente relevante en estos momentos en que se proyecta una ruta costera en el litoral central para conectar los principales balnearios de la región. Dicho camino tiene un trazado de 24 kilómetros entre Cartagena y Mirasol, y estará localizado paralelo al camino litoral actual (ruta 66), pero a 2,5 kilómetros al interior del mismo, sobre terrenos que corresponden a planicies litorales, en su mayor parte cubiertas por depósitos de paleodunas.
- El manejo conservacionista de los suelos paleodunarios plantea dificultades debido a la alta fragilidad derivada de su textura arenosa y escasa resistencia. Entre las técnicas de control posibles de aplicar se encuentran todas aquellas tendientes a lograr un embancamiento o captura de los sedimentos como la construc-

FIGURA 3

EVOLUCIÓN DE LA PROFUNDIDAD MÁXIMA DE UNA CÁRCAVA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DESDE LA CABECERA EN EL SECTOR DE LOS MAITENES



ción de gaviones, el establecimiento de diques de control o diques de postes de madera, y la construcción de empalizadas que siguen las curvas de nivel de la ladera. Son inadecuadas todas aquellas técnicas que canalizan o infiltran el agua de escorrentía, como es el caso de los canales de desagüe y las zanjas de infiltración debido a la baja resistencia de los suelos arenosos. Si las últimas son aplicadas, se recomienda la construcción de canales revestidos y zanjas revegetadas.

- El uso de técnicas biológicas de control de erosión como la hidrosiembra, el hidromulch y la repoblación con especies nativas constituye la mejor estrategia para reducir la erosión de estos suelos. Algunas especies recomendables son el pasto bermuda (*Cynodon dactylon*), el chocho (*Lupinus arboreus*), Lupino Azul (*Lupinus angustifolia*), retamo (*Genista hispanica*) y diversas combinaciones de festucas (*Festuca arundinacea*), ballicas (*Lolium* spp), pasto ovillo (*Dactylis glomerata*) y falaris (*Phalaris* sp).

CONCLUSIONES

- La estabilidad potencial de las laderas en dunas antiguas es muy baja debido a las características intrínsecas de las mismas y también al hecho de estar sometidas a una fuerte presión por el desarrollo de proyectos inmobiliarios y condominios.
- Metodológicamente, la aplicación de fichas de observación y de un modelo cualitativo de evaluación para definir la potencialidad de laderas a movimientos en masa son adecuados para la explicación de estos fenómenos aleatorios y de difícil pronóstico. La clasificación en categorías de estabilidad potencial de laderas establece un diagnóstico de alerta para los organismos competentes en relación a los procesos de urbanización que en la actualidad ocurren en la franja costera.
- El método utilizado en la observación de laderas, considerando criterios de evaluación de su

fragilidad, es de gran utilidad porque permite la integración de variables para establecer diagnósticos globales que integran los factores y elementos condicionantes de la estabilidad. Este método es menos recomendable para estudios específicos de detalle, en los cuales sea necesario cuantificar con precisión las condiciones específicas de las laderas.

- En relación a las características de los suelos paleodunarios se comprueba que tienen una gran fragilidad natural por sus texturas arenosas y su consistencia suelta, lo que está asociado a un perfil homogéneo de gran profundidad efectiva.
- En las cárcavas resultantes de la erosión de la lluvia, en el área de Los Maitenes, se observa que el incremento de la profundidad máxima y ancho entre riberas asociado a la distancia desde la cabecera, genera un volumen muy alto de masa de suelo removido.
- La reducción natural de la especie nativa conocida como malva o malvita del cerro (*Sphaeraecea obtusiana*) incrementa la incidencia de la erosión pluvial y eólica ya que constituye una alta proporción de la vegetación nativa en algunas las paleodunas de Los Maitenes. Finalmente, se concluye que la evaluación de la fragilidad de las dunas antiguas a partir de indicadores geomorfológicos de su comportamiento ambiental constituye una herramienta de gran utilidad para la gestión y manejo de estos territorios, en particular y para la ordenación del borde costero como entidad geográfica única.

BIBLIOGRAFÍA

- CALDERÓN, M. 1999: Análisis alométrico de cárcavas: Antecedentes para la modelación y el diseño de estructuras de conservación. Tesis, magíster en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago. (Inédita).
- CASTRO, C. 1984-85: Reseña del estado actual del conocimiento de las dunas litorales en Chile. *Rev. Geogr. de Chile Terra Australis*, IGM, 28:13-32.
- CASTRO, C. y P. VICUÑA 1986: Man's impact on coastal dunes in central Chile (32°-34°S). *Rev. Thalassas*, Vol. 4 (1): 17-21. Vigo, España.
- CAVIEDES, C. 1966: Las terrazas del curso inferior del río Aconcagua. Actas Tercer Encuentro Nacional de Geografía. UC. Valpo. pp. 1-12.
- FUENZALIDA, H. 1956: Campos de dunas en la costa de Chile Central. XVIII. Congreso Intern. Río de Janeiro, pp. 234-240.
- LOBOS, C. 1986: Determinación del monto de subsidio para rehabilitar suelos degradados en la zona de Paredones, VI Región. Tesis. Facultad de Ciencias Forestales U. De Chile. (Inédita).
- PASKOFF, R. 1970: Recherches géomorphologiques dans le Chili semi aride. Biscaye, Bordeaux. Francia. (Tesis de Estado), p. 411.
- MONETT, ÁLVARO 1995: "Procesos ambientales en las comunas de Valparaíso y Viña del Mar, los movimientos en masa y su impacto en las áreas urbanas". Memoria Instituto de Geografía: Pontificia Universidad Católica de Chile (Inédita).
- MOP. 1993: Unidad Técnica de Medio Ambiente. Pauta y guías metodológicas para la evaluación ambiental de proyectos del Ministerio de Obras Públicas: Chile.
- ZÚÑIGA, A. 2000: Diagnóstico de las condiciones ambientales que condicionan la estabilidad de laderas y la ocurrencia de movimientos en masa. Caso de estudio: Franja costera de Zapallar, región de Valparaíso. Memoria: Instituto de Geografía, Pontificia Universidad Católica de Chile. (Inédita, esta memoria se efectuó en el marco del proyecto Fondecyt N° 1990586).