



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

Caracterización dinámica de las dunas activas en la Ensenada de Los Choros, IV Región de Coquimbo

Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo

Ivonne Dominique Rojas Ormeño

Profesora Guía: María Victoria Soto Bäuerle

Santiago – Chile
2016

A mi familia.

“Whether or not you find your own way, you’re bound to find some way. If you happen to find my way, please return it, as it was lost years ago. I imagine by now it’s quite rusty”

Norton Juster. *The Phantom Tollbooth*

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a mi Profesora Guía, María Victoria Soto, por haberme permitido participar de su proyecto Fondecyt (a pesar de que a este le quedara poco tiempo), y por la oportunidad de desarrollar un trabajo relacionado con temáticas costeras; así como sus observaciones y recomendaciones, paciencia, apoyo y brindarle apoyo a mi investigación.

A mi familia, por su apoyo incondicional y comprensión, quienes confían y me entregaron risas y palabras que me permitieron avanzar en esta etapa de mi educación universitaria. Gracias porque todos mis logros se los debo a mis padres sin quienes nada de lo que soy sería posible.

A mis queridas amigas por su compañía, apoyo que me han brindado en estos cinco años de carrera. Estoy muy feliz de tener tan buenas amigas dentro y fuera de la universidad, que me entregaron la fuerza para escribir hasta la bibliografía. A Javiera, muchas gracias por estar siempre ahí, escuchando, opinando. Gracias por ser mi roca durante este proceso.

A Misael, por su apoyo, buena onda y sobre todo por su disposición y amabilidad ante mis preguntas. A Vanessa Magallanes, por ser una maravillosa compañera de terreno, gracias. A Cecilia Aqueveque, gracias por ayudarme con las imágenes sin dudarlo.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	4
Índice de Figuras	6
Resumen	10
CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN	11
i. Introducción.....	11
ii. Planteamiento del Problema	12
iii. Área de estudio	13
a. Contexto específico de la ensenada Los Choros.....	13
b. Clima.....	15
c. Hidrografía.....	16
d. Geología.....	17
e. Características Geomorfológicas	19
Objetivo General.....	20
Objetivos específicos	20
Hipótesis de Trabajo	21
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ASUNTO	22
i. Los sistemas dunares	22
a. Origen de los sedimentos	24
ii. Dunas Costeras	25
a. Origen de los depósitos.....	25
iii. Tipos de dunas	26
CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	30
i. Materiales	30
ii. Metodología.....	30

CAPÍTULO IV: RESULTADOS	33
i. Tipos de formas dunares presentes en la ensenada Los Choros	33
a. Tipos de dunas	34
ii. Identificación de cambio de las condiciones generales en las formas dunares	55
a. Variación en las condiciones temporales y espaciales en años 1997 – 2002- 2014 dentro del área del estudio.	56
iii. Estados de cambio evolutivos de las formas dunares activas en la ensenada Los Choros.	61
a. Dunas transversales.....	71
b. Barjanes, barjanes coalescentes y barjanoides.....	74
c. Dunas anteriores	78
d. Dunas longitudinales.....	82
 CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	84
i. Ensenada Los Choros: zona de origen de procesos y formas de dunas.....	84
ii. Formas dunares en ensenada Los Choros.....	87
iii. Fases evolutivas de dunas en la ensenada Los Choros	89
 CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	91
 BIBLIOGRAFÍA	93

Índice de Figuras

Figura 1: Área de estudio, Ensenada Los Choros.	14
Figura 2: Esquicio geológico del área de estudio.....	18
Figura 3: Continuum dunar.	23
Figura 4: Distribución mundial de costas dunares.	26
Figura 5: Secuencia del continuum dunar desde las dunas anteriores hacia la duna transgresiva.....	29
Figura 6: Cuadro metodológico.	32
Figura 7: Dunas Activas año 2014, Campo proximal. Ensenada Choros.	35
Figura 8: Duna parabólica, campo proximal.....	36
Figura 9: Dunas Activas año 2014, Campo distal. Ensenada Choros.....	37
Figura 10: dunas antiguas, y cordones de playa (beach ridges).....	38
Figura 11: Dunas anteriores, zona proximal bahía.....	39
Figura 12: Dunas anteriores y playa, zona media ensenada.....	40
Figura 13: Dunas anteriores, zona distal ensenada.	41
Figura 14: desarrollo de dunas barjanas entre cordones de dunas paralelas, campo proximal.....	42
Figura 15: Cordones de dunas paralelas.....	43
Figura 16: Dunas transversales, campo proximal.	44
Figura 17: Eventos de coalescencia (indicado por flecha)..	45
Figura 18: Dunas barjanoides, campo proximal.	46
Figura 19: Coalescencia de formas pertenecientes a familias diferentes, campo distal.....	47
Figura 20: Realineamiento de dunas barjanoides producto de presencia de barreras topográficas, campo proximal. 4.	48

Figura 21: Dunas barjanas y barjanas coalescentes, frente de avance, campo proximal.	49
Figura 22: Ubicación dunas barjanas a sotavento de cordones barjanoides.	50
Figura 23: Dunas longitudinales, campo distal.	51
Figura 24: Vista general dunas longitudinales, campo distal.	52
Figura 25: dunas longitudinales, y cordón de precipitación campo distal	53
Figura 26: Duna "mayor" longitudinal.	54
Figura 27: Rosa de los vientos campo proximal. Área de estudio.	56
Figura 28: Rosa de los vientos, campo distal. Área de estudio	57
Figura 29: Dunas Activas año 1997, Campo distal. Ensenada Choros.	58
Figura 30: Dunas Activas año 1997, Campo proximal. Ensenada Choros.	60
Figura 31: Dunas Activas año 2002, Campo distal. Ensenada Choros.	62
Figura 32: Dunas Activas año 2002, Campo proximal. Ensenada Choros.	63
Figura 33: Frente avance campo proximal, año 2002.	64
Figura 34: Frente avance campo proximal, año 2014.	65
Figura 35: Zona sur campo distal, año 2002.	66
Figura 36: Zona sur campo distal, año 2014.	67
Figura 37: Perfil de elevación campo distal, año 2014.	68
Figura 38: Perfil de elevación campo proximal, año 2014.	68
Figura 39: Perfil de elevación campo distal, año 2002.	69
Figura 40: Perfil de elevación campo proximal, año 2002.	70
Figura 41: Transmudación de dunas transversales en dunas de menor tamaño. Imagen izquierda: 2002; Imagen derecha: 2014	71
Figura 42: Dunas transversales, campo proximal.	72

Figura 43: Transmudación de dunas transversales en dunas de menor tamaño, como también cambio a dunas longitudinales.....	73
Figura 44: Ripple marks, en duna barján. Campo distal.	74
Figura 45: Barjanes campo distal, 2014. Flechas rojas indican coalescencia, flechas azules indican futuros eventos de coalescencia.....	75
Figura 46: Barjanes y barjanes coalescentes en frente de avance. Campo proximal, año 2002.	76
Figura 47: Dunas anteriores, campo distal (Izquierda 2002; Derecha 2014).....	78
Figura 48: Playa y dunas anteriores, se evidencia duna anterior erosionada.	79
Figura 49: Beach cusps, zona distal ensenada. Año 2002.....	80
Figura 50: Evolución dunas longitudinales en campo distal. De izquierda a derecha 1997, 2002 y 2014.	82
Figura 51: Detalle duna anterior estabilizada erosionada, estacionalmente.....	86
Figura 52: Dunas antiguas longitudinales, campo proximal.....	88

Índice Anexos

Anexo 1: (a) Duna anterior. (b) Post playa	99
Anexo 2: Cordón dunas paralelas en duna transgresiva activa.....	100
Anexo 3: Vista panorámica dunas longitudinales, campo distal.....	100
Anexo 4: Zona del perfil año 2014, campo distal.....	101
Anexo 5: Zona del perfil año 2014, campo proximal	102
Anexo 6: Zona perfil año 2002, campo proximal	103
Anexo 7: Zona perfil año 2002, campo distal.....	104
Anexo 8: Campo distal, 1997. Dunas longitudinales.....	105
Anexo 9: Campo proximal, 1997. Dunas barjanoides	106
Anexo 10: Dunas anteriores y nebkas, zona proximal ensenada	107
Anexo 11: Paleodunas longitudinales	108
Anexo 12: Dunas parabólicas campo proximal	109

Resumen

Ubicado en la mega ensenada de Coquimbo, específicamente en la zona distal, se encuentra el campo dunar de Los Choros. Está conformado principalmente, por dunas antiguas. Presenta dos lenguas que actualmente están activas, las cuales se localizan en la parte proximal y distal de la bahía Los Choros, posee un ambiente de olas disipativo de alta energía, que permite se produzcan condiciones de erosión en la playa arenosa. Sin embargo, el desarrollo de dunas embrionarias, anteriores, barjanes y dunas alargadas son prueba de que la playa se encuentra en un constante abastecimiento. Asimismo, se asocia la evolución de dunas presentes en las lenguas con el concepto de *continuum* dunar, tanto para las dunas barjanes y anteriores, las que son evidencia de la dinámica de abastecimiento de arenas, en un ambiente semiárido.

Palabras claves: campo dunar, dunas activas, evolución, dinámica, Ensenada Los Choros.

Abstract

Located in the mega headland bay beach, specifically in the distal area, is the Los Choros sand field dunes. This is mainly composed of ancient dunes. In turn, it has two active lobes that are currently active and are located in the proximal and distal part of the cove. On the other hand, the cove has a dissipative high-energy wave environment, which allows erosion conditions occur on the sandy beach; however, the presence of embryonic dunes, foredunes, barchans and elongated dunes are proof that the beach is in a constant supply. Likewise, the evolution of dunes present in the lobes is associated with the concept of dune continuum for both barchans and foredunes, which are evidence of the current dynamics supply of sand in a semiarid environment.

Keywords: dune field, active dunes, evolution, dynamics, Los Choros cove.

CAPÍTULO I: PRESENTACIÓN

i. Introducción

Los campos de dunas constituyen sistemas esenciales para el equilibrio morfosedimentario de los litorales arenosos, vinculados con el transporte sedimentario a lo largo de las zonas costeras y la definición de patrones morfológicos y evolutivos complejos (Werner, 1995; Cooke et al. 1993; Lancaster 1995; Wiggs, 2001; Rogers & Nash, 2003; Pye & Tsoar, 2009; Hesp, 1999, 2000), el cual es originado de la amplia diversidad de formas que presentan los conjuntos dunares que cubren el territorio dentro de las diferentes zonas del planeta. La importancia de la depositación eólica se muestra claramente por el tamaño y volumen de las dunas costeras. Las dunas se desarrollan donde hay un gran suministro de arena, viento que lo traslade y un lugar en el cual se pueda acumular (Goldsmith, 1989). En Chile, los sistemas de dunas litorales han sido estudiados por Araya-Vergara (1982; 1986; 1987; 1989; 2001), Castro (1985), Soto (1987), Veloso (2005).

Los litorales arenosos están en constante ajuste morfológico asociado a la componente sedimentaria caracterizándose dinámicas cambiantes en cortos periodos de tiempo (Short, 1999a). Asimismo, el desarrollo de las dunas se ve favorecido por la presencia de fuertes y frecuentes vientos y la disposición de una amplia playa arenosa; también, hay acción de la dinámica del oleaje, especialmente de olas de tormentas que atacan el margen sotavento de las de las dunas anteriores. Las dunas costeras son comúnmente encontradas junto a amplias playas disipativas con pendiente suave (Bird, 2008).

En Chile central los sistemas dunares presentan sus partes más anchas en las zonas distales de las ensenadas, manteniendo una correlación con tipos de zona de rompiente de carácter intermedias y líneas de costa de orientación transversal (Araya-Vergara, 1996; Martínez, 2001; Soto, 2005; Soto et al. 2011). Es posible clasificar las dunas de acuerdo a su evolución individual o compartida (Veloso, 2005), lo anterior según el concepto de *Continuum* dunar, según las nociones de familias de dunas de Verstappen (1972), por Araya-Vergara (1986).

Los sistemas dunares evolucionan mediante generaciones o pulsos (Cooper, 1958, en Veloso, 2005), los cuales son definidos como etapas de actividad y avance dunar que progredan en fases de estabilización, las cuales son determinadas por variaciones eustáticas, climáticas y de sollevamiento cortical. Illeberger (1988), Kuzukuoglu et al. (1998) y Araya-Vergara (2001) identificaron la existencia de diferentes generaciones o pulsos dunares, que se diferencian entre sí a partir de características vegetacionales y sedimentológicas. Lo anterior se describe en las dunas primarias y su origen a partir de la interferencia de la vegetación, o así cuando la duna anterior es poco importante o inexistente, similar a un ambiente de desierto (barján) (Hesp, 1999). Posteriormente ello da

origen a un proceso de transformación, mediante el cual una duna evoluciona de manera individual o compartida, ya sea por redistribución de masa o por la asociación y coalescencia de dunas, concepto que Araya-Vergara (1987) denominó *Secundarización*.

La presente memoria se encuentra en el marco del proyecto Fondecyt N°1120234: Geodinámica y tendencia evolutiva del sistema litoral de la mega ensenada de Coquimbo: hacia una prognosis de amenazas naturales para escenarios de cambios ambientales endógenos y exógenos; aportando al desarrollo de éste con una caracterización de las dunas activas localizadas en la ensenada de Los Choros, IV Región de Coquimbo, específicamente su condición evolutiva con el fin de entender el comportamiento de este gran campo que forma parte de la mega ensenada de Coquimbo y las implicaciones que tiene en el litoral cercano.

ii. Planteamiento del Problema

En los ambientes litorales, es posible identificar una amplia variedad de formas, las cuales aparecen tanto en costas de océanos, estuarios y lagos (Nordstrom et al., 1990); estas se distribuyen alrededor del mundo, y se encuentran directamente relacionadas con las variaciones espaciales y temporales en el aporte de sedimentos, como también en el régimen de los vientos predominantes (Gimingham et al., 1989; Carter et al., 1992; Pye, 1993).

Marzolf (1988) señala que como regla general, los procesos de tipo eólicos son de mayor importancia, de acuerdo a la extensión en superficie de estos, en zonas áridas donde la cubierta vegetal es menor. Sin embargo, los mares de arena dinámicos y en actividad se desarrollan en zonas que reciben <250 mm en precipitaciones anuales. Otros autores han creado modelos para la formación de dunas activas. Un modelo conceptual fue creado por Bagnold (1941), en el cual describe el cambio de un barján simétrico a asimétrico debido a la influencia de vientos predominantes, originando un ángulo de divergente al ángulo original.

En campos de dunas que se encuentran ubicados en regiones áridas y semiáridas formas como: barjanas, barjanoides, crestas transversales son dominantes, mientras que en regiones con mayor humedad son más comunes dunas anteriores y dunas parabólicas (Pye, 1984). En el caso del área de estudio, campos dunares activos ubicados en la zona proximal y distal de la ensenada se identifica un predominio de las primeras.

En ambientes dunares de costa, el viento es el factor principal en la deflación de la playa y las áreas desprovistas de vegetación, así como del transporte del material arenoso para dar

paso a la conformación de dunas (Flor y Martínez, 1991). En relación a la morfología de dunas es importante considerar la influencia de bravezas, que pueden producir el retroceso en las dunas anteriores, tal como ha sido observado por Araya-Vergara (1979) y Soto (2005). La interpretación a las estructuras dunares dinámicas como a los cambios morfológicos, es realizada comprendiendo fenómenos recurrentes y asociados, similar a lo hecho por Araya-Vergara (2001) al utilizar la clasificación de sistemas dunares interactuantes, en su estudio sobre los Ergs de Atacama. Este tipo de clasificación considera a las dunas individuales sólo por su modo de asociación entre sí.

Consecuentemente, el propósito de esta investigación es caracterizar la condición evolutiva con el fin de entender el comportamiento de este gran campo que forma parte de la mega ensenada de Coquimbo y las implicaciones que tiene en el litoral cercano.

iii. Área de estudio

a. Contexto específico de la ensenada Los Choros

El sistema de dunas (29°13' S; 71°33') (Fig. 1) en la Ensenada de Choros se emplaza en la zona distal de la mega ensenada de Coquimbo, la cual se dispone de forma transversal a los vientos provenientes del SW, donde no existe una cuenca cercana correlativa al tamaño que posee el campo de dunas, excepto por la Quebrada Los Choros, la cual desemboca en la parte media de la playa que cuenta con escasa pendiente (cerca a 3°), a su vez posee una extensión lineal de 15 kilómetros.

La Ensenada Choros, producto de las condiciones de rompiente disipativas de alta energía, provee condiciones de erosión en la playa. También presenta acumulaciones arenosas de gran magnitud (Villagrán, 2007). Por su parte esta amplia bahía se ve flanqueada por dos campos dunares que alcanzan una superficie aproximada de mil hectáreas (Araya-Vergara, 1982), los que se ubican tanto en la parte proximal y distal de la bahía. Esta condición dada por el tipo de zona de rompiente, la línea litoral, la playa arenosa, la presencia de *beach cusps*, indican una condición de ataque del oleaje muy alta, lo que se traduce en playas más estrechas, con dunas incipientes, lo que es un gran contraste con las dunas anteriores y las dunas libres activas en la zona proximal y distal de la ensenada.

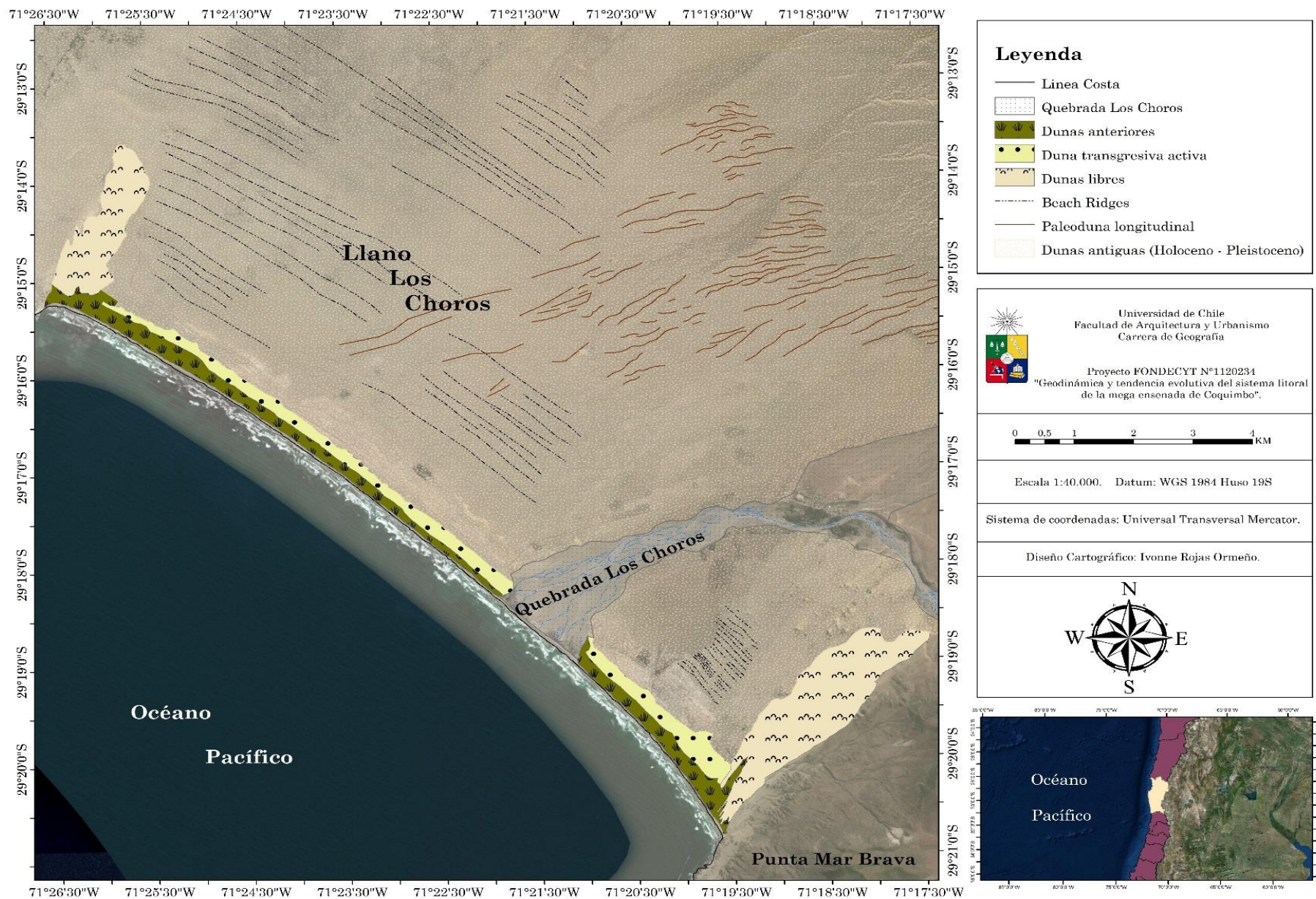


Figura 1: Área de estudio, Ensenada Los Choros. Fuente: Elaboración propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

b. Clima

1) Contexto Regional

El clima de la Región de Coquimbo es de tipo semiárido, o de estepa, con una vegetación arbustiva y con predominio de espinos. Las precipitaciones se concentran preferentemente durante el invierno. En el litoral se origina una estepa con nublados abundantes. Las temperaturas a lo largo del año son moderadas, producto de la influencia del océano. En la Cordillera de la Costa se presenta frecuentemente una neblina costera (camanchaca) que ha permitido, en algunos sectores, el desarrollo de especies vegetales propias del bosque valdiviano: Fray Jorge y Talinay (CONAMA, 2012).

La condición de semi-aridez de la región implica regímenes fluviales con escaso caudal permanente, que sólo se activan durante los eventos climáticos extremos como ENSO (El Niño) y la Oscilación Década del Pacífico (Sarricolea & Martín-Vide 2012).

Se aprecian tres variedades climáticas de importancia, pero con particulares características: el desierto, la estepa y la tundra de alta montaña (Novoa y López, 2001).

- a. Clima desierto costero con nubosidad abundante: en la franja adyacente a la costa la acción moderadora del Océano Pacífico provoca temperaturas parejas, con un promedio que va desde los 10°C hasta los 20°C. Uno de sus rasgos característicos es que la abundante humedad genera una nubosidad conocida como camanchaca. Esta tiene una mayor presencia en sectores donde el farellón costero alcanza considerables alturas, como sucede en Los Altos de Talinay, en el Parque Nacional Fray Jorge.
- b. Clima desértico transicional: predomina al oriente de la franja costera y se caracteriza por contar con variables y exiguas precipitaciones, además de presentar amplitudes térmicas mayores que las de la costa; la disminución de la nubosidad permite una mayor claridad de los cielos.
- c. Clima estepa con nubosidad abundante: se extiende desde Quebrada Honda hasta Quilimarí y entre sus rasgos característicos podemos señalar que sus precipitaciones varían de norte a sur, desde los 100 mm hasta cerca de 275 mm. Además, registra temperaturas promedio que oscilan entre los 5°C y 15°C (mínima y máxima) y cuenta con una considerable nubosidad nocturna y matinal.

2) Contexto específico del área de Estudio

Según Castro & Brignardello (2005) la ensenada Los Choros se inserta en un clima semiárido, en la zona límite con el desierto hiperárido. Las precipitaciones se concentran en la estación invernal (87%), es decir, de mayo a agosto. El monto de las precipitaciones anuales no supera los 90 mm, este comportamiento genera respuestas geomorfológicas diversas ante períodos de histéresis discontinuos. Con todo, las precipitaciones son intensas en los meses de mayo y junio, cuando aumentan los días con lluvia, situación que se vincula con la mayor presencia del frente polar en bajas latitudes en invierno. Esto es de gran importancia morfogenética ya que se activan los procesos torrenciales y erosivos inmediatamente después de un prolongado período de sequía estival

En este sentido, los autores también mencionan la importancia de los vientos en la ensenada, donde dominan los vientos de componente W, y con mayor frecuencia los provenientes del SW. También señalan que son relativamente débiles, de 2° a 4° Beaufort (entre 6 y 28 km/h), aunque se vuelven más fuertes de agosto a octubre, lo cual genera fuertes marejadas y gran eficacia geomorfológica del oleaje.

c. Hidrografía

1) Contexto Regional

La Región de Coquimbo presenta tres redes hidrográficas importantes, las que se encuentran conformadas por los ríos Elqui, Limarí y Choapa, los cuales han labrado sus cuencas entre los cordones montañosos de la Cordillera de Los Andes y desembocan en el mar.

A los 815 m.s.n.m. en la Cordillera de Los Andes nace el río Elqui que posee una cuenca hidrográfica de 9657 km², un gasto medio de 15 m³/seg. y un régimen de alimentación mixta. Sus principales tributarios, en época de deshielo, son el río Turbio y Claro. La utilización de sus aguas es aprovechada principalmente en el regadío del valle del Elqui y para consumo humano de las principales ciudades de la región tales como La Serena, Coquimbo y Vicuña.

En la parte central de la Región, el río Limarí posee numerosos tributarios dentro de los cuales están los ríos Hurtado, Grande y Guatulame. Posee una cuenca hidrográfica de 11.927 km² con un gasto medio de 25 m³/seg. Destacan en su estructura la regulación de sus aguas por los embalses de Recoleta, La Paloma y Cogotí.

Hacia el sur de la región se encuentra ubicado el río Choapa. Este presenta una hoya hidrográfica de 8.239 km² con un caudal medio de 30 m³/seg y con un régimen de alimentación mixta. Los ríos Tocornal e Illapel son sus principales tributarios (Pérez, 2005).

d. Geología

De acuerdo a los antecedentes geológicos extraídos por Villagrán (2007) de las cartas geológicas de Moscoso et al. (1982) y Thomas (1967) Hojas de Vallenar y Ovalle respectivamente se destacan las siguientes unidades geológicas presentes en la Ensenada Los Choros: Las unidades geológicas más antiguas en el sector de Punta Choros se encuentran representadas por las Metamorfitas de la costa, agrupación de rocas de mediano a bajo grado de metamorfismo, (filitas, esquistos y cuarcitas), de edad Paleozoica, encontrándose en afloramiento continuo en los flancos occidentales de la Cordillera de la Costa.

En la zona cercana a la costa se desarrolla la Formación Coquimbo, la cual corresponde a un conjunto de sedimentos marinos aterrazados (areniscas, calcarenitas, coquinas y conglomerados) muy poco consolidados, que afloran en la franja costera entre los 28° y 30° Lat. S.; en el área de estudio estos depósitos están recubriendo la Formación Canto de Agua, y aparecen en pequeños manchones superficiales en el sector del llano de los Choros. Esta formación del Mioceno Medio, que en sus partes más jóvenes corresponde al Pleistoceno, presenta en su sección inferior areniscas amarillas, de grano medio a grueso, en parte limosa, con intercalaciones de coquinas, mientras que en su parte superior, areniscas amarillentas y conglomerados, con niveles carbonatados y fosilíferos.

La unidad de depósitos modernos no consolidados, se distribuye por toda la franja litoral del área de estudio y hacia el interior siguiendo las quebradas actuales. Esta unidad incluye dos tipos de depósitos, los aluviales (Qal) y los eólicos (Qe) de edad cuaternaria y activos en la actualidad. En el área de estudio se encuentran presentes los últimos. Los depósitos eólicos, corresponden a extensas playas, dunas litorales y campos de dunas que se encuentran ampliamente distribuidos en las zonas costeras y específicamente en el sector de Los Choros.

Por otro lado, el basamento cristalino del batolito costero (Fig. 2) se manifiesta en afloramientos incipientes al noroeste del área, en los sectores de Punta de Choros, Morrillos de las Ventanas y las islas adyacentes. Este batolito está conformado por esquistos poco metamorfizados con cuarcita en filones. Corresponde a las metamorfitas costeras datadas en el paleozoico y que son más comunes hacia el norte del área de estudio. Hacia el interior afloran rocas intrusivas compuestas principalmente por granito y, en menor proporción, por granodiorita. Son las rocas granitoideas costeras del jurásico superior a cretácico inferior (Moscoso et al., 1982).

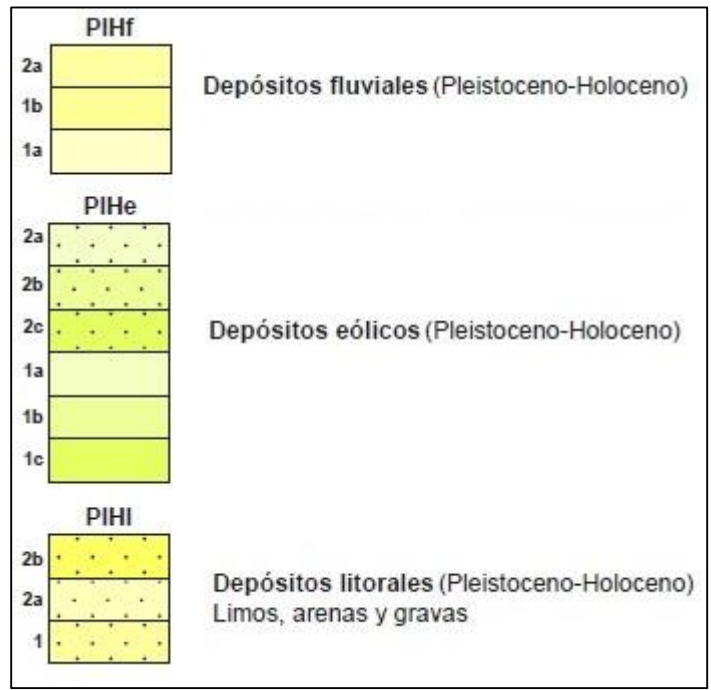
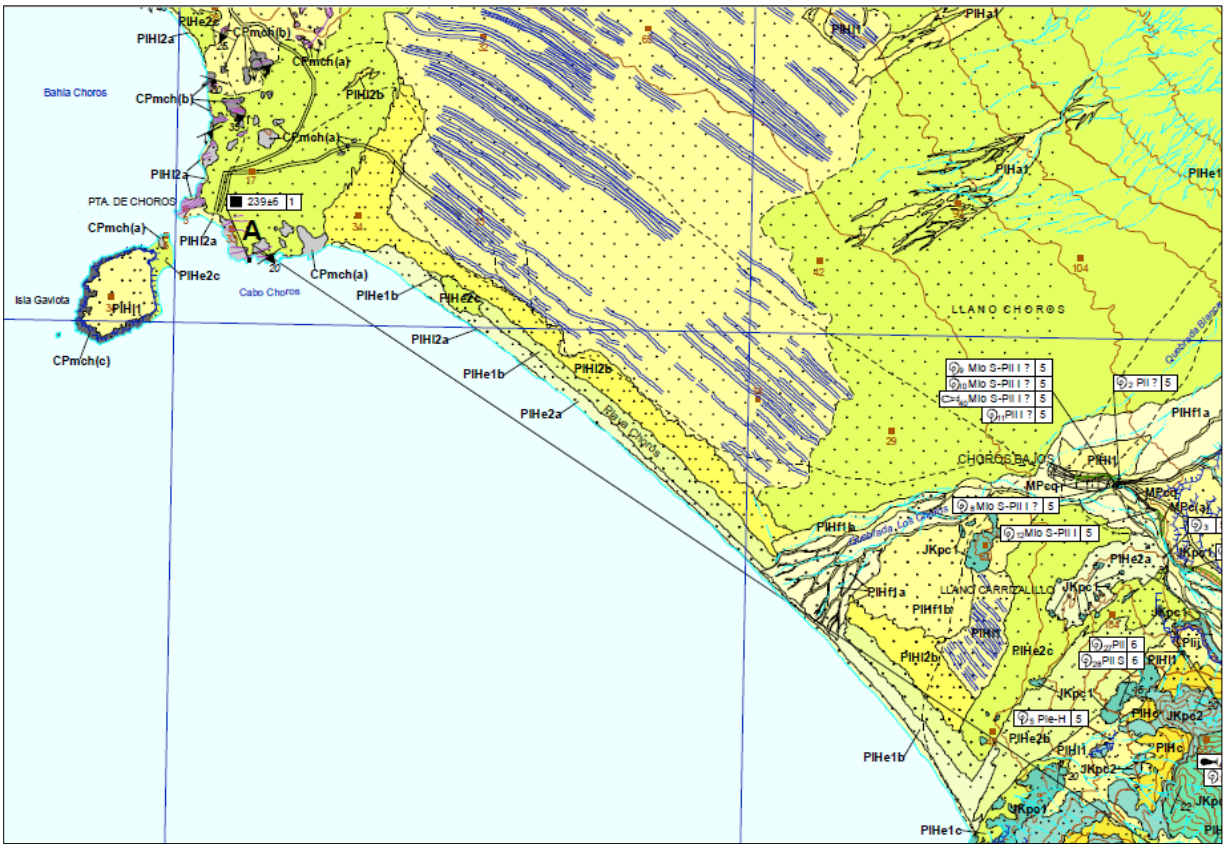


Figura 2: Esquicio geológico del área de estudio. Fuente: Creixell et al. (2012).

e. Características Geomorfológicas

Castro & Brignardello (2005) describen características para la ensenada de Los Choros. Primero, lo clasifican como un complejo fluvio-marino heredado que se encuentra expuesto hacia el sudoeste, enmarcado entre dos promontorios rocosos en donde aflora el basamento metamórfico local.

Segundo, dominan las terrazas marinas subhorizontales escalonadas y concordantes desde el punto de vista morfogénico, las cuales fueron formadas por las acciones marinas derivadas de las variaciones glacio-eustáticas del nivel marino, con un probable apoyo del tectonismo local, que se hace evidente por la existencia de una red ortogonal de fracturas; y al mismo tiempo, por la acción fluvial de la quebrada Los Choros, la cual ha contribuido con sedimentos fluviales generando colmataciones desniveladas debido a las modificaciones en el nivel de base.

Tercero, la acción eólica ha generado importantes campos dunarios polifásicos a los cuales se antepone una extensa playa arenosa de 15 km de longitud. Estos autores también señalan la orientación NW-SE de la ensenada y la amplia zona de rompientes de 500 metros de ancho; rasgo poco común en las costas de Chile semiárido. El caudal intermitente de la quebrada Los Choros alimenta subterráneamente en el exutorio, un humedal de importancia ecológica que se localiza en el abrigo de las dunas actuales.

Finalmente, los autores señalan que los depósitos modernos no cementados recubren el borde costero, las áreas fluviales y los faldeos interiores corresponden a depósitos marinos y eólicos antiguos y recientes (arenas), depósitos aluviales modernos (ripios, gravas y arenas) y a depósitos coluviales antiguos y recientes (clastos, escombros de falda, ripios y gravas).

Objetivo General

Identificar las formas representativas de las dunas activas y caracterizar su condición evolutiva en la Ensenada Los Choros, IV Región de Coquimbo.

Objetivos específicos

- 1) Identificar los diferentes tipos de formas de dunas en Los Choros.
- 2) Analizar las condiciones temporo-espaciales de cambio en las formas actuales.
- 3) Ahondar en los estados de cambio evolutivos de las formas de dunas del área de estudio.

Hipótesis de Trabajo

La amplia franja de dunas anteriores a lo largo de la línea de costa de la playa de Los Choros, junto a dos campos de dunas secundarias en los extremos sur y norte de la ensenada evidencia una condición geodinámica asociada, vinculadas al avance y evolución de formas junto al abastecimiento actual de sedimentos a la línea de costa.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ASUNTO

i. Los sistemas dunares

La zona litoral presenta condiciones propicias para la disponibilidad, transporte y acumulación de sedimentos en forma de campos dunares (Castro, 1985), tales como: orientación de la costa, alimentación de materiales, características climáticas y el régimen de vientos (Hesp, 1999). Veloso (2005) estudió los pulsos formativos del campo dunar de Longotoma, ubicado en Bahía La Ligua, donde identificó cinco pulsos dunares que se componen de diferentes asociaciones de dunas. Asimismo, es posible utilizar las características morfológicas y sedimentológicas de los individuos que forman parte de un sistema dunar, como criterio de identificación y determinación de su edad correspondiente (aplicable a dunas actuales, medias y antiguas) (Araya-Vergara, 1989).

También, Paskoff (1970) identificó para la zona norte de Chile, en específico Chile semiárido, del país tres generaciones diferentes de dunas:

- a) Dunas antiguas pleistocénicas o paleodunas (este tipo normalmente se extiende en superficies mayores que los campos actuales, asimismo han perdido su morfología distintiva y tienden a estar ubicadas en niveles altos).
- b) Dunas estabilizadas holocénicas (generalmente presenta morfología alargada, que fueron colonizadas por vegetación de forma natural).
- c) Dunas libres (estas presentan actualmente dinamismo dunar, con tendencia a avanzar y cubrir a las formaciones más antiguas).

Es posible clasificar las dunas de acuerdo a su evolución individual o compartida, lo anterior según el concepto de *Continuum* dunar (Fig. 3).

Por otro lado, autores como Smith (1954, en Araya-Vergara 1987), señala una clasificación para la distribución de las unidades dunares, en donde las formas de acumulación de arena pueden ser dunas primarias, las cuales son derivadas directamente de la playa, y dunas secundarias, estas son derivadas de formas pre-existentes. Asimismo, para identificar las diferentes familias de dunas (de forma libre como las de origen barjánico, o las provenientes de las dunas anteriores) Araya-Vergara (1986, 1987, 1989, 2001), adoptó clasificaciones en distintos tratados que ha realizado este autor sobre estas formas, así como

en trabajos en que ha colaborado con otros autores (Soto, 1987; Vargas, 1990; Veloso, 2005).

También el concepto de duna transgresiva, utilizado por Hesp y Thorn (1990) y Bird (2008) para identificar los elementos dinámicos que componen los campos de dunas litorales, y que sirven como agentes que indican la actividad reciente en este, junto con *ripple marks*.

De igual importancia, Araya (2010) ha realizado una interpretación referente a las estructuras dunares dinámicas, como también a los eventos migratorios y cambios morfológicos. De lo cual se extrae que este tipo de clasificación considera a las dunas individuales sólo por el modo de asociación entre sí. Incluso, las transformaciones de las dunas presentes en el sistema dunar y los cambios de formas asociados con el transporte de masa. Lo cual considera la teoría de transmutación de Araya-Vergara (1987).







FAMILIA DE DUNAS		
Duna anterior	E ↓ V O L U C I Ó N	Barjanes
		Barj. coalescentes
Duna paralela		Barjanoides
		Dunas transversales
Blow - outs		
Dunas parabólicas		
Dunas upsiloidales		
		

Figura 3: Continuum dunar. Fuente: Araya-Vergara (1996, en Arriagada 2009).

a. Origen de los sedimentos

Bird (2008), señala con respecto a las costas dunares que las formas costeras pueden estar formadas o modificadas por el viento. Fuertes vientos deflacionan sedimentos de granos finos (arena, limo y arcilla) de playas y zonas intermareales, disminuyendo sus superficies y causando el movimiento de partículas de roca en la costa, a lo largo de esta o en la zona litoral.

La acumulación efímera o relativamente estable, de la carga arenosa es sin duda el proceso de mayor eficacia morfogenética relacionada con la acción del viento, derivándose de ella los relieves elementales y paisajes típicamente eólicos: las dunas y los complejos dunares o *ergs*. Estos patrones han sido explicados como consecuencia de una auto-organización al interior de los sistemas complejos (Werner, 1995).

Algunos autores afirman que la formación de dunas necesita más que arena y vientos predominantes (Lancaster, 2009). Asimismo, dicha acumulación afecta a las partículas transportadas mediante rodamiento o saltación al cesar o ralentizar su movimiento como consecuencia de varios factores, como: disminución de la velocidad del flujo, intercepción por obstáculos dispuestos transversalmente al sentido de la corriente de aire (Muñoz, 2000). La mayoría de las dunas derivan de material que ha sido transportado por procesos fluviales o litorales. Fuentes importantes incluyen playas marinas y lacustres, cuencas de lagos secos, llanuras de inundación y deltas (Lancaster, 2004).

Los sedimentos dunares se encuentran predominados por cuarzo y feldespato del tamaño de arena (63 a 1000 μ m), derivados originalmente de la erosión de las rocas ricas en cuarzo, especialmente granitos y arenisca. Sin embargo, en la mayoría de los casos la arena eólica es derivada de materiales que han sido transportados por algún otro medio. La fuente más importante de sedimentos es fluvial y sedimentos deltaicos a nivel local (Lancaster & Oilier 1983).

En los ambientes litorales, es posible identificar una amplia variedad de formas, las cuales aparecen tanto en costas de océanos, estuarios y lagos (Nordstrom et al., 1990); estas se distribuyen alrededor del mundo, y se encuentran directamente relacionadas con las variaciones espaciales y temporales en el aporte de sedimentos, como también en el régimen de los vientos predominantes (Gimingham et al., 1989; Carter et al., 1992; Pye, 1993).

Muchos campos dunares tienen fuentes internas de sedimentos como resultado de la deflación interdunaria y la reactivación de dunas antiguas (Lancaster, 1982b). Sedimentos dunares, en su mayoría compuestos de cuarzo, provenientes de fuentes fluviales, proveen un registro de acumulación dunar. Las características de estos reflejan el proceso de formación y desarrollo de las dunas. Variaciones espaciales en el transporte de sedimentos

en dunas dan pie a patrones característicos de tamaño del grano y clasificación, así arena de las crestas dunares tiende a ser más fina y mejor clasificada, comparada con zonas interdunarias y áreas basales (Lancaster, 2004).

ii. Dunas Costeras

a. Origen de los depósitos

La importancia de la depositación eólica se muestra claramente por el tamaño y volumen de las dunas costeras. Las dunas se desarrollan donde hay un gran suministro de arena, viento que lo traslade y un lugar en el cual se pueda acumular. Ya que el principal elemento que distingue las dunas costeras de las dunas desérticas es la vegetación, la relativa cantidad de vegetación puede ser utilizada como tipología para estas. Las dunas costeras proveen un *buffer* útil, y muchas veces necesario contra las olas de tormenta y el actual aumento en el nivel del mar. Se forman primariamente a través de acreción de arena vertical atrapada por la vegetación dunar (Goldsmith, 1989).

Las costas con dunas generalmente se forman donde la arena en la costa se ha secado y ha sido transportada a barlovento de la playa, para acumularse sobre el nivel de las altas mareas, particularmente donde la depositación ocurre contra obstáculos tales como: trozos de madera, o entre basura existente en la playa o vegetación. Su crecimiento y forma se encuentran ligados a una fuente de arena que puede ser movida por el viento, características del flujo de viento, índices de transporte eólico y patrones de erosión y depositación (Bird, 2008).

Estas son más extensas en costas de barlovento, notablemente en las costas atlánticas de Europa y las costas del pacífico en América y en SE Australia y sur de África (Fig. 4). Las dunas costeras difieren de las dunas interiores (desierto) en que las primeras están sujetas a una amplia variedad de procesos, incluyendo acción de mareas y vegetación, lo cual influencia su tamaño, forma, evolución y persistencia (Bird, 2008). Por otro lado, la arena se acumula entre y tras vegetación debido a la reducción en la velocidad del viento cerca al lecho por el follaje de la planta y este efecto nodriza provee protección contra la removilización por vientos (Davison-Arnott, 2010).

Durante períodos entre las principales tormentas, la vegetación puede crecer orientada al mar capturando arena en las dunas embrionarias recientemente desarrolladas y durante las tormentas con elevados niveles de agua y grandes olas la duna embrionaria y dunas anteriores son erosionadas y la arena retorna al sistema litoral. Esta interacción playa/duna

es un proceso significativo que controla la evolución del sistemas de dunas anteriores (Davison-Arnott, 2010).

La meteorización en las costas rocosas puede producir sedimentos lo suficientemente finos para ser acarreados por el viento, que por lo tanto contribuye a la reducción de las superficies rocosas en la costa (Bird, 2008).

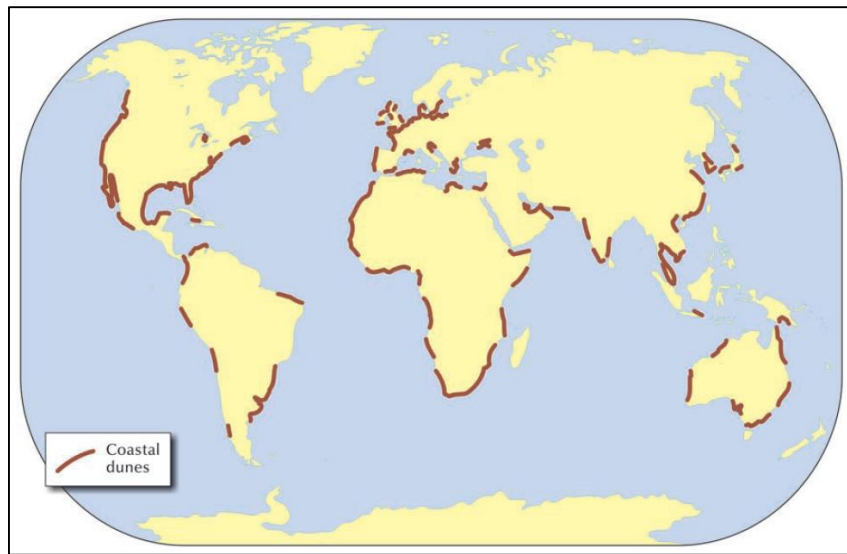


Figura 4: Distribución mundial de costas dunares. Fuente: Hugget (2011), adaptado de Carter et al. (1990).

iii. Tipos de dunas

- a. Nebka y duna anterior: dunas del cual su origen está vinculado a la vegetación (en Chile central (N. y S.) las más comunes corresponden a *Ammophila arenaria*, *Ambrosia chamissonis* y *Carpobrotus chilensis*). En este sentido, la duna anterior posee un aspecto de cordón paralelo a la playa y perpendicular a la dirección del viento dominante, mientras que la nebkka presenta morfología de tipo monticular (Fig. 5).

Asimismo, la relación existente entre ambas formas es estrecha, ya que en estados de evolución incipientes, las dunas anteriores se originan a partir de la coalescencia de nebkas (Hesp, 1999); Castro (1985) señala que una anteduna puede ser un conjunto de nebkas.

También, es importante destacar que las dunas anteriores se encuentran relacionadas estrechamente con el aporte de material que llega a los campos interiores, siendo

estas las productoras del sistema dunar consecuente (Veloso, 2005). Estas propenden a tener movilidad, es decir, retroceden conjuntamente con la playa y avanzan si ésta última prograda, originándose sucesiones de cordones de dunas anteriores (Hesp, 1999). Por otro lado, la ruptura de un cordón de anteduna genera *blowout* (Fig. 5), los cuales pertenecen a la primera etapa del origen de una duna parabólica.

- b. *Depresión interdunaria*: se ubica tras la anteduna (es paralela a esta), la separa del campo de dunas libres interior. Asimismo, corresponden a espacios de flujo activo de material y pueden encontrarse total o parcialmente ocupadas por una laguna litoral (Castro, 1985).
- c. *Duna parabólica*: el transporte continuo de arena a través de blowouts a menudo resulta en el desarrollo de las dunas parabólicas. Estas consisten en un frente de avance activo y un lóbulo deposicional con los brazos de arrastre que encierran una cuenca de deflación. Esto produce una forma de U característica (es decir, parabólica) o duna en forma de V (Hesp 1999). A medida que se desarrollan durante un período de tiempo la orientación de su eje longitudinal está estrechamente ligada con la dirección del viento predominante (Bird, 2008). Dunas parabólicas más cortas y anchas se forman donde hay una gama más amplia de dirección del viento (Davis, 1980; Bird, 2008).
- d. *Duna longitudinal*: La mayoría de las dunas paralelas se han formado por secuencias de corte y relleno en una orilla arenosa progradante, estas se originan cuando la duna upsiloidal evoluciona en dos cordones paralelos independientes entre sí, que están orientados de manera longitudinal a la dirección del viento dominante (Fig. 5). Pueden ser modificadas por olas de tormenta ocasionales, lo que daña o destruye la vegetación y barre hacia tierra arena en láminas. Las crestas y montículos se transforman en formas tenues, al mismo tiempo que los márgenes en dirección al mar se reducen como acantilados de dunas (Bird, 2008).
- e. *Barján*: duna que posee forma de medialuna donde la migración se da de acuerdo con el mecanismo unidireccional del viento (Fig. 3). Sus brazos apuntan hacia sotavento. Los barjanes son montículos aislados de arena, formados en áreas de suministro de arena limitadas que superponen arena gruesa o superficies no arenosas. Una duna transversal se construye de muchos barjanes que han unido (Tsoar, 2001)
- f. *Barján coalescente*: corresponde a una unidad conformada por dos barjanes que conectan sus brazos (Fig. 3), aunque conservan sus formas individuales (Tsoar, 2001).

- g. Barjanoide: este tipo de duna corresponde a la forma de acumulación que resulta de la coalescencia y unión de varios barjanas que pierden su forma individual, modelando hileras festoneadas de arena orientadas según ángulos rectos con respecto al viento. Las hileras recuerdan una serie de barjanas que hayan sido colocados uno al lado de otros (Fig. 3) (Tsoar, 2001).
- h. Blowout: comúnmente se desarrollan en las antedunas o por dentro y en dunas con mayor edad vegetadas (Fig. 5). Corresponden a geoformas dunares erosionales que son depresiones cuencas de deflación formadas por la erosión eólica de un sustrato arenoso o duna preexistente; generalmente de tipo *Saucer*, *Bowl* y *Trough* (Hesp & Hyde 1996, Hesp 1999). La ruptura puede ocurrir de forma natural después de la erosión de las dunas litorales por olas de tormenta o al canalizar los vientos a través de sillines (bajos) en la cresta de una anteduna alta o donde quiera que haya reducción de la cobertura vegetal, lo que disminuye la rugosidad local y el aumento del potencial arrastre de sedimentos. (Carter et al. 1990, Hesp 1999, 2002).
- a. B. tipo Saucer: son poco profundos, huecos con forma de plato u ovoide, que a menudo se desarrollan en terrenos de dunas relativamente planas. Se caracterizan por tener bordes marginales escarpados y lóbulos deposicionales planos a convexos en sotavento (Carter et al. 1990, Hesp & Hyde 1996, Hesp 1999).
 - b. B. tipo Bowl: cuencas semicirculares a circulares profundas, caracterizadas por largas laderas escarpadas interiores y lóbulos deposicionales más desarrollados (Carter et al. 1990, Hesp & Hyde 1996, Hesp 1999).
 - c. B. tipo Trough: son en general más estrechos y alargados, con cuencas de deflación más profundas, con taludes o paredes laterales más erosionales y lóbulos de deposición más pronunciados (Carter et al. 1990, Hesp & Hyde 1996, Hesp 1999).
- i. Duna transversal: en regiones donde los vientos predominantes son uniformes, hay abundancia de arena y la vegetación es dispersa o no existe, las dunas transversales se originan una vez que los barjanoides son transformados en una duna con una cresta relativamente homogénea, la cual se encuentra orientada transversalmente a la dirección del viento dominante. Normalmente muchas de las dunas costeras son de este tipo (Tsoar, 2001).
- j. Duna transgresiva: estas se originan en el avance y la coalescencia de formas dunares que pueden ser parecidas o diferentes entre sí. Las dunas transgresivas (Fig.

3) se genera del resultado de la coalescencia de masas que, originadas desde una playa, no han sido retenidas por la vegetación (Bird, 2008). Los campos de dunas transgresivos también se han denominado dunas móviles, desplazamientos de arena y dunas migratorias. Estos campos de dunas pueden variar en tamaño, desde muy pequeños (cientos de metros de extensión a lo largo de la costa y hacia el interior) a muy grandes (muchos kilómetros de extensión). Pueden ser en gran parte sin vegetación, parcialmente vegetados o completamente cubiertos de vegetación (relictos). Asimismo, pueden ser láminas de arena o comprender una variedad de tipos de dunas que van desde simples barjanes, dunas transversales, dunas transversales barjanoidales a dunas parabólicas (Hesp & Thorn 1990).

- k. Dunas ascendentes: estas corresponden a cuerpos dunar que avanzan a través de la ladera de sotavento de un interrupción topográfica (Hugget, 2011). De la misma forma, su origen, se encuentra vinculado a abastecimientos importantes de arena y regímenes de viento importantes que permiten que las dunas remonten superficies en altura (Araya, 2010).
- l. Patrón aklé: disposición en la que se presentan un conjunto de dunas parabólicas dentro de un conjunto transgresivo y que contempla la superposición de unas con otras (Araya-Vergara, en Veloso 2005).

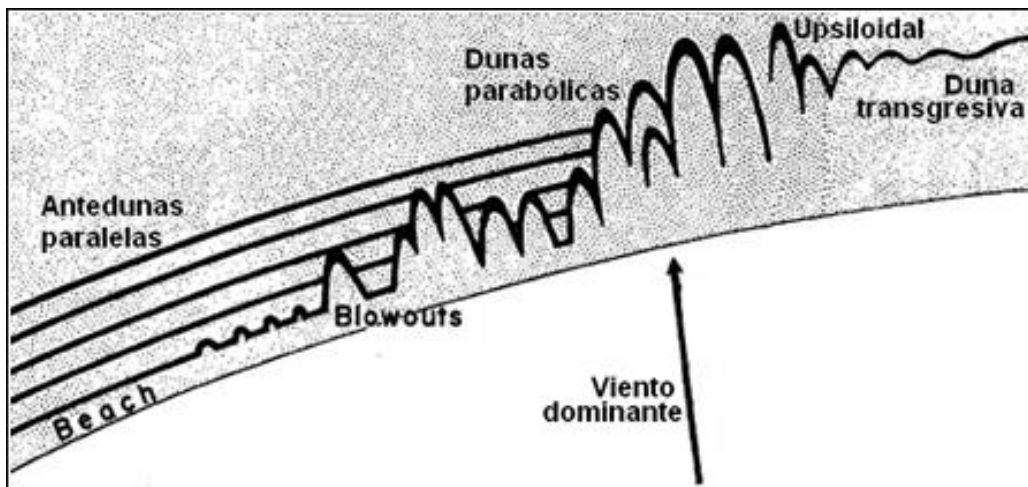


Figura 5: Secuencia del continuum dunar desde las dunas anteriores hacia la duna transgresiva. Fuente: Bird (2008).

CAPÍTULO III: PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

i. Materiales

En la etapa de gabinete, se realizó la revisión bibliográfica de los antecedentes del sector, recopilación de información, antecedentes cartográficos, imágenes satelitales, y bibliografía del área de estudio y de las temáticas relacionadas, entre ellas proceso de evolución en campos de dunas, morfología dunar, influencia de la línea litoral. Luego, se procedió a etapas de procesamiento de la información, en la cual los resultados se ven expresados espacialmente mediante el software ArcGis 10.1.

ii. Metodología

Para la realización de esta investigación se desarrolló la búsqueda detallada de información, tanto general como de distintas temáticas asociadas al área de estudio, relacionados con la geología, hidrología, geomorfología, sedimentología y zona litoral que contribuyeron a explicar las relaciones dinámicas del área de la ensenada como unidad particular o como parte de un sistema mayor, como es el caso de la mega ensenada de Coquimbo.

Para el desarrollo del primer objetivo, que buscó identificar los diferentes tipos de formas dunares, se requirió un análisis de las diferentes formas dunares establecidas por Hesp (1990, 2000, 2002, 2013), quien habla de ellas en sentido de sus características y procesos generales, mientras que Paskoff (1970) abarcó este tema en términos de la evolución de la geomorfología del Norte Chico del país, determinando así generaciones de dunas. Por otro lado, Castro (1985) expuso las formas fundamentales en Chile y los factores que inciden en su evolución. Veloso (2005) elaboró un estudio sobre la evolución del campo dunar de Longotoma a través de la identificación y clasificación de pulsos dunares. Por su parte, Lancaster (2004) realizó una diferenciación entre la formación en ambientes litorales y desérticos.

Se realizó la fotointerpretación del área de estudio, en diferentes años: 1997, 2002 y 2014) lo que permitió la identificación de las formas actuales en los campos dunares de la ensenada, que fue corroborado con una visita a terreno, lo que confirmó la fotointerpretación del área de estudio.

Para realizar el segundo objetivo, el análisis de las condiciones de cambio en las formas actuales de carácter temporos espacial, fue necesario el estudio de las teorías evolutivas de Verstappen (1972) y Araya-Vergara (1989), que apuntan al entendimiento y desarrollo de este punto. Se consideraron conceptos claves tales como, el *continuum* dunar, desde el punto de vista de la evolución de las formas de acuerdo a las familias a la que dicha duna pertenezca. Así como los factores que propicien el cambio de las formas, como la influencia de la orientación de la línea litoral en el desarrollo de sistemas adyacentes, la acción eólica, la influencia del tipo de zona de rompiente en el abastecimiento de sedimentos, de acuerdo a la clasificación de Wright & Short (1984, en Short 1999).

Por su parte, el tercer objetivo buscó determinar la diferencia en los estados de cambio evolutivos de las formas dunares en la ensenada Los Choros, se abordó una metodología doble, donde la primera etapa se desarrolló mediante la utilización de imágenes históricas del área de estudio para la identificación de las formas existentes en los años 1997 y 2002, donde una caracterización y espacialización de estas permitió un posterior contraste y comparación con las formas actuales.

Por medio de una perspectiva genética y evolutiva, es decir en estados evolutivos y procesos asociados es posible interpretar los cambios a que los campos dunares están expuestos y pueden resultar en sistemas y patrones aún más complejos. Para lo cual se consideró las clasificaciones adoptadas por Araya Vergara en distintos tratados (1987, 1989, 2001) y también a Soto (1987).

El trabajo de terreno consistió en la validación de carta geomorfológica y observación referencial de los tipos de zona de rompiente aplicando la clasificación de Wright & Short (1984) y Araya-Vergara (1996). Se realizó un registro de las formas evolucionadas según el *continuum* dunar identificado

Lo que finalmente mediante la sistematización de la información obtenida con anterioridad, permitió la comparación de sectores según sus respectivas características dinámicas tanto en 1997, 2002 como 2014, llevando a la investigación a integrar resultados y esclarecer los procesos que se dan en el ambiente litoral de la ensenada Los Choros.

Cabe destacar que entre el material de apoyo fundamental para el desarrollo de esta investigación corresponde a imágenes satelitales históricas, el material fotográfico, la utilización del programa *GoogleEarth* para la corroboración de diversos aspectos relevantes a la hora de llevar a cabo los objetivos de la investigación y la correcta interpretación de las características en cada campo dunar del área de estudio que será espacializado mediante el software ArcGis 10.1 (Fig. 6).

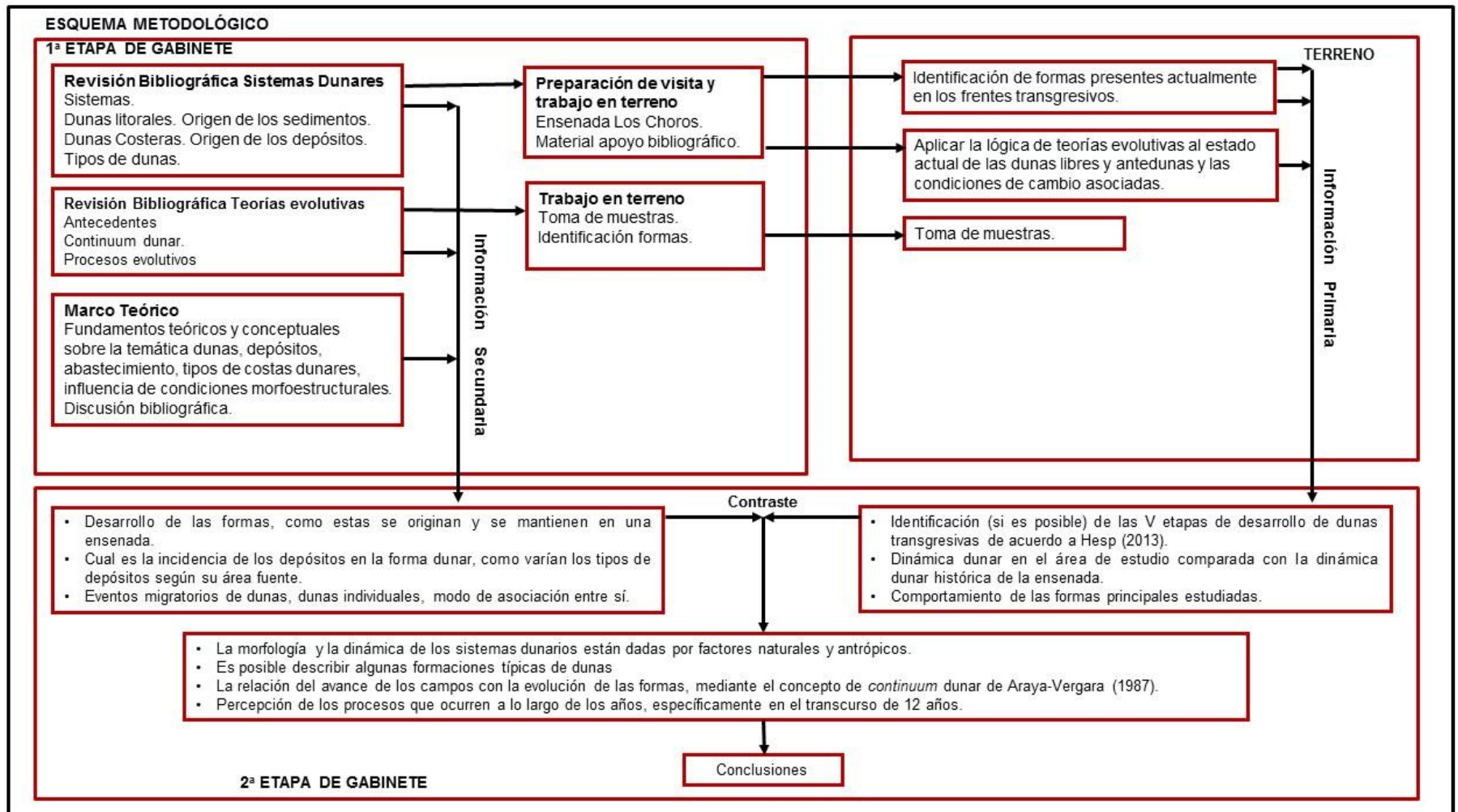


Figura 6: Cuadro metodológico. Fuente: Elaboración propia. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

i. Tipos de formas dunares presentes en la ensenada Los Choros

En relación a las formas y tipos de dunas activas que se encuentran presente en el área de estudio fue posible la identificación de dunas anteriores y dunas libres. Las primeras corresponden a cordones paralelos a la línea de costa que se encuentran asociados a vegetación (Hesp, 2002). Las dunas anteriores son de dos tipos: dunas incipientes y dunas estabilizadas;

También se distinguen las dunas inactivas, mediante revisión de bibliografía y la utilización de la carta geológica correspondiente. De acuerdo a Creixell et al., (2012) son heredadas, han sido datadas en Pleistoceno-Holoceno, cubren terrazas de abrasión marina, y se distribuyen ampliamente en los llanos de Los Choros, donde son cubiertas principalmente por depósitos eólicos.

De acuerdo con las teorías evolutivas de Verstappen (1972), Araya-Vergara (1987) (Fig. 3), resalta la existencia de dos familias de dunas: dunas anteriores y barjanas. De las cuales se consideran las dunas libres definidas por Hesp et al. (2005); Hesp (2013), barjanas, blowout y dunas parabólicas.

Con el propósito de obtener un primer acercamiento a la identificación de las dunas existentes en los campos distal y proximal en la ensenada Los Choros (por medio de fotointerpretación de imágenes del año 2014 obtenidas de GoogleEarth) de acuerdo a las familias de dunas anteriores y barjanas; las primeras se identificaron a través de sus patrones característicos, estos son: dunas alargadas que se encuentran vegetadas, sin embargo que presentan diferencias en sus formas dentro del grupo dunar. Por su parte, la presencia de dunas embrionarias o incipientes muestra un patrón que permite identificar y comprender las condiciones de abastecimiento que se dan en la playa, a pesar de que esta sea de ambiente disipativo de alta energía. Mientras que las segundas se identificaron de acuerdo a las características mencionadas anteriormente y definidas por Hesp (2013).

a. Tipos de dunas

Las dunas que se consideraron para su identificación responden al concepto de dunas transgresivas de forma activa, parcial o totalmente vegetadas, de forma transversal, oblicua o alargadas (Hesp, 2013; Hesp et al. 2005; Martinho et al., 2010). Son dunas libres localizadas en zonas de sotavento y de mayor altura de los cordones de dunas anteriores y corresponden a dunas tipo barján, *blowout* y parabólicas. Las dunas activas, se encuentran ubicadas en la zona proximal y distal de la ensenada y contiguas a la línea de costa originando una franja de dunas anteriores y transgresivas que se extienden a lo largo de la ensenada (Fig. 1). Los campos de dunas que se encuentran en los extremos de la ensenada tienen formas bastante complejas.

En el campo ubicado en la zona proximal de la ensenada (Fig. 7) las formas que dominan en extensión corresponden a dunas de tipo barjanoides, las que se distribuyen de forma homogénea dentro del campo, donde su densidad se ve expresada en la parte media de este. Esto debido a que en el frente de avance predominan los barjanes, lo que no evita que barjanoides se desarrollen ahí. Mientras tanto, las dunas transversales, que se encuentran presente en todos los sectores del campo.

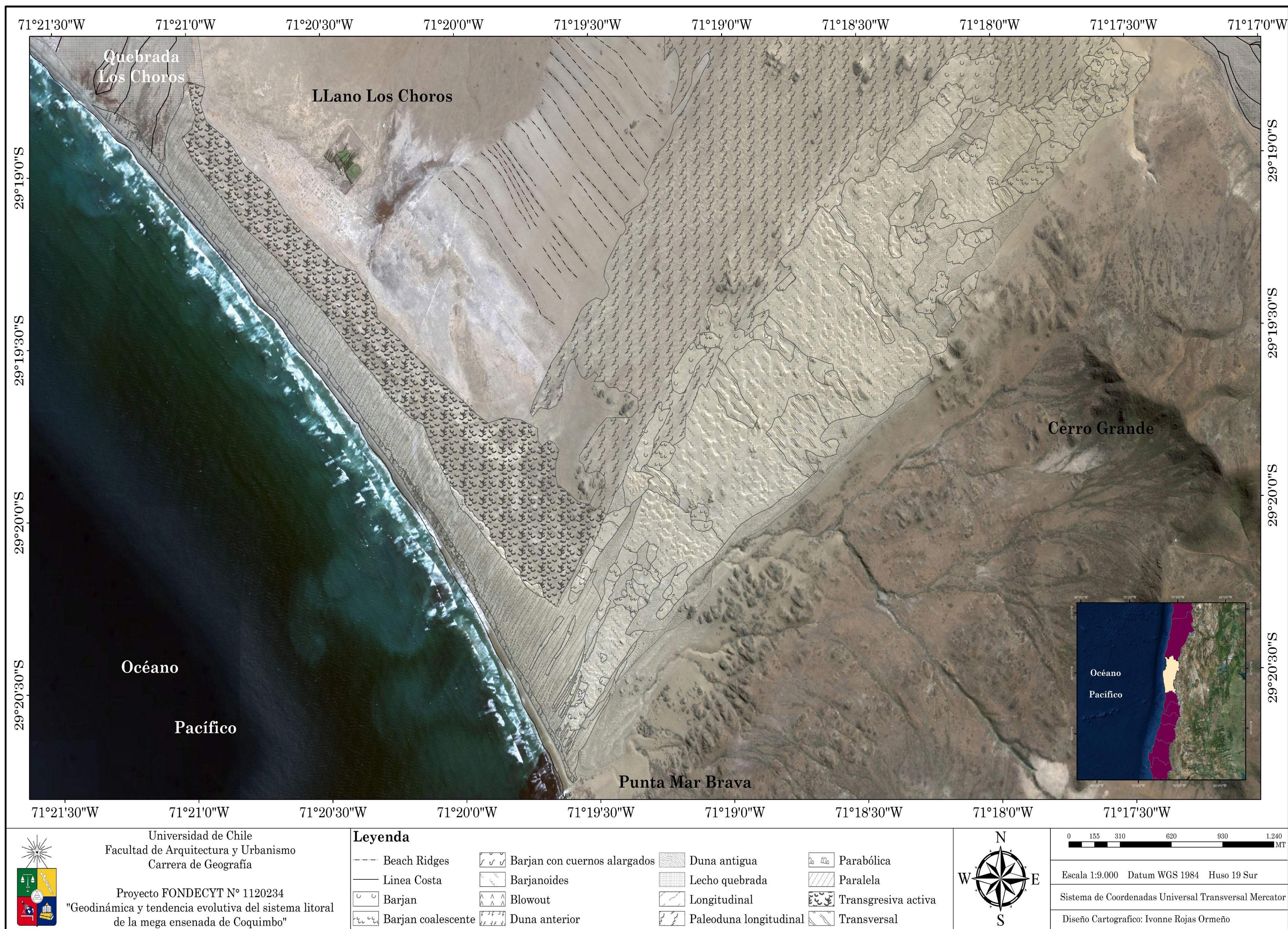


Figura 7: Dunas Activas año 2014, Campo proximal. Ensenada Choros. Fuente: Elaboración propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Actualmente este campo abarca una superficie de cinco kilómetros hacia el interior, donde se evidencian que tipos de dunas mencionados con anterioridad se encuentran ligados por el *continuum*, ya que todas pertenecen a la familia de los barjanes, lo que crea patrones de distribución, alimentación y transporte dentro de este sistema. Lo que se ve influenciado por la acción eólica.

En cambio, dunas tipo barján coalescente tiene una frecuencia inferior en contraste con las formas mencionadas con anterioridad, pero este tipo de dunas aparecen dispersas en la extensión del campo. Asimismo, los barjanes también se distinguen entre sí, ya que hay varias de estas formas que se presentan con los cuernos alargados o han unido uno de sus brazos entre ellos, avanzando en su estatus en el *continuum*. También es necesario destacar que si bien en el campo sur existe una predominancia de la familia de los barjanes, se destaca la presencia de formas que provienen de la familia de las anteriores, como es el caso de dunas tipo *blowout*, parabólicas y longitudinal (Fig. 8).



Figura 8: Duna parabólica, campo proximal. Fuente: Aqueveque (2008).

Las dunas libres ubicadas en el sector distal de la Ensenada Choros (Fig. 9)-que serán referidas como campo distal—la predominancia de las formas presentes está dada por dunas tipo barján, pero a diferencia del campo proximal, estas evidencian un fenómeno especial, la acción de los vientos predominantes ha producido una longitudinalización que se ve intensificada a medida que las dunas evolucionan a formas más complejas.

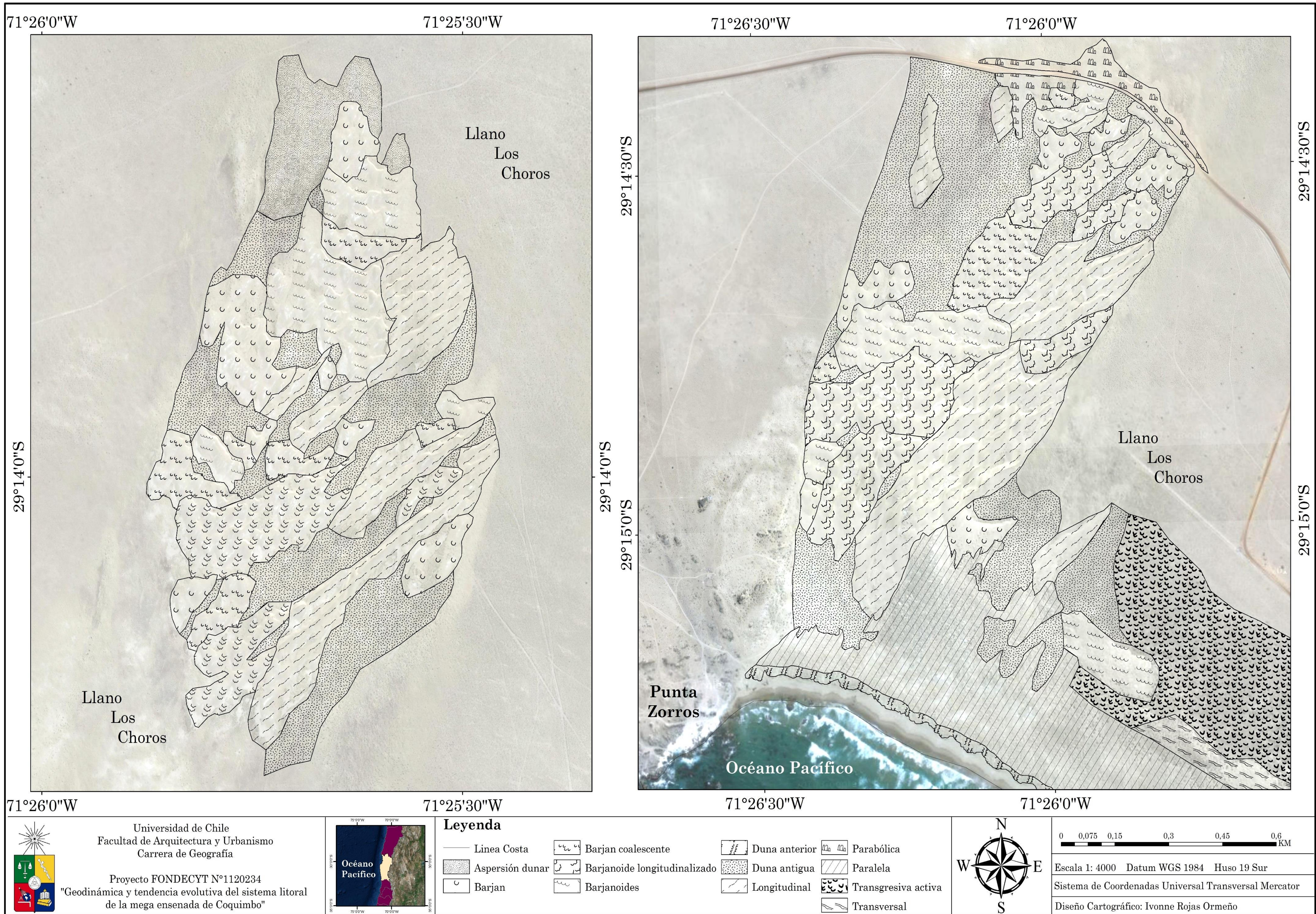


Figura 9: Dunas Activas año 2014, Campo distal. Ensenada Choros. Fuente: Elaboración Propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Además, cuenta con la presencia de formas que pertenecen al *continuum* de dunas anteriores, aunque a diferencia del campo proximal, en su frecuencia estas son mucho mayor, limitándose al desarrollo de dunas tipo longitudinal. Sin embargo, este campo presenta una característica que no se identifica en el campo proximal. Partes del campo que no se encuentran completamente cubiertas por las arenas, las cuales corresponden a dunas inactivas heredadas que forman parte de la ensenada y que de acuerdo a Creixell et al. (2012) cubren terrazas de abrasión marina.

Las dunas activas que se encuentran asociadas a la línea de costa actual—al igual que el campo proximal y distal—muestran formas con gran complejidad, esto se ve reflejado en la presencia de dunas anteriores alargadas, con una gran masa vegetal y dunas paralelas que abarcan los 15 kilómetros de extensión de la bahía. Donde se puede identificar nebkas. Las dunas anteriores se encuentran estabilizadas.

Finalmente, en la zona que se encuentra dominada por dunas inactivas, la cual corresponde a la mayoría del campo dunar, no es posible la distinción de formas dunares individuales debido a que están conformadas por montículos de arena compactada y vegetada de manera natural. Estas corresponden a dunas heredadas. Lo que sí es posible identificar son *beach ridges* o cordones de playa (Fig. 10), los cuales son un indicador de la evolución en el modelado litoral de la ensenada.



Figura 10: dunas antiguas, y cordones de playa (*beach ridges*), demuestran la dinámica de procesos geomorfológicos que han moldeado el desarrollo del campo dunar por años. Fuente: Aqueveque (2008).

1) Dunas anteriores

Se encuentran dominadas por vegetación, manteniendo un patrón paralelo a la dirección del viento dominante. Asimismo, su densidad y frecuencia se ve disminuida en las partes media y distal de la ensenada.

En la zona proximal (Fig. 11) se aprecian estas ya estabilizadas, alcanzado una altura que varía desde 8 a 15 metros, con un peak de 21 metros (Anexo 1a). Paralelamente, el desarrollo de estas cambia notoriamente en la bahía. Especialmente el cambio ocurre en toda la playa ubicada al norte de la desembocadura de la quebrada Los Choros. Con esto, la primera diferencia corresponde a la disminución en la cubierta vegetal que presentan las dunas. Donde la mayoría se ve sobrepasada por arenas que invaden y alteran formas y desarrollos. Sumado que las playas disipativas, como el caso de la ensenada Los Choros, son típicamente anchas, tienen el mayor potencial de suministrar sedimentos en la costa arenosa, y los campos dunares costeros son huéspedes de estas playas.



Figura 11: Dunas anteriores, zona proximal bahía. Fuente: Aqueveque (2008).

Un aspecto relevante para establecer cuáles son los procesos actuales que permiten tanto formación de antedunas como su desarrollo, corresponde a la morfología que estas denotan frente a la playa. Lo que contribuye a comprender su extensión longitudinal y latitudinal. Con esto, las dunas anteriores muestran una estabilidad que se atribuye a efectos estacionales, la poca incidencia de tormentas, una amplia zona de rompiente y una playa de

100 metros desde la zona de máxima saca hasta el primer cordón de dunas anteriores (Anexo 1b) y la continua alimentación de sedimentos. Lo anterior se ve reflejado en el comportamiento de la playa durante los meses de invierno cuando hay mayor eventos de tormenta y la acción destructiva de las olas es revelada, creando acantilados en algunas dunas anteriores. El recorte que producen estos eventos deja como efecto una playa arenosa con una extensión de 21 metros, cubierta en rodados (Fig. 12).



Figura 12: Dunas anteriores y playa, zona media ensenada. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.

Entonces, como las antedunas son controladas por la vegetación—lo que sucede en el área de estudio—el abastecimiento y el material son constantemente re-trabajados por las acciones del mar y el viento, el resultado que se obtiene es un cordón de antedunas a lo largo de toda la ensenada que se va regenerando (Fig. 13), indicando que los procesos formacionales se dieron en circunstancias variadas, por lo anterior, se asume que tales procesos pertenecen a sucesos de índole estacional.



Figura 13: Dunas anteriores, zona distal ensenada. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.

2) Dunas paralelas

Fue posible apreciar el desarrollo de dunas barjanas en los corredores de deflación (Fig. 14). Que sucede específicamente en el campo de dunas libres en la parte proximal de la ensenada, que han interrumpido sistemáticamente el desarrollo de estas y de las dunas paralelas, tal como se ha observado en un periodo de 13 años. Expresado en la pérdida de formas, vegetación y debido a la fuerte acción del viento, la exposición de las dunas antiguas donde se emplazan las dunas libres.



Figura 14: desarrollo de dunas barjanas entre cordones de dunas paralelas, campo proximal. Fuente: Aqueveque, (2008).

El desarrollo de las dunas paralelas (Fig. 15) se da a lo largo de la ensenada, al igual que ocurre con las dunas anteriores, intrigante en una gran expansión que son capaces de lograr en algunas zonas del área de estudio, por ejemplo, en el sector proximal existen cordones que logran una extensión de 800 metros aproximadamente hacia el interior.



Figura 15: Cordones de dunas paralelas. Fuente: Aqueveque (2008).

Por lo mismo, es importante mencionar el cambio que se presenta en este tipo de dunas antes y después de la desembocadura de la quebrada Los Choros. En términos de la densidad vegetal que estas presentan, y la forma perpendicular a la línea de costa se vuelve menos clara. Esto genera un patrón visible al momento de fotointerpretar imágenes del área de estudio.

Por último, cabe destacar que estas dunas siguen avanzando, todo el cordón delimita la duna transgresiva activa, lo que genera zonas de contacto dinámicas e interesantes como el desarrollo de dunas paralelas en medio de esta (Anexo 2), generando diferentes puntos a lo largo de la ensenada con dinámicas similares, aunque es importante mencionar que estos ocurren con mayor frecuencia hacia el norte de la desembocadura de la quebrada.

3) Dunas Transversales

Este patrón transversal (Fig. 16) domina en algunos sectores en el área de estudio, específicamente en el campo ubicado en la zona proximal, siendo los cordones que se ubican en medio de este, entre las dunas de tipo barjanoide, los que poseen la mayor superficie de todas las dunas de este tipo. Así como las dunas de este tipo que se encuentran más cercano a la terraza marina ya que muestran un tamaño más limitado.



Figura 16: Dunas transversales, campo proximal. Fuente: Aqueveque (2008).

En las dunas transversales que se encuentran contiguas a las dunas barjanoide es posible observar crestas con longitudes, tamaños disímiles y orientación N.W.-S.E., las que reducen su magnitud mientras avanzan hacia el interior, lo que se explica en la diferencias que el campo presenta en su frente de avance, el cual se va dispersando a medida que las dunas se acercan a la quebrada Los Choros, donde los afloramientos de dunas antiguas se hacen más claros dentro del campo y se evidencia una predominancia de dunas tipo barján. También el volumen de sedimento es menor en este sector y la fuerza del viento disminuye

hacia el interior. Por lo tanto, se infiere que la morfología actual responde al patrón trazado por el viento dominante que viene del S.W.

Otro fenómeno que tiene presencia en el área de estudio corresponde a eventos de coalescencia entre crestas, lo que se manifiesta entre una asociación lateral entre formas con variados tamaños, pero pertenecientes a la misma familia de dunas (Fig. 17, flechas). Este fenómeno tiene como consecuencia un aumento en el largo de las crestas, el tamaño de la duna, también en volumen y espaciamiento que hay entre estas, lo que finalmente termina produciendo una disminución en la velocidad de avance del cuerpo dunar.



Figura 17: Eventos de coalescencia (indicado por flecha). Fuente: Elaboración propia en base a imagen satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

4) Barjanoides

Este tipo de dunas (Fig. 18) se emplaza en ambos campos de dunas libres que constituyen el área de estudio, siendo la forma dominante con una mayor frecuencia. Sin embargo presentan grandes diferencias entre las dunas que se desarrollan en el campo distal y proximal.



Figura 18: Dunas barjanoides, campo proximal. Fuente: Aqueveque (2008).

Las primeras presentan un mayor distanciamiento entre las crestas, esto debido a la unión de los flancos laterales de las dunas que genera un aumento en el largo de estas, el tamaño y volumen de la duna. Aunque la principal diferencia reside en la longitudinalización de barjanoides en el campo distal. Primero, se dan procesos de coalescencia en este tipo de dunas. Pero también ocurre que convergen dos formas dunares que pertenecen a familias diferentes (Fig. 19, flechas): barjanoides y longitudinales. Asimismo, se ve una velocidad de avance mayor, pero en la mayoría de las formas se produce erosión que contribuye a la longitudinalización con ayuda de los vientos predominantes. En esta zona del área de

estudio los vientos predominantes vienen del S. lo que propicia aún más este fenómeno en dunas barjanoides.



Figura 19: Coalescencia de formas pertenecientes a familias diferentes, campo distal. Indicado por flechas
Fuente: Elaboración propia en base a imagen satelital. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Por su parte, los procesos de coalescencia del campo proximal, coinciden con el fenómeno que ocurre en las dunas de tipo transversal, es decir, se genera una clasificación natural entre formas de similar tamaño, y por consiguiente tasa de migración que se mantiene constante en esta zona desde 1997 que es la fecha más antigua con la que se trabaja en esta investigación.

La dirección de avance de estas es hacia el interior, respondiendo a la dirección predominante del viento (S.W.) y se generan procesos de compresión entre las formas, en este caso en el campo proximal, debido a la extensión de la dunas paralelas, lo que reduce el desarrollo de dunas barjanoides en el sector. Así como estas se disponen en las zonas que lo hacen las dunas transversales que limitan con la terraza marina, permitiendo la creación de relaciones genéticas que permiten que las dunas transversales y los barjanoides, sean el resultado de la coalescencia de barjanoides y subsecuentes formas; o estas encuentran obstáculos que las obligan a realizar un realineamiento de sus crestas (Fig. 20).



Figura 20: Realineamiento de dunas barjanoides producto de presencia de barreras topográficas, campo proximal. Las líneas de color marcan las barreras. Fuente: Elaboración propia en base a imagen satelital.
Proyecto Fondecyt N° 1120234.

5) Barjanes y Barjanes Coalescentes

Este tipo de duna se encuentra presente en toda el área de estudio, la diferencia radica en cómo se ubican y distribuyen dentro su respectivo campo (Fig. 21). Así mismo, se presenta en algunas zonas esporádicamente, lo que no permite establecerlos como grupo conjunto en lugares específicos, lo cual es típico en este tipo de formas dunares. Las formas que se identifican corresponden a tres diferentes: barjanes aislados, barjanes coalescentes, barján con cuernos alargados.



Figura 21: Dunas barjanes y barjanes coalescentes, frente de avance, campo proximal. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.

Estas categorías generalmente se encuentran asociadas a otras dunas de la familia de los barjanes como dunas tipo barjanoide y transversal. Razón por la que es posible encontrarlos en una posición preferente a sotavento de los cordones y crestas de mayor tamaño (Fig.22), siendo la pérdida de masa debido a dispersión y erosión resultado de una transmutación hacia formas más pequeñas como son barjanes y barjanes coalescentes.

Por su parte, la orientación general de los barjanes—ya sean aislados o coalescentes— responde a la dirección predominante del viento, lo que es evidencia de la formación y del consiguiente desarrollo en la duna.



Figura 22: Ubicación dunas barjanes a sotavento de cordones barjanoides. Flechas amarillas indican posición de barjanes mientras flechas rojas indican dunas barjanoides. Fuente: Elaboración propia, en base a imagen Google Earth. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

Sin embargo, los barjanes con cuernos alargados (que de acuerdo a su nombre poseen una mayor longitud en uno de sus cuernos) y que en el área de estudio se ubican contiguos a las dunas paralelas. Por la posición de los campos dunares y por la evolución que caracteriza a este tipo de duna, no se consideran temporáneos en su formación respecto a barjanes aislados y barjanes coalescentes, ya que deberían ser relativamente antiguos en términos de génesis.

Usualmente las dunas de tipo barjánico se manifiestan dentro del área en forma discontinua y esporádica, formando parte de sucesiones que conectan con otras dunas pertenecientes a la misma familia, principalmente en el campo proximal, y conformado el frente de avance cordones que avanzan y cubren la terraza marina, por lo que es posible identificar su avance en zonas con menor cantidad de dunas, zonas de dunas estabilizadas.

6) Parabólicas y Longitudinales

Ambos tipos de dunas (Fig. 23) se encuentran presente en el campo distal, las dunas parabólicas que se encuentran en el campo tienen una función y una génesis muy específica, ya que solo se presentan en una zona en toda el área de estudio, la cual se encuentra dividida por la ruta D-116. Antiguamente, la ruta seguía una dirección paralela hacia la localidad de Los Choros, pero con el continuo avance y crecimiento del campo dunar, este tuvo que ser relocalizado, bordeando el campo dunar, que finalmente termino creciendo y desarrollándose en dos partes. Sin embargo, las dunas parabólicas, no alcanzan un mayor desarrollo, se apoyan de pequeños montículos de vegetación para mantener su forma.



Figura 23: Dunas longitudinales, campo distal. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Mientras tanto, las dunas longitudinales (Fig. 24, 25 y 26) son de gran importancia en el campo distal. Ya que el fenómeno que permite la longitudinalización de dunas barjanoides, es el causante del desarrollo y crecimiento de las dunas longitudinales que ya dominan el campo. La principal razón por la que dunas barjanas pudieron dar origen a dunas longitudinales se atribuye a procesos de trasmudación que son visibles en zonas dentro del área de estudio. Paralelamente las dunas longitudinales (Anexo 3) contribuyen al avance del campo en términos de ocupación en el territorio. La principal diferencia que aportan estas dunas corresponde a que la cantidad de formas es mucho menor en este campo al compararse con la frecuencia de dunas en el campo proximal. También, los corredores que separan a estas dunas se encuentran desprovistos de arenas, lo que es bastante común para estas formas, contribuyendo aún más al bajo abastecimiento de este campo.



Figura 24: Vista general dunas longitudinales, campo distal. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.



Figura 25: dunas longitudinales, y cordón de precipitación campo distal. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*



Figura 26: Duna "mayor" longitudinal. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.

ii. Identificación de cambio de las condiciones generales en las formas dunares

Entre las principales características de la playa Los Choros es posible mencionar su forma: recta, orientada en dirección NW – SW, expuesta a la deriva y los vientos provenientes del SW. En costas que muestran una posición relativa transversal, existe una tendencia a una concentración en la energía del oleaje, que destaca una acción erosiva, y una mayor probabilidad de depositación de sedimentos (Araya-Vergara, 1982, 1986, 1996).

Ello concuerda con las características que presenta el litoral cercano en la ensenada Los Choros: una zona de surf con una playa extensa disipativa de alta energía; así como también la orientación es una característica que convierte a esta zona en un área propicia para el desarrollo de sistemas dunares, lo que ocurre en la actualidad. Por su parte, en la zona de alta playa se desarrollan evidencias de erosión, que han sido observadas mediante imágenes satelitales de diferentes años; o que permitió observar la existencia de secuencias de *beach cusps*, lo que indica la energía del oleaje. Sin embargo, se desarrollan dunas incipientes que se encuentran asociadas a la vegetación, lo que deja ver las excepciones que ocurren en esta ensenada.

Ahora bien, en cuanto al litoral cercano también son importantes las características de este para distinguir la relación existente entre la playa y la zona de rompiente, donde la energía del oleaje y la capacidad de abastecer sedimentos en el litoral (Araya-Vergara, 1996) son fundamentales para el desarrollo, en el caso de la ensenada Los Choros, campos dunares.

Villagrán (2007), ha identificado la dinámica de comportamiento que presenta la zona de rompiente en la ensenada Los Choros, la cual fue clasificada en el rango disipativo (de acuerdo a la clasificación de Wright & Short, (1984)). Paralelamente, la autora identificó el ancho de la zona de rompiente desde 460 m. en la zona proximal, hasta 850 m. en la zona distal de la ensenada; donde contabilizó aproximadamente siete líneas de rompiente (cinco líneas en la zona media y tres a cuatro líneas de rompientes en la zona proximal), lo que concuerda con una alta energía de oleaje. Dado lo anterior, las interacciones que se llevan a cabo en la zona de rompiente juegan un papel destacado en el abastecimiento de los sistemas dunares. (Araya-Vergara et al. 1991, en Villagrán, 2007; Benavente, 2015).

a. Variación en las condiciones temporales y espaciales en años 1997 – 2002- 2014 dentro del área del estudio.

El área de estudio ha pasado por diferentes etapas durante 17 años, lo que le ha permitido mutar y evolucionar en distintas velocidades y formas. Generando una dinámica bastante peculiar dentro del desarrollo normal de un sistema dunar. Así mismo, la baja demografía que existe en el área de estudio permite mantener la morfología bien conservada, ya sean geoformas o procesos morfogénicos que se encuentran asociados al desierto costero transicional.

En este sentido, la evolución dunar se ve marcada por diferentes episodios que han influido en ella. El primero corresponde al fenómeno ENSO de 1997, durante los meses de Junio y Agosto, que afectó con gran fuerza la Región de Coquimbo. Sin embargo, hay factores que se mantienen constantes con el paso de los años. El principal es el viento, uno de los más importantes para el desarrollo y transporte en los campos dunares. De acuerdo al explorador eólico del departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y el Ministerio de Energía, en un promedio anual desde 1980 hasta 2010 la velocidad del viento en el área de estudio se desenvuelve entre los rangos de 4.0 - 4.5 m/s. (Fig. 27 y 28)

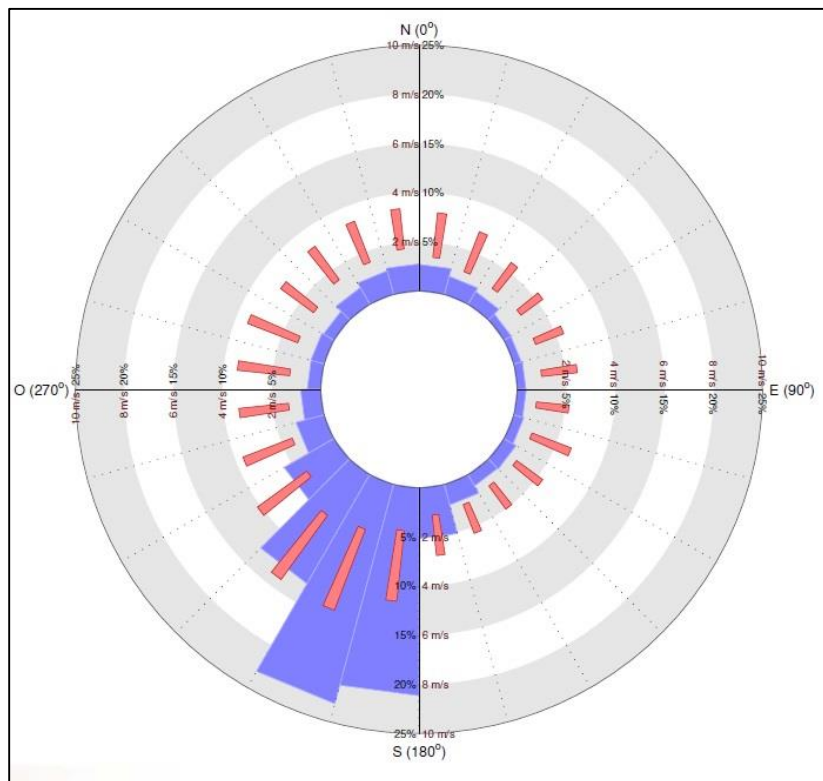


Figura 27: Rosa de los vientos campo proximal. Área de estudio. Fuente: elaborada en reporte explorador eólico, FCFM.

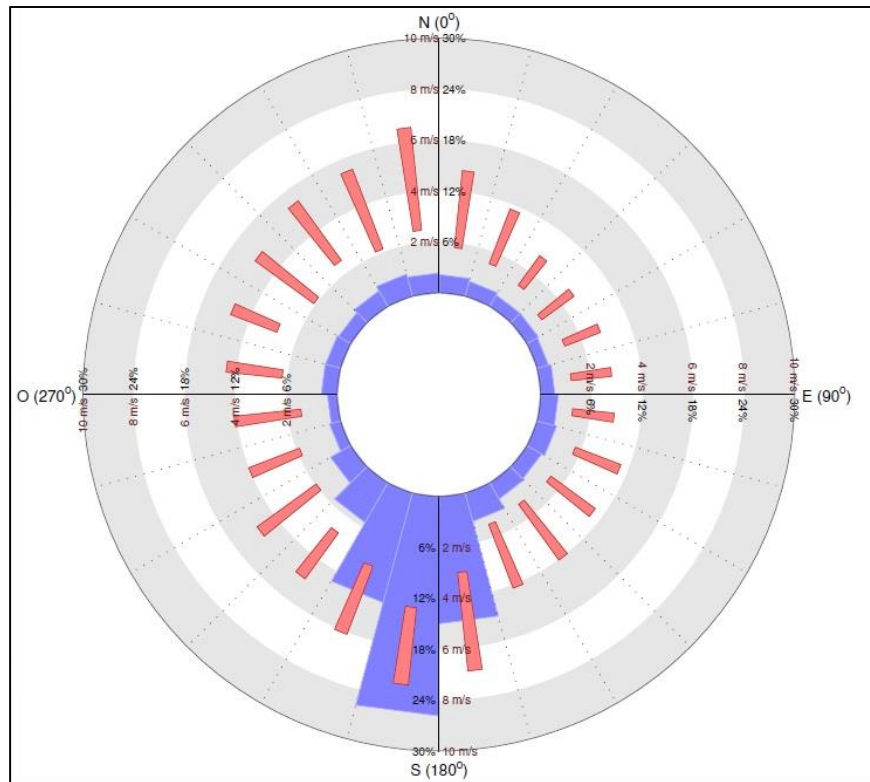


Figura 28: Rosa de los vientos, campo distal. Área de estudio. Fuente: elaborada en reporte explorador eólico, FCFM.

Por otro lado, un cambio importante que ha presentado el área de estudio corresponde a la longitudinalización y transversalización de las dunas, especialmente en el campo distal, el cual ha sido exponente de los cambios con mayor impacto. Para Enero de 1997 (Fig. 29), este campo tenía solo formas longitudinales (Anexo 8) que se extendían varios kilómetros hacia el interior. A medida que trascurren los años siguientes es posible apreciar (mediante imágenes satelitales y aéreas históricas) el avance del campo y la variabilidad en la longitudinalización y subsecuente transversalización de las dunas barjanoides que se desarrollan en los sectores más cercanos a la costa hasta la actualidad.

Por su parte el año 2002, muestra una avanzada longitudinalización en varias zonas del campo distal, mientras que en el campo proximal, una transversalización completa de sus formas. Esto debido a que no hay variaciones drásticas en los factores principales (dirección y velocidad del viento, aporte de sedimentos, orientación de la línea de costa, energía del oleaje y el estado de la zona de surf) dentro del área de estudio, sin embargo las diferencias son notorias. Tal como la exposición de superficie de dunas antiguas, que es más notoria en el campo distal nuevamente, con un énfasis especial en las zonas que presentan una longitudinalización, específicamente en dunas de tipo barjanoide.

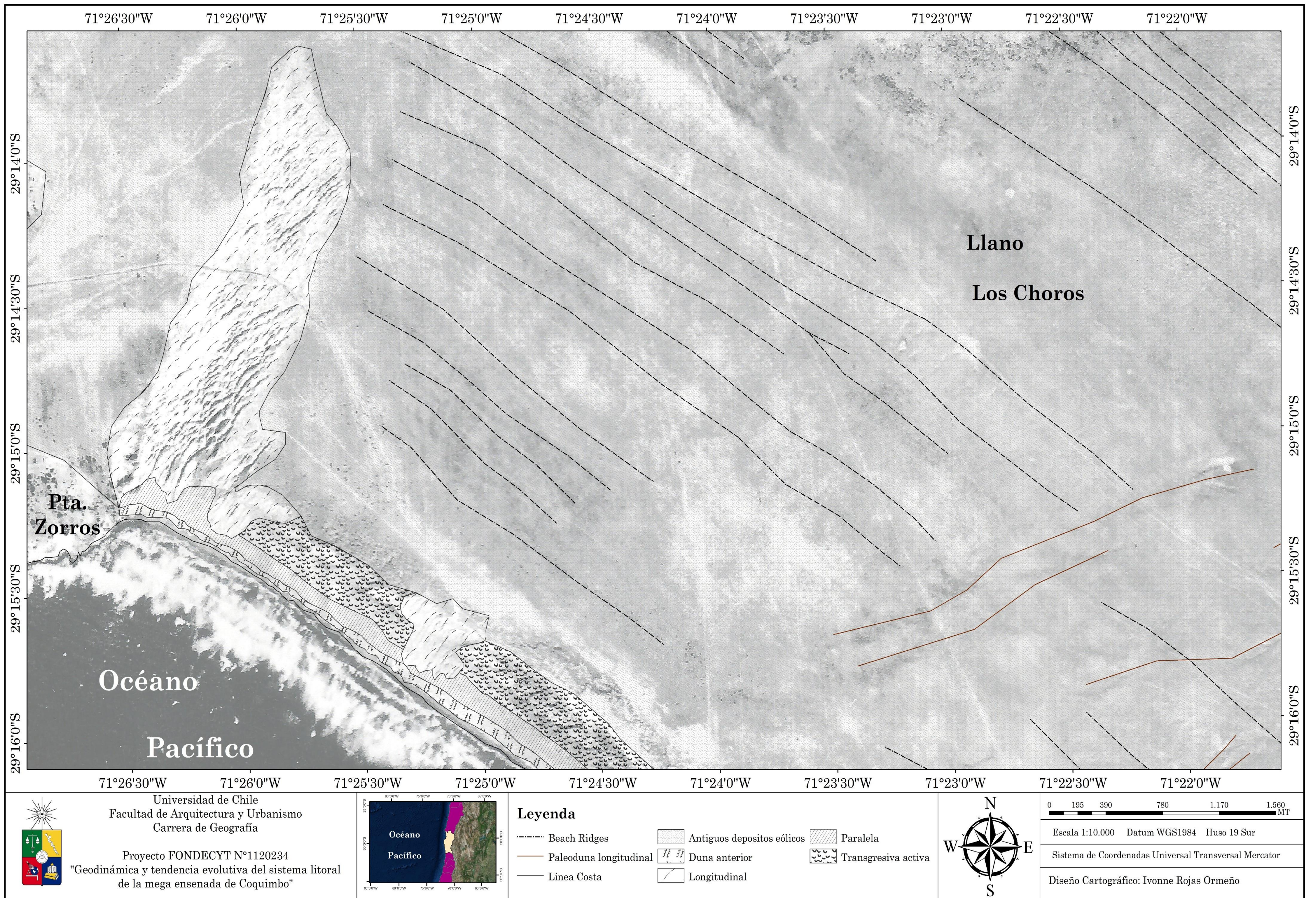


Figura 29: Dunas Activas año 1997, Campo distal. Ensenada Choros. Fuente: Elaboración Propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

En 1997 el campo proximal (Fig. 30) presenta una longitudinalización en todas sus formas, que corresponden a dunas barjanoides y transversales. No presenta espacios en que sea visible la superficie de dunas antiguas (como ocurre en 2002 y 2014). Por su lado, la evolución de las dunas paralelas se ve limitada a la mitad de la extensión que presentan en la actualidad. La gran diferencia radica en el avance de ambos campos: el proximal no presenta un que se desprende del cuerpo principal del campo, paralelamente el campo distal posee una extensión mayor, especialmente en las zonas septentrionales y también hacia el interior del Llano Los Choros (Anexo 4).

Hay que considerar el aporte de sedimentos como el único factor que influye en cambios o secuencias evolutivas espacio-temporales. Donde alto aporte de sedimentos desde la playa permite la evolución y desarrollo de dunas anteriores que a su vez gestionan el desarrollo de campos transgresivos de dunas libres.

De igual importancia, la posición de la costa (relativa transversal) marca una tendencia con respecto a la concentración de la energía del oleaje así como una tendencia erosiva, un mayor porcentaje de depositación de sedimentos. En el caso de la ensenada Los Choros, al encontrarse en una posición transversal se encuentra expuesta de forma directa a la acción del oleaje. Por consiguiente, la orientación de la línea de costa convierte al área de estudio en una zona propicia para el desarrollo de sistemas dunares—lo que claramente acontece. Tal como, Castro (1985) propone a las planicies litorales bajas y amplias como un factor adecuado para la ubicación de estos sistemas, ya que proveen espacio que las formas dunares necesitan para su evolución.

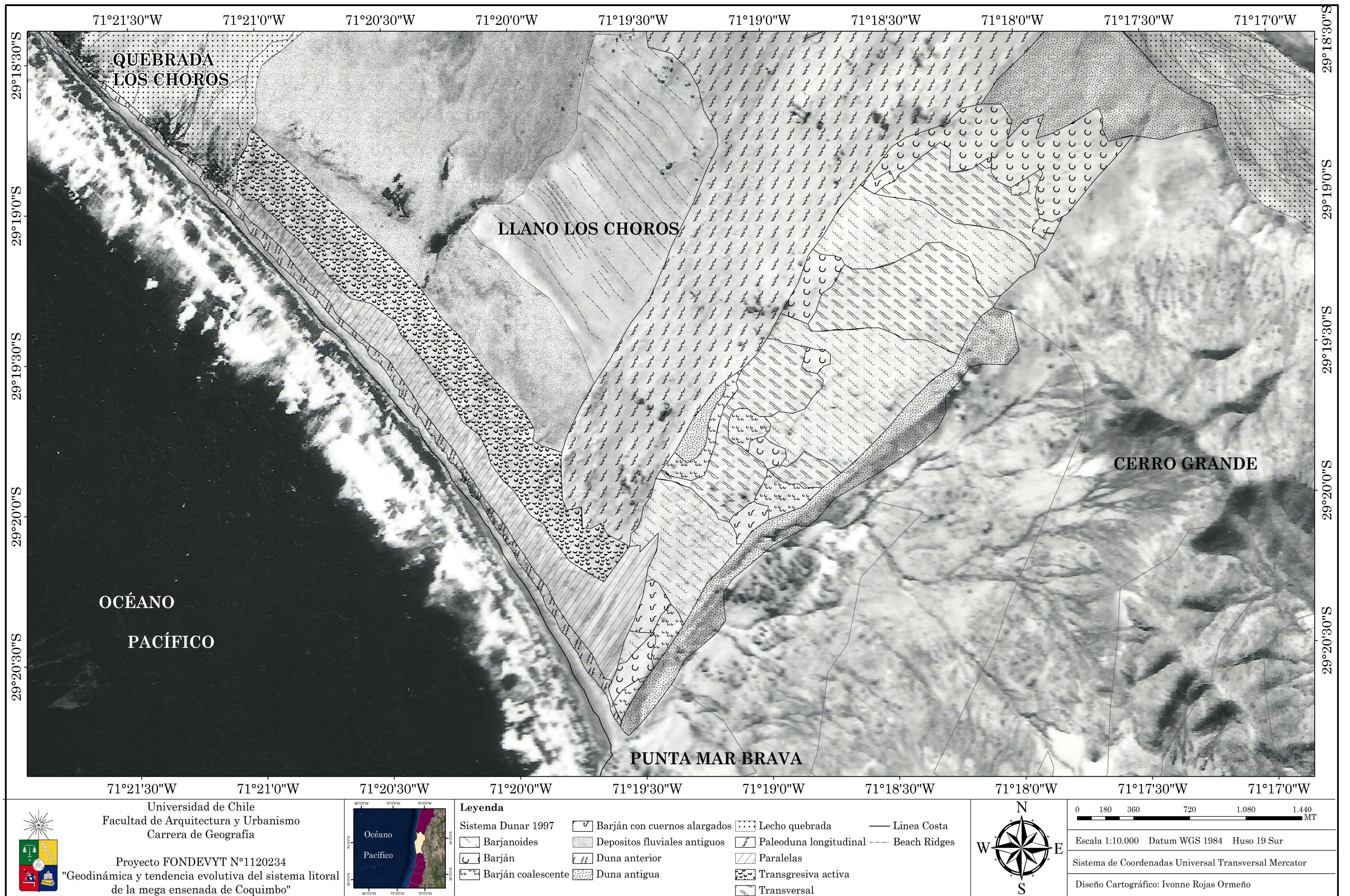


Figura 30: Dunas Activas año 1997, Campo proximal. Ensenada Choros. Fuente: Elaboración Propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

iii. Estados de cambio evolutivos de las formas dunares activas en la ensenada Los Choros.

Por medio de la identificación de imágenes satelitales históricas y fotografías aéreas de la ensenada Los Choros, fue posible identificar las condiciones de cambio de las formas dunares en ambos campos activos. Las comparaciones se dan en un lapso de 17 años. A través de la comparación de los campos tanto en 1997, 2002 y 2014 fue posible identificar cuánto han variado las formas dunares, específicamente, en que etapas se encontraban hace diecisiete, doce y un año atrás (Fig. 7, 9, 29, 30, 31 y 32). Como se mencionó anteriormente, el aporte de sedimento es el factor principal que actúa en los cambios evolutivos espacio-temporales. La comparación de imágenes en diferentes años y trabajo en terreno evidencia la presencia de formas dunares que están ligadas a la acreción y abastecimiento de arenas, como las dunas anteriores y paralelas.

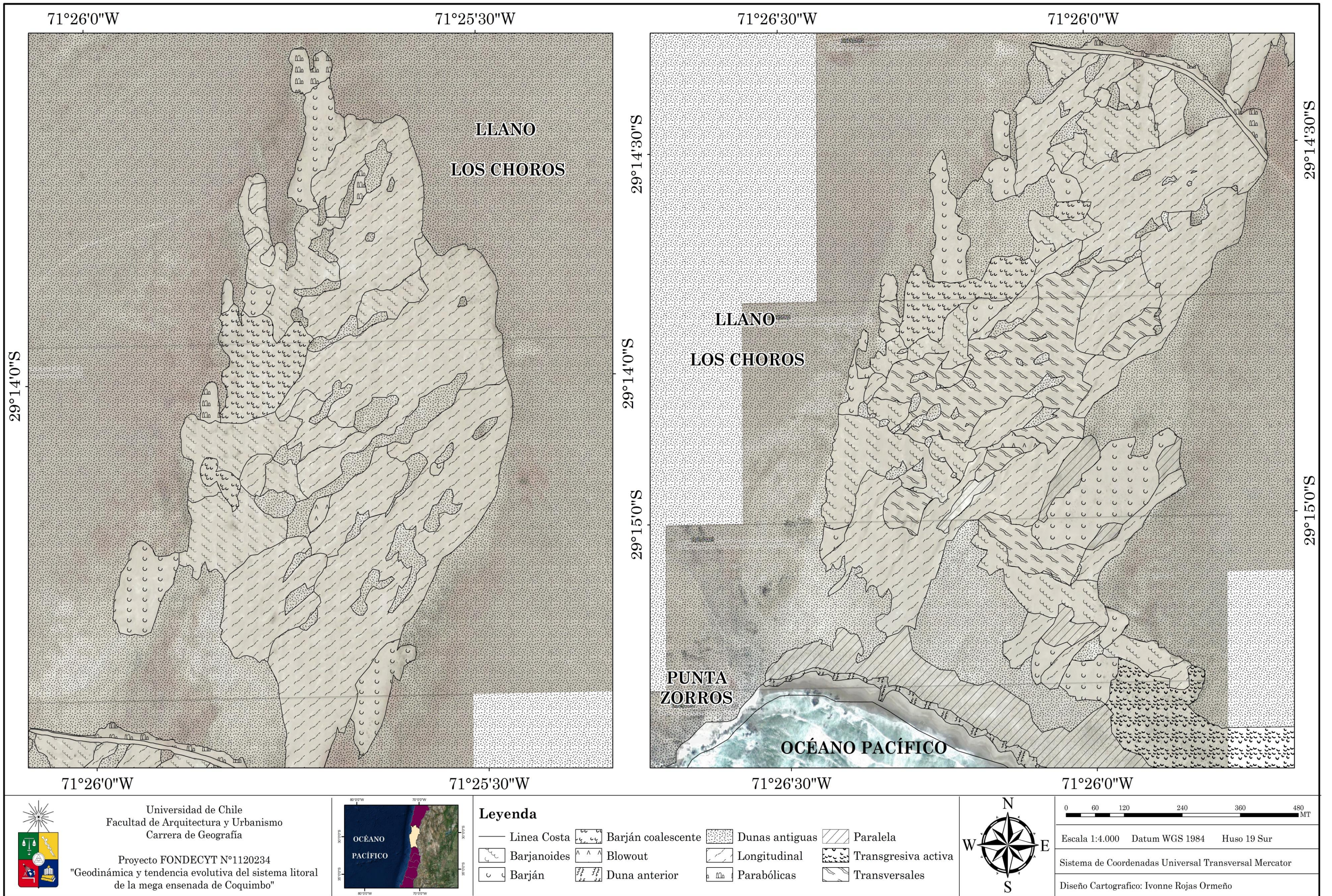


Figura 31: Dunas Activas año 2002, Campo distal. Ensenada Choros. Fuente: Elaboración propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

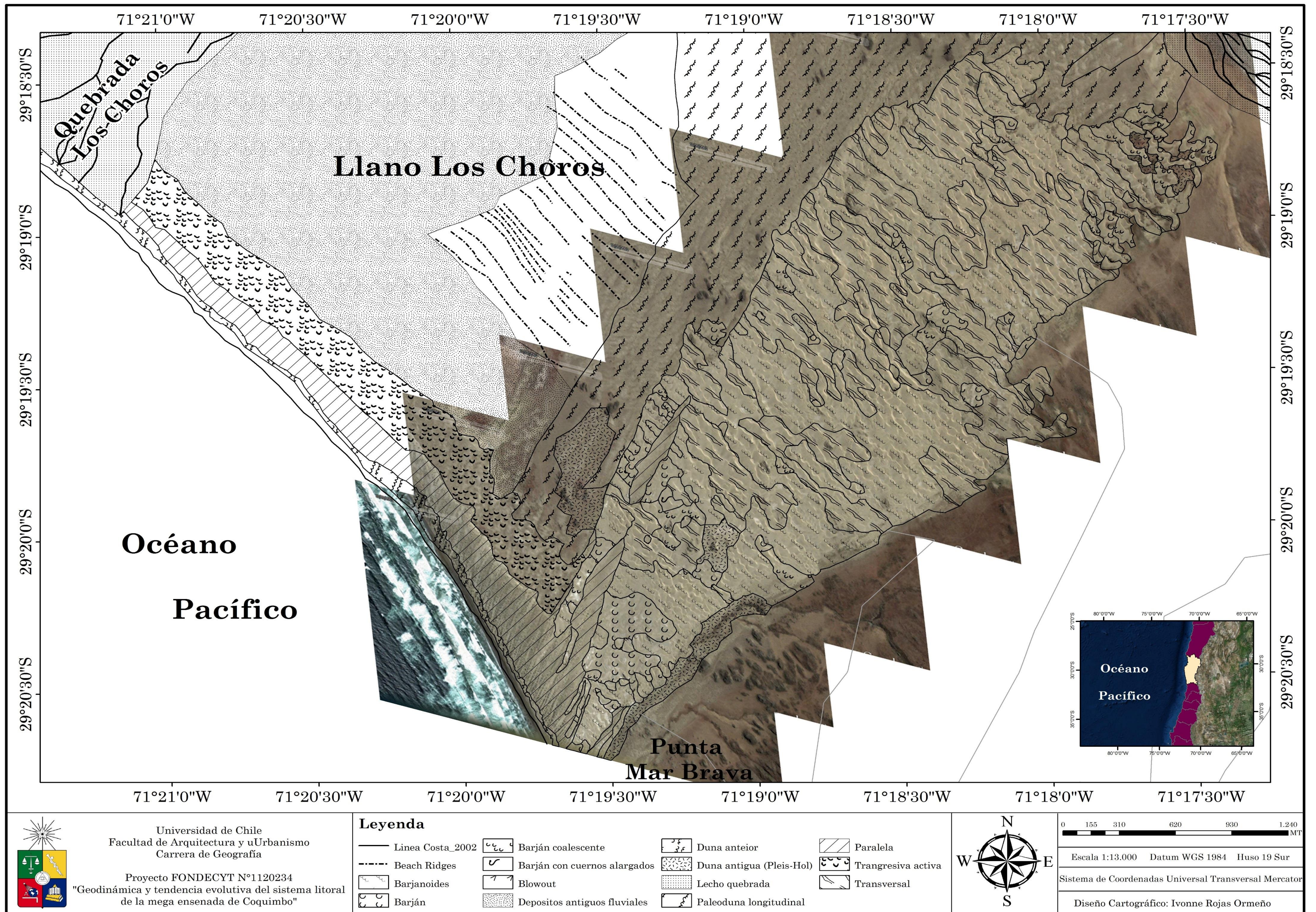


Figura 32: Dunas Activas año 2002, Campo proximal. Ensenada Choros. Fuente: Elaboración propia. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Un ejemplo de lo anterior se aprecia en las figuras 33 y 34, las cuales muestran el frente de avance del campo proximal. Para el año 2002 se identifican claramente barjanes como formas dominantes en la zona. Se puede apreciar como estos progradan, en la coalescencia de sus brazos. Mientras que la imagen correspondiente al año 2014 muestra que el frente ha cambiado, ya no se reconocen claras formas individuales, sino que en su mayoría corresponden a barjanes coalescentes o que han cabalgado sobre otros, cubriendo más el terreno.



Figura 33: Frente avance campo proximal, año 2002. Fuente: Elaboración propia en base a imagen Google Earth. Proyecto Fondecyt N° 1120234.



Figura 34: Frente avance campo proximal, año 2014. Fuente: Elaboración propia en base a imagen Google Earth. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

Por su parte el frente de avance en 1997 presentaba barjanas y barjanoides que se encuentran levemente longitudinalizados, con énfasis en las zonas septentrionales del frente. A su vez, comparte la característica con 2014, que no quedan expuestas partes de las dunas antiguas pleistocénicas. También, la masa no se ve dividida en dos columnas sino que el frente avanza de forma gradual y paralela.

Paralelamente en el frente distal también se da el mismo fenómeno. Es posible identificar diferencias en la evolución dentro del período de 17 años. Ya que este obstaculiza la ruta D-116, los cambios son más notorios. En el año 2002, el campo se encontraba más cercano a pesar de las obras para evitar la invasión de la vía, mientras que en el año 2014 se aprecia una separación bastante mayor entre los sectores norte y sur respectivamente, también la variación en su ancho, tal como en las formas existentes, ya que se aprecia una diferencia en la cantidad de barjanas que se desarrollan en este.

Por su parte el sector sur (Figuras 35 y 36) muestra diferencias en su tamaño y en la evolución de las formas existentes. Si bien el campo se encuentra separado, los procesos se dan homogéneamente en este, ejemplo de esto es el cambio en tamaño, específicamente el ancho, lo cual se comienza a apreciar en 1997. Si bien el ancho se mantiene hasta 2002, hay sectores en que no hay formas dunares emplazadas. Luego en 2007, el campo va perdiendo amplitud. En el caso de las formas, fue posible identificar la evolución de estas dentro del *continuum*, un ejemplo de esto es el cambio desde duna paralela a *blowout*, también se evidencia el cambio de dunas transversales a barjanoides, repitiendo el patrón de involución a formas con tasas de avance mayores.

También, es importante destacar en durante 1997 y 2014 el campo distal ha expuesto mayor parte de la superficie en la que se encuentra emplazado, la cual corresponde a las dunas inactivas, dunas antiguas heredadas.



Figura 35: Zona sur campo distal, año 2002. Fuente: Elaboración propia en base a imagen Google Earth.
Proyecto Fondecyt N° 1120234.



Figura 36: Zona sur campo distal, año 2014. Fuente: Elaboración propia en base a imagen Google Earth.
Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Como se ha mencionado con anterioridad, el aporte de sedimentos es considerado el factor más relevante dentro del desarrollo de cualquier campo dunar en una playa disipativa de alta energía, un perfil de elevación (para las imágenes satelitales a las que se tuvo acceso) permite identificar en que zonas de cada campo dunar se deposita la mayor cantidad de sedimentos, generando formas dunares con mayor volumen. Se realizaron dos perfiles: dos para el año 2014. Con su inicio en el norte de cada campo y su fin en la zona de las dunas anteriores (Anexos 4 y 5). Comparándolos con los realizados por Castro & Brignardello en 2002 (Castro & Brignardello, 2005) (Anexos 6 y 7).

Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes imágenes:

- Perfil campo distal año 2014: para esta fecha (23 de agosto), el campo (Fig. 37) ha variado, la zona septentrional ha presentado una mayor acreción, las formas presentes ya no corresponden a dunas longitudinales, sino que a dunas barjanoides que se encuentran en proceso de longitudinalización, lo que le da una dinámica diferente a la distribución de arenas y por consiguiente a la altura que tendrán las formas. Aunque la altura máxima se mantiene en 32 metros, las formas que le siguen han aumentado su altura a un máximo de 28 metros.

Sin embargo, se mantiene el patrón anterior en la intersección de la ruta D-110. La altura disminuye, pero a diferencia de lo que ocurre en 2002, la altura en esta área alcanza 14 metros.

Por otro lado, la altura mínima se establece en 6 metros, lo que ocurre en la zona de contacto de las dunas libres con las dunas paralelas, a diferencia de lo que sucede en 2002, la Duna Mayor¹ alcanza una altura de 29 metros, acentuando la noción de constante alimentación de las formas a medida que pasan los años.



Figura 37: Perfil de elevación campo distal, año 2014. Elaboración propia en base a datos de elevación obtenidos de imagen satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

- Perfil campo proximal año 2014: la dinámica que se desarrolla en este campo (Fig. 38) se asemeja a los niveles de la terraza marina, donde, las formas con mayor altura se dan en las zonas de la terraza cercana al escarpe de la quebrada Los Choros y dunas barjanas que se encuentran formadas recientemente, alcanzan alturas de 88 metros. Por su parte las dunas con una génesis antigua alcanzan alturas de 110 metros. Los sectores que se encuentran cercanos a la playa cuentan con menores alturas por parte de sus formas dunares. Ejemplo de esto corresponde a barjanoides (63 metros), dunas transversales (35 metros), barjanas (21 metros); para luego culminar en dunas paralelas (13 metros) y dunas anteriores (5 metros).



Figura 38: Perfil de elevación campo proximal, año 2014. Elaboración propia en base a datos de elevación obtenidos de imagen satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

- Perfil campo distal año 2002: Castro & Brignardello (2005), realizaron este perfil en un sector del campo dunar (Anexo, 10) desde las dunas anteriores hasta la ruta D-110. Los resultados muestran la condición del campo para esta fecha (Fig. 39), con

¹ Duna longitudinal cercana a la playa, nombrada así por lugareños.

dunas que no superan una altura de 35 metros. Pero que demuestran los lugares dentro del campo dunar en el que se aglomera el aporte de sedimentos. Dunas tipo longitudinal se emplazaban en estas áreas, con alturas de 14 metros. La Duna Mayor no se encuentra en el área que abarca el perfil, por lo que no es posible saber cuánto ha variado la masa en 12 años.

El resto de las formas dunares muestran alturas similares a las de 2014, formas barjanoides alcanzan entre 20 a 25 metros. Por su parte, las dunas paralelas alcanzan alturas de 12 metros. Por otra parte, la altura mínima se da en dunas anteriores (3 metros); en la que se evidencian los procesos de *cut and fill*.

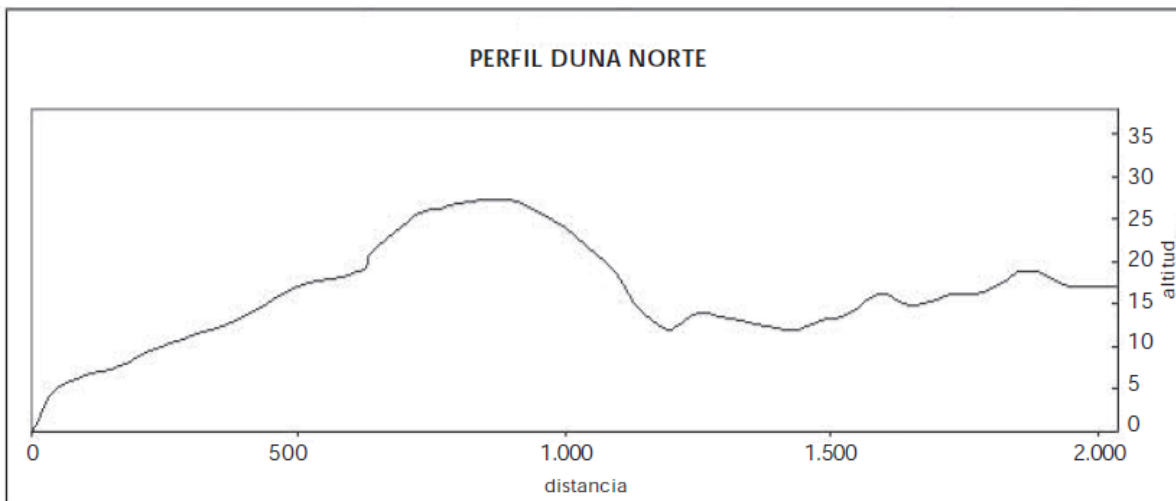


Figura 39: Perfil de elevación campo distal, año 2002. Fuente: Castro & Brignardello, (2005).

- Perfil campo proximal año 2002: Al igual que el perfil anterior, este tampoco comprende la extensión completa del campo proximal (Anexo 6). Asimismo, también presenta un patrón fuertemente asociado a los niveles de la terraza marina como se distribuyen las arenas depositadas (Fig. 40). Comparable a lo que sucede en 2014, las dunas presentan alturas relativas entre los 13 y 35 metros. En aquella fecha, las dunas enmarcadas en esta zona corresponden a barjanoides y transversales. Por su parte, las zonas asociadas a dunas paralelas junto con barjanoides y barjanes (que se desarrollan entre estas) alcanzan alturas de 15 metros, para luego descender drásticamente a medida la zona del perfil se encuentra con dunas anteriores, donde la primera fila de estas en la playa alcanza alturas hasta 5 metros.

De acuerdo a lo evidenciado en el perfil correspondiente a 2014, las mayores acumulaciones se dan en la zona media del campo, patrón que se ha mantenido durante 12 años.

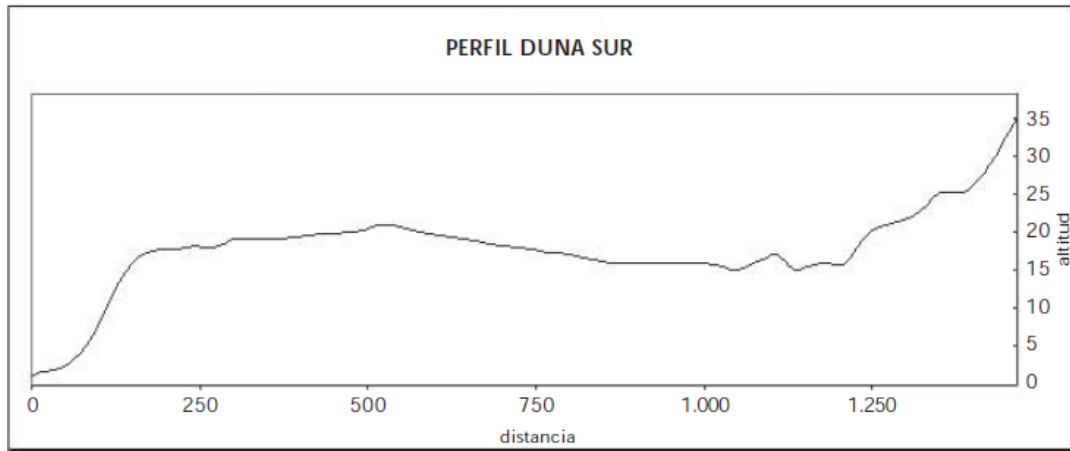


Figura 40: Perfil de elevación campo proximal, año 2002. Fuente: Castro & Brignardello, (2005).

En otro orden de cosas, los cambios afrontados por las formas en ambos campos dunares durante más de una década, fueron separados por forma, identificando los cambios con mayor significancia dentro de estas.

a. Dunas transversales

El patrón transversal se encuentra en toda el área de estudio, con una mayor presencia en el campo proximal. Específicamente, el área media de este, superficie que se ha mantenido durante 12 años. Sin dejar de lado las modificaciones menores que se han dado debido a la evolución de las formas.

Los procesos de coalescencia que ocurren en este tipo de dunas generan una clasificación natural entre formas que poseen tamaños similares, así como tasas de migración. Pero como se ha observado entre 1997, 2002 y 2014 han habido variaciones. Se infiere que una disminución en el aporte de sedimentos produjo erosión en este tipo de forma dunar o algún grado de degradación, resultado en una transmutación hacia cuerpos de menor tamaño con velocidades de deslazamiento que superan a las dunas tipo transversal, en el caso del campo proximal: barjanes y barjanes coalescentes (Fig. 41).



Figura 41: Transmutación de dunas transversales en dunas de menor tamaño. Imagen izquierda: 2002; Imagen derecha: 2014. Fuente: Elaboración propia en base a imagen Satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

En el mismo orden de cosas, es posible observar en estas formas crestas de longitudes y tamaños disimiles, las que reducen su magnitud a medida se acercan y alejan de la costa debido a que en parte el aporte de sedimentos y la fuerza de los vientos varían a lo largo del campo. También, la orientación de las crestas corresponde a N.W., lo que da cuenta clara que su morfología actual es una respuesta a la dirección del viento dominante (S.W.).

Paralelamente, a través de las imágenes satelitales de varios años es posible observar cómo se producen eventos de coalescencia entre las crestas, donde la principal asociación ocurre entre cuerpos de distintos tamaños, pero que pertenecen a la misma familia de dunas, lo que trae como resultado, un aumento en el volumen y espacio, lo que hace que el

desplazamiento sea más lento, lo que finalmente tiene como consecuencia cambios en los patrones temporales evolutivos de estas formas, como se mencionó anteriormente.

Al comparar algunos de los rasgos de los cuerpos en sectores hacia el interior con cuerpos que se encuentran más cercanos a la costa, el espaciamiento entre las crestas y el tamaño de las dunas es mayor. Por lo que se infiere que las dunas en aquellas secciones son más antiguas en su génesis; esto gracias a tamaño, espaciamiento, posición geomorfológica relativa de la forma se consideran como factores al momento de estimar la antigüedad relativa de esta, al no poseer herramientas de datación absolutas. De acuerdo a lo cual, las dunas transversales que se ubican hacia el interior del campo proximal presentan vegetación en su cara a sotavento, principalmente se aprecia *Ambrosia chamissonis*, que proliferan en varias dunas transversales (Fig. 42). Ello implicaría que su grado de estabilización es mayor que las dunas que se ubican más cercanas a la costa. Lo que posteriormente fue corroborado al ver etapas de estas dunas en 2002 versus 2014.



Figura 42: Dunas transversales, campo proximal. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.

Por otra parte, en el campo distal las formas transversales han sufrido un destino similar, en 2002 si bien no contaban con una gran presencia, han transmutado hacia formas de menor tamaño como barjanes y barjanes coalescente. Sin embargo, no todas las formas siguen este proceso, ya que en su mayoría las dunas que en 2002 son de tipo transversal en 2014 corresponden a dunas longitudinales (Fig. 43), con presencia de barjanoides, donde la característica principal corresponde a la longitudinalización de las formas, gracias a la acción eólica y la posición de la línea de costa frente a esta.

En 2002, las formas dunares eran numerosas y con poco volumen, mientras que en 2014, si bien son numerosas, su cantidad no se compara con la existente doce años atrás, el volumen de estas ha aumentado, exhibiendo dunas más robustas en sus caras de barlovento con umbrales de desplazamiento más largos y deduciblemente abastecimiento mayor.



Figura 43: Transmudación de dunas transversales en dunas de menor tamaño, como también cambio a dunas longitudinales. Imagen izquierda: 2002; Imagen derecha: 2014. Fuente: Elaboración propia en base a imagen Satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

b. Barjanes, barjanes coalescentes y barjanoides.

Una de las formas con mayor presencia y proliferantes durante 2014 en el área de estudio corresponde a las dunas de la familia de los barjanes. Esta familia, como gran unidad es posible apreciar a simple vista, en terreno la presencia de *ripple marks* y el efecto deflacionario en sus crestas (Fig. 44). De la misma forma, estas dunas se encuentran distribuidas de manera errática a través de ambos campos dunares. Varían en sus tamaños, se pueden observar grandes barjanes en el frente de avance en el campo proximal. Aunque se deja ver una dicotomía entre estos mismos, ya que tras de estos grandes barjanes se observan unos más pequeños de menor masa y volumen. Los barjanes aislados que se desarrollan en la zona media del campo tienen una masa mayor y una cara de deslizamiento prominente, donde la acción eólica tiene mayor eficacia a barlovento. Se atribuye la razón al hecho de que se encuentran rodeados de formas mayores en tamaño, volumen, lo que redirige el abastecimiento de arenas hacia el cuerpo del barjanes. De similar forma, los barjanes que se desarrollan en el campo distal en su mayoría se encuentran en coalescencia o han iniciado el proceso (Fig. 45), lo que demuestra una dinámica muy diferente a la que se da en campo proximal, a una distancia parecida desde la costa. Estas dunas se desarrollan con mayor espacio entre ellas, lo que les permite evolucionar de forma más armónica de acuerdo a los patrones evolutivos de la familia de los barjanes.

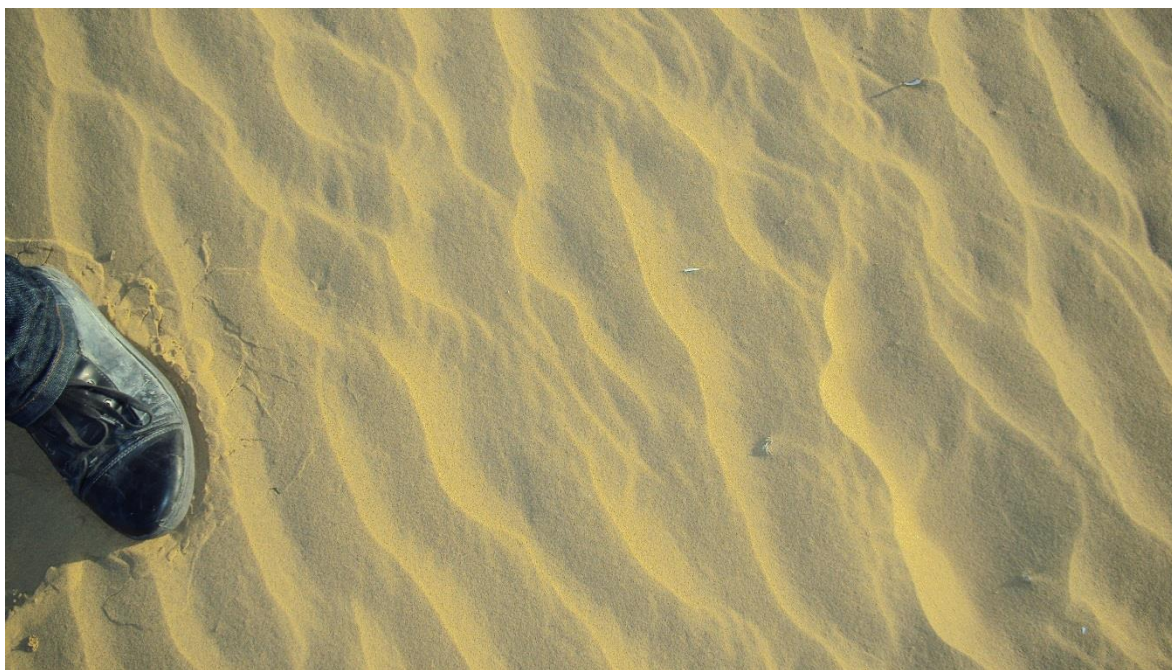


Figura 44: *Ripple marks*, en duna barján. Campo distal. Fuente: *Proyecto Fondecyt N° 1120234*.

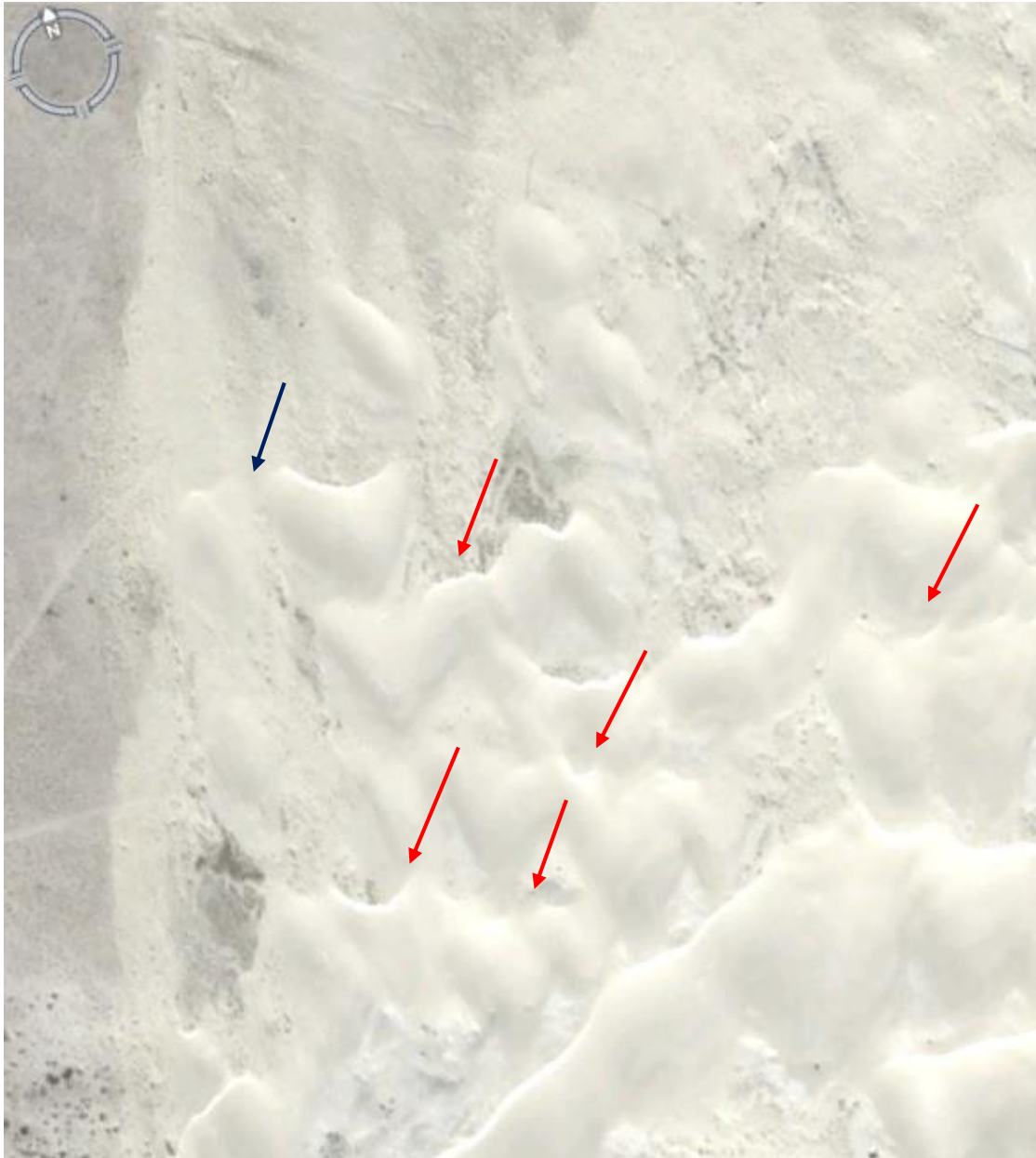


Figura 45: Barjanes campo distal, 2014. Flechas rojas indican coalescencia, flechas azules indican futuros eventos de coalescencia. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

En contraste en 2002, se apreciaban más barjanes aislados comparados lo que sucede en 2014 dentro del campo distal, lo que evidencia la capacidad evolutiva de las formas presentes en el campo, transformándose posteriormente en dunas barjanoides, que con ayuda de la acción del viento se convierten en dunas longitudinales, dominando el campo. Mientras que en el campo proximal, los barjanes aislados se comportan de manera similar, tienen una mayor presencia y se distribuyen de manera errática. En la zona de contacto con

las dunas paralelas, los barjanes presentan un gran espaciamiento entre ellos, con una mayor acción eólica y aporte de sedimentos concentrados en los cuernos de las dunas, denotando su avance dentro del campo. Por su parte, una característica que tienen estas formas es que presentan un cuerno alargado, que en la mayoría de estos casos se une con otro barján que cabalga dentro del campo. También, los barjanes coalescentes se desarrollan en el frente de avance del campo, junto con más barjanes, que posteriormente y en las zonas interiores del campo evolucionan a barjanoides (Fig. 46).



Figura 46: Barjanes y barjanes coalescentes en frente de avance. Campo proximal, año 2002. Flechas rojas indican cuernos alargados, flechas azules coalescencia, flecha amarilla indican barjanoides. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

La orientación general de los barjanes aislados y coalescentes responde a la dirección predominante del viento, lo que evidencia que estas tienen una formación y desarrollo actual. En el caso de los barjanes con cuerno alargado muestran una longitud mayor en uno de sus cuernos, para el caso del campo proximal corresponde al cuerno derecho. Por su posición relativa en el campo (en la terraza marina) y por el tipo de evolución característica

de estas formas, no se pueden considerar como contemporáneos en su formación a barjanos y barjanos coalescentes, ya que deberían ser más antiguos en su génesis.

En el caso de los barjanoides, durante el paso de todos los años analizados, estas son las formas dominantes en el área de estudio. En 2002 se observan dos patrones diferentes en su localización. En el campo distal, si bien se emplazan en todo el campo, se encuentran limitados en su desarrollo a las zonas occidentales de este, mientras que en 2014 también se ubican en las mismas zonas. Sin embargo, se encuentran en proceso de mutación, ya que como se ha mencionado en capítulos anteriores, este tipo de duna se está longitudinalizando, lo que cambia su morfología original, espacialización y avance.

Continuando con esta lógica, en el campo proximal, en 2014 los barjanoides se comportan de manera diferente. Otro ejemplo de transmutación dentro de los procesos evolutivos del área de estudio: estos se desarrollan principalmente en las áreas posteriores a las dunas transversales, las que se encuentran en las zonas medias del campo, que han disminuido en número desde 1997 hasta 2014. Primero, los barjanoides se emplazan en todo el campo, exceptuando las zonas de contacto con la terraza marina, es decir, los límites laterales. Segundo, se encuentran rodeados por dunas de su misma familia, principalmente barjanos y barjanos coalescentes. Tercero, estas dunas barjanoides tienen una gran expansión. Sus cordones pueden alcanzar hasta 500 metros en extensión.

Con respecto a lo que ocurre en 2002, la imagen presenta diferencias pero no es diferente. Las formas dominantes nuevamente corresponden a los barjanoides, seguido de barjanos y barjanos coalescentes. Una de las diferencias radica en que en 2002 los barjanoides que se desarrollaban en el campo, sí llegaban a los límites laterales y los cordones alcanzaban extensiones de 350 metros. Quizás la diferencia con más peso es la cantidad de dunas transversales que se encontraban en el campo en aquella fecha y que en la actualidad son barjanoides, lo que se atribuye a un re-trabajo en las arenas que alimentaban estas dunas.

Finalmente, en 1997 se da una dinámica completamente diferente; en el campo distal no se identifica ninguna duna de tipo barjanoides, sino que este campo se desarrolla solo dunas longitudinales (Anexo 8). Mientras que en el campo proximal se aprecian con claridad la gran dominancia de los barjanoides (Anexo 9), los cuales muestran las mismas características mencionadas en párrafos anteriores: gran extensión de los cordones, compactación entre las formas dunares dentro del campo, distribución errática en algunas zonas y evidencias de transmutación a formas menos evolucionadas que permiten un desplazamiento veloz.

c. Dunas anteriores

Quizás este tipo de dunas es el que evidencia los mayores cambios durante los diferentes años investigados. Como se mencionó en capítulos anteriores, estas se encuentran dominadas por la vegetación, tienen variaciones a lo largo de la ensenada con respecto a su densidad vegetal y la frecuencia de la que estas se emplazan en zonas medias y distales.

En cuanto a los estados de desarrollo que estas presentan durante los años relevantes para esta investigación se identifican claramente las diferencias (Fig. 47). Primero, en 1997, se aprecia menor cubierta vegetal, pero existen grandes parches de vegetación en sectores de la playa que se mantienen hasta 2014 (Fig. 48). También la baja representación de *nebkas* dentro de las dunas anteriores más evolucionadas. También, la marcada separación entre estas y las dunas paralelas subsiguientes (Anexo 10). A su vez, una característica principal de las dunas anteriores durante todos los años investigados, corresponde al cambio en su patrón de emplazamiento inmediatamente al norte de la quebrada Los Choros, donde estas son casi imperceptibles en las fotografías aéreas, se ven invadidas por arenas, por lo que el número aproximado de dunas no es posible saber, y por último no se identifican *nebkas* en esta zona.



Figura 47: Dunas anteriores, campo distal (Izquierda 2002; Derecha 2014). Fuente: Elaboración propia en base a imagen satelital. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*



Figura 48: Playa y dunas anteriores, se evidencia duna anterior erosionada. Fuente: Aqueveque (2008).

Un fenómeno interesante corresponde al desarrollo de parches vegetacionales, o más bien, vestigios de estos, a aproximadamente 4 kilómetros desde la quebrada Los Choros, muy cerca de la zona de máxima saca durante marea alta, lo que evidencia un proceso de *cut and fill* activo en la playa.

Luego, en 2002, la dinámica es un tanto diferente. En la zona proximal se aprecia el desarrollo de *nebkas*, la primera zona del cordón es una aglomeración de *nebkas* y dunas anteriores estabilizadas, donde se identificaron líneas delimitadoras de vegetación que las separan entre ellas. Al distanciarse del campo proximal, comienzan a aumentar grosor, espesor y tamaño, también su cubierta vegetal aumentó, generando una diferencia entre ellas.

A diferencia de 1997 no se distingue una depresión interdunaria que las separe de dunas paralelas. Las zonas aledañas a la quebrada se identifican solo dunas embrionarias y *nebkas*, con mínima vegetación asociada, y patrones erráticos de establecimiento. Luego de la quebrada Los Choros, hacia el norte, se aprecian montículos de dunas anteriores que forman cordones aglomerados y relativamente compactados, a su vez no se encuentran estabilizadas, lo que infiere por la escasa vegetación que estas presentan en su cúspide.

A cuatro kilómetros del campo distal (divididos por un bloque de dunas libres longitudinales) se desarrollan dos zonas de dunas anteriores que se caracterizan por la gran cubierta vegetal que las rodea, la compactación y el claro patrón lineal, casi no se aprecian *nebkas*, a 23 metros de la zona de máxima saca lo que les permite mayor tiempo de evolución y estabilización. Asimismo, estas se adhieren al patrón que establecen los *beach cusps* (Fig. 49) presentes en esta zona de la ensenada, creando un límite cóncavo y convexo a las olas que rompen en la playa.



Figura 49: *Beach cusps*, zona distal ensenada. Año 2002. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital. Proyecto Fondecyt N° 1120234.

Para la zona inmediata al campo distal, en 2002, las dunas anteriores se encontraban dispersas a 30 metros de la línea de máxima saca, con un patrón lineal claro. Las dunas tienen gran presencia de vegetación, a primera vista se ven estabilizadas, pero se ven invadidas por arenas, prácticamente haciendo desaparecer la vegetación sobre estas, permitiendo el desarrollo de dunas libres a 40 metros de las anteriores.

En 2014, la zona adyacente al campo distal muestra mayor número de dunas anteriores, con claros niveles de estabilización. Los sectores que en 2002 se encontraban dominados por arenas libres, son parches vegetacionales asociados a dunas anteriores en desarrollo, aglomeradas; nuevamente se aprecia el proceso de invasión de arena en estas formas. Dentro de lo mismo, las áreas en que se emplazaban dunas longitudinales han cambiado, en el año más reciente se desarrollan dunas paralelas. También, es importante destacar que en 2014 mantienen la línea delimitante de los *beach cusps* que se desarrollan en la playa, a medida que las dunas se desarrollan en la zona media y proximal de la ensenada, van perdiendo esta línea delimitadora, así como el desarrollo de *beach cusps* también disminuye. Todas las dunas anteriores de la zona media y distal de la ensenada están

invadidas por arenas, lo que hace un tanto difícil distinguir la vegetación dominante en imágenes satelitales, ya que se encuentran cubiertas.

Ello responde a la *Condición Global de Ataque* que presenta la ensenada, la cual tiene un valor de >30 (Villagrán, 2007), demostrando la alta energía del oleaje y la acción dinámica del litoral en la playa y por consecuente en las dunas.

Por último, a 19 metros en la playa desde la quebrada hacia el sur se aprecia el mismo patrón de emplazamiento e invasión que en 1997, que en zonas siguientes muestra clara diferenciación entre dunas anteriores, nebkas y dunas paralelas.

d. Dunas longitudinales

Estas dunas son las recurrentes y dinámicas en toda el área de estudio (Fig. 50). Si bien sólo se encuentran presente en el campo distal (sin contar las paleo dunas longitudinales que se encuentran cercanos a la quebrada dentro del llano Los Choros, Anexo 11).

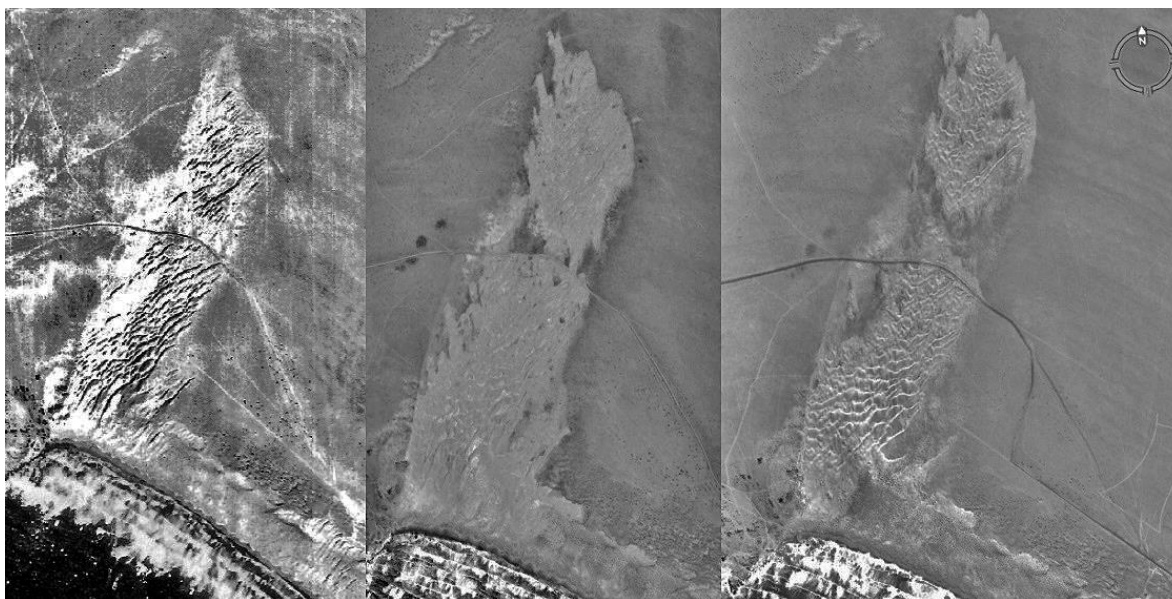


Figura 50: Evolución dunas longitudinales en campo distal. De izquierda a derecha 1997, 2002 y 2014.
Fuente: elaboración propia en base a fotografías aéreas e imágenes satelitales. *Proyecto Fondecyt N° 1120234.*

En 1997 estas dominaban por completo el campo distal (Fig. 29), de acuerdo a las fotografías aéreas obtenidas fue posible identificar por medio de estereoscopia que todas las formas que en el año se desarrollaban al campo corresponden a dunas longitudinales, con claras diferencias en tamaño y volumen. También, en la zona septentrional del campo las dunas longitudinales muestran gran espaciamiento entre las crestas. La dirección del viento dominante permite el desarrollo de estas dunas por cientos de metros dentro de la zona de alimentación contribuyendo a la longitudinalización del campo y sus formas.

En 2002 (Fig. 31), hay una mayor presencia de otras formas pertenecientes a la familia de los barjanos (coalescentes, barjanoides, aislados), en desmedro de las dunas longitudinales que hace 5 años dominaban el campo. Así mismo, el espaciamiento que se daba en el sector septentrional del campo se ha reducido drásticamente, con la presencia de formas diferentes. Paralelamente, las dunas se agrupan en diferentes áreas, dunas pertenecientes a

la familia de los barjanes se ubican en sectores occidentales, mientras que dunas longitudinales se ubican en zonas orientales. Desde 1997 hasta 2002 se evidencia una mayor transmutación hacia formas menores, lo que trae como consecuencia mayor evolución y avance de formas más pequeñas.

Finalmente, en 2014 (Fig. 9), las dunas longitudinales (que nuevamente se desarrollan en el campo distal) han disminuido notoriamente, con una gran predominancia de dunas barjanoides, que gracias a la acción de vientos dominantes del S.W. se encuentran en un proceso de longitudinalización, con énfasis en las dunas que se ubican al oeste en el campo. Sectores que en los años anteriores se emplazaban dunas longitudinales en la actualidad exponen la cubierta de dunas antiguas.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

i. Ensenada Los Choros: zona de origen de procesos y formas de dunas

En los sistemas costeros se desarrollan distintas relaciones entre los actores que son parte de ellos, ya sean ciclos, transformaciones en sus niveles de energía, en el transporte de los sedimentos, cambios en la morfología y condiciones ambientales—ejemplo de ello es ENSO (El Niño) y la Oscilación Década del Pacífico (Sarricolea & Martín-Vide, 2012) —que juegan un rol importante en la evolución de estos ambientes, donde la hidromorfodinámica tiene un rol fundamental (transporte de sedimentos, morfología y condiciones ambientales). Las formas que se desarrollan en zonas con mayor cercanía a la costa muestran una mayor variabilidad temporo-espacial, lo que se ha visto plasmado en diferentes investigaciones en Chile central: Martínez (2001), Soto (2005).

Autores como Araya-Vergara (1986; 1996), Soto (2005), Martínez (2001) han concluido que en las partes más extensas y anchas de los sistemas dunares se encuentran en las zonas distales de ensenadas, en una posición relativa de orientación transversal, en ambientes de rompiente de tipo intermedias. Lo anterior se ve reflejado en la Ensenada Choros, la cual presenta un extenso campo dunar, con un ambiente disipativo de alta energía, con grandes acumulaciones de arenas.

De acuerdo a conclusiones de diversos autores: “en las partes más extensas y anchas de los sistemas dunares se encuentran en las zonas distales de las ensenadas, en una posición relativa de orientación transversal, en ambientes de rompientes de tipo intermedias” (Araya-Vergara, 1986, 1996; Soto, 2005). Lo que se cumple en la ensenada Los Choros, con una zona de rompiente de tipo disipativa de alta energía, la cual presenta un extenso campo dunar con acumulaciones arenosas de magnitudes altas. Sin embargo, si bien la ensenada posee áreas con mayor extensión en la zona distal, la zona proximal presenta un campo de dunas a primera vista, con mayor cantidad de sedimentos aportados. Lo anterior se relaciona con los procesos característicos de *headland-bay beach*.

En este sentido, la identificación de los tipos de dunas presentes en este gran campo, permite comprender las condiciones de abastecimiento que se dan desde la playa. El desarrollo y evolución de estos campos cuenta una dinámica especial (las clasificaciones de dunas permiten entender ciertos procesos). Existen ocasiones en que las interacciones morfodinámicas que se dan en los sistemas dunares no se adhieren a la teoría adecuadamente, debido al relieve confuso de muchas dunas costeras desafía una descripción simple (Carter et al., 1990; Paskoff y Manríquez, 2004).

A su vez, Hesp (2013) realiza modelos de evolución de campos dunares transgresivos. Estos modelos intentan responder cómo se inician, qué controla los cambios que se observan en: tipo de cobertura vegetal, tipo y tasas de crecimiento, cambios en el nivel del mar, suministro de sedimentos, energía del viento y la dirección relativa de la orientación de la línea de costa, energía del oleaje y estado de la zona de surf y clima.

Hesp (2013), menciona tres escenarios, de los cuales el primero se aplica a la ensenada Los Choros. Este escenario (*Scenario 1 — development from the backshore*) se conciben 5 etapas para un campo dunar desarrollándose desde la playa y migrando hacia el interior en un ambiente templado. En el caso de la ensenada, el clima semiárido influye en el desarrollo del campo, del cual se aplican 4 de las 5 etapas.

Etapa 1: el campo dunar comienza como un simple manto transgresivo, móvil, activo. Caracterizado por dunas transversales, transversales sinuosas y barjanoides. El desarrollo del gran campo dunar en la ensenada Los Choros, se puede atribuir a este proceso, el cual se ve reflejado en la duna transgresiva estabilizada (Fig. 1) la cual presenta vestigios de dunas barjanas y longitudinales.

Etapa 2: el campo dunar continúa creciendo de manera ascendente. La colonización de vegetación puede ocurrir en ese sector permitiendo el desarrollo de nebkas. En el área de estudio, esta etapa se evidencia en el desarrollo y estabilización de las dunas anteriores (Fig. 51) y paralelas. También la recurrente existencia de nebkas en la misma zona. Tal como la aspersion y subsecuente alimentación permite el desarrollo y avance de dunas libres en los campos.



Figura 51: Detalle duna anterior estabilizada erosionada, estacionalmente. Fuente Aqueveque (2008).

Etapa 3: el campo dunar migra gradualmente hacia el interior. Cordones de dunas transversales se arrastran y se forman humedales. En esta etapa la morfología de cordones es comúnmente ondulada. Esta etapa, se destaca mediante el análisis de fotografías históricas de la zona. La variación en los cordones de dunas transversales en las *transmudaciones* a dunas de menor evolución para lograr un mayor avance de estas es un indicador más de esta etapa. Así como lo es el desarrollo de dunas parabólicas (Anexo, 12).

Etapa 4: El campo dunar se vuelve largamente vegetado. Se forman dunas que se caracterizan por presentar morfologías de tipo *saucer* y *bowl*. La representación de esta etapa en el área de estudio se identifica en las formas complejas que toman los cordones al ir desarrollándose hacia el interior, esto es, al unirse cordones de dunas barjanoides, con ángulos diferenciales. Tales cambios han sido identificados por medio de imágenes históricas.

Etapa 5: En algunos campos dunares se da un re-trabajo de dunas que se encuentran estabilizadas por la aparición de *blowouts*. Estos canibalizan dunas mayores, la morfología final de la duna puede ser caótica. La quinta etapa es la que no se aplica aún al área de estudio, ya que las dunas estabilizadas no se han visto canibalizadas por *blowouts*, por lo que la morfología de la duna ha permanecido sin alteraciones que la conviertan en una forma caótica. Si bien se menciona el re-trabajo de formas como un fenómeno reciente, este es un suceso estacional y bastante puntual.

ii. Formas dunares en ensenada Los Choros

La identificación de tipos de formas existentes hizo posible la relación del avance de los campos con la evolución de las formas, mediante el concepto de *continuum* dunar de Araya-Vergara (1987), lo cual constituye evidencias del abastecimiento y acción de los vientos que llegan a la costa. En cuanto a la ubicación de dunas transversales, estas se presentan en zonas en las cuales existe abundante aporte de sedimentos, no así en zonas donde arena del campo puede terminar confinada debido a la presencia de barreras topográficas que impidan su avance, debido a la relativa marina en la zona de desarrollo de ambos campos dunares.

Las dunas que se emplazan cercanas a la costa generalmente reciben mayor cantidad de arena, en comparación con las dunas que se emplazan hacia el interior, esto porque se encuentran cercanas al área fuente y los vientos pueden ser más fuertes, lo que concuerda con el desarrollo de dunas barjanes, transversales y barjanoides en los corredores entre dunas paralelas (Fig. 14), de acuerdo a la teoría de Araya-Vergara (1986). Por su parte, las dunas hacia el interior (en ambos campos), muestran una forma con mayor volumen de masa, con crestas más largas y cordones ondulados.

De acuerdo a Astudillo (2011), quien examinó el patrón geoquímico y mineralógico, la cuenca del Limarí provee sedimentos finos (arenas y limos) y materia orgánica que corresponden a elementos minerales que en su mayoría provienen de roca sedimentaria, como: cobre, manganeso, molibdeno, zinc, cadmio, níquel, cobalto. Por su parte, Niemeyer (s.f.) señaló en su estudio de las hoyas hidrográficas de la Región de Coquimbo que la cuenca de la quebrada Los Choros transporta sedimentos de tipo arenas, areniscas marinas, limos y arcillas. También que se han encontrado en zonas costeras minerales como: cadmio, cobalto, manganeso. Los que teóricamente se pueden asociar a la cuenca del Limarí. Sin embargo, aún no se han publicado investigaciones que den esta correlación de aporte sedimentario por hecho o descartada.

Lo que lleva al estado evolutivo actual dentro de las familias evolutivas del *continuum*, es decir, formas con un estado menos evolucionado, con una menor disponibilidad de

sedimentos, pero con una tasa de avance mayor, lo que explica las formas que se encuentran en los frentes de avance de ambos campos. Así como el espaciamiento entre las formas, específicamente entre sus crestas, lo que se produce por los procesos de compactación que acompañan a las evoluciones, así como la coalescencia de dunas de menor tamaño que van comprimiéndose y superponiéndose entre sí. Tal como Araya-Vergara (1987) señala en su estudio sobre la evolución de los sistemas de dunas costeras en Chile Central, la proliferación de formas representa una evidencia para establecer el grado de estabilidad del campo dunar. Estos tipos de dunas se emplazan y desplazan de manera esporádica y no agrupada, demostrando que existe un constante proceso de erosión en las formas e indica que el campo dunar se mantiene activo.

Por su parte, la clara observación de dunas antiguas (Fig. 52) permite establecer la existencia de sistemas en el pasado que se encuentran conviviendo con dunas actuales, la que muchas veces cabalgan estas dunas en su avance. La longevidad de estas dunas, se debe a la resistencia que han demostrado ante procesos erosionales típicos en campos de dunas libres, gracias al desarrollo de vegetación en sus superficies que generan raíces y el subsecuente desarrollo de un suelo incipiente. Respecto a su antigüedad, por medio de observaciones preliminares por Soto (comunicación personal) y Creixell et al. (2012), estas se encuentran clasificadas como dunas Holocénicas – Pleistocénicas.



Figura 52: Dunas antiguas longitudinales, campo proximal. Fuente: Aqueveque (2008).

iii. Fases evolutivas de dunas en la ensenada Los Choros

Las condiciones de cambio en las formas presentes profundiza las explicaciones a la identificación de los tipos de formas existentes, ya que distintos factores como el tipo de zona de rompiente, la energía del oleaje, los cambios en la morfología, la topografía, el tipo de abastecimiento, la abundancia de este, permiten un entendimiento de las dinámicas que ocurren en la ensenada en una forma temporo-espacial. Que la ensenada mantenga su estado disipativo todo el año, acentúa los procesos de erosión, los cuales ponen en movimiento los sedimentos, que acompañados por los vientos predominantes y la deriva litoral entregan las condiciones para la sedimentación.

Los estados de cambio evolutivos de las formas presentes en los cambios, proveen de una percepción de los procesos que ocurren a lo largo de los años (Fig. 10), específicamente en el transcurso de 17 años. Lo que concuerda con un estado activo de los campos dunares, en constante cambio, el paso de una forma a otra denota evolución, dinámicas activas. Los estados se ven marcados por la disminución o aporte intermitente de los sedimentos, lo que conlleva a la *transmudación* de las formas hacia unas menos estables pero que poseen mayor velocidad de migración.

También, de acuerdo a Hesp (2013), se tiene muy poca información y comprensión de cuáles son los factores que conducen el cambio en el campo dunar. El cambio climático, con especial énfasis en las lluvias y la velocidad del viento pueden ser críticos. Esto con motivo de que se obtuvo acceso a fotografías aéreas de la ensenada en 1998 (desafortunadamente el dueño no quiso facilitar para utilizar en esta investigación), luego de los eventos de junio y agosto durante el niño de 1997, donde la dinámica se vio completamente alterada. Específicamente en el campo proximal, donde las formas longitudinales que predominan en 1997, cambiaron a formas transversales y barjanoides— sin indicios de longitudinalización en estas nuevas formas, hasta 2002, donde la longitudinalización en barjanoides comienza en sectores septentrionales; para dar génesis a nuevas dunas longitudinales que en la actualidad dominan el sector occidental del campo.

Este antecedente genera nuevas preguntas investigativas, que apuntan a identificar que suceso pudo haber influido de tal manera en un campo dotado de formas con características que parecieran indicar cierto porcentaje de estabilidad y preferencia genética hacia formas opuestas, pero con tasas de mayor avance y desarrollo en formas menos evolucionadas.

También los procesos de avance del campo en general, los cuales con el pasar de los años han mostrado la diferencia en el frente de avance, el campo sur este ha variado 184 metros, mientras que el campo norte ha variado 264 metros, lo que evidencia el constante cambio y estado activo de los campos dunares, tal como representa empíricamente el concepto de *continuum* y la evolución de las formas. Ya que la dirección de avance responde a la

dirección del viento dominante, en este caso S.W., y se generan procesos de compactación entre las formas (mencionado con anterioridad); la mayoría de las veces sin intervención de zonas húmedas o proliferación de vegetación dominante.

A manera de poder concluir respecto de las fases evolutivas, se plantea la necesidad de realizar estudios con mayor profundidad con metodologías especiales que permitan dilucidar cada aspecto de este proceso y las dinámicas asociadas, lo que debiera verse reflejado en las transformaciones de las formas dunares y los límites que fija la auto-clasificación que estos sistemas complejos generan.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

El sistema de dunas costeras de la ensenada Los Choros presenta una serie de características singulares, dentro de las cuales exhibe tres frentes activos, con dos lenguas transgresivas. Las dunas anteriores, dunas embrionarias, barjanas, barjanoides, transversales y longitudinales conllevan una condición de abastecimiento de arenas en el litoral como en la playa. Este gran campo se encuentra en un proceso evolutivo asociado al *continuum* dunar, evidenciando un abastecimiento de arenas constante.

Respecto al desarrollo evolutivo de cada campo dunar, un análisis multitemporal muestra cambios importantes en la superficie de estos durante los últimos 12 años. Se revelan procesos de transmutación, degradación de las formas y estabilización de estas. Lo que ha sido relacionado a las variaciones en los suministros sedimentarios, la velocidad e intensidad de los vientos predominantes, la acción antrópica (especialmente en el campo distal). Estas unidades dunares se encuentran sumamente activas, lo que le confiere una alta sensibilidad ante cualquier intervención. El que exista en esta zona áreas que se encuentran estabilizadas, no se aplica al sistema en su totalidad. Esto demuestra las relaciones intrínsecas entre las distintas formas que las interacciones producen en el aporte de arenas entre una y otra, además de los sedimentos provenientes de la quebrada Los Choros, el río Limarí (Soto 2015, conversación personal).

Con respecto al sistema, los campos dunares se encuentran conformados por estructuras generalmente onduladas, con agentes diferenciadores. La existencia de la quebrada Los Choros, como obstáculo en la zona de frente de avance del campo proximal, genera la duda si las formas barjanoides que se desarrollan a metros de esta frenaran su avance al encontrarse con ella, o seguirán avanzando cubriéndola lentamente.

Así mismo, a las condiciones morfológicas de la ensenada se le asocia que la playa presente una zona de rompiente de tipo disipativa con una alta energía del oleaje, con altas condiciones erosivas. También el hecho que la playa presente un dinamismo asociado a su condición global de ataque, la orientación de la ensenada, la posición que esta tiene dentro de la mega ensenada de Coquimbo, son las respuestas a la existencia y presencia actualmente activa del campo dunar.

Se verificó que existen variaciones temporales en la morfología de las dunas y la playa asociada, en los tres periodos investigados, correspondientes a enero de 1997, octubre de 2002 y agosto de 2014, los cuales fueron cartografiados para representar la información adecuadamente, identificando zonas de cambio, más el trabajo realizado en terreno, el cual permitió dilucidar zonas de erosión, acreción dentro de las zonas distal y proximal de la ensenada, específicamente en las dunas libres.

También, las respuestas frente a los objetivos fijados en esta investigación entregan ideas sobre el valor escénico y científico de este campo dunar, también como la especificación en cuanto al conocimiento geomorfológico del sistema en cuestión, conocer la génesis de las formas, la morfología detallada de los elementos que lo componen y definir la interacción entre ellos, conociendo que le da el dinamismo a este sistema.

Finalmente, los resultados acercan a una aproximación al comportamiento y la distribución de esas formas, características, teorías y términos que han sido referidas por varios autores, como *continuum* dunar, *transmudación*, *stages of development*, entre otros. Más aun la importancia del sistema dunar Los Choros, radica en la escasa intervención antrópica, lo que provee cualidades únicas al momento de aplicar los términos para la generación de nuevos conocimientos dentro de un fenómeno espacial que es muy común en Chile.

BIBLIOGRAFÍA

Araya, C. (2010). *Morfogénesis evolutiva y sedimentología del sistema de dunas costeras de La Trinchera, Región del Maule*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

Araya-Vergara, J. F. (1979). Las incidencias cataclísmicas de las bravezas en la evolución de la costa de Chile Central. *Informaciones Geográficas* 26: 19-42.

Araya-Vergara, J. F. (1982). Análisis de la localización de los procesos y formas predominantes de la línea litoral de Chile. Observación Preliminar. *Rev. Informaciones Geográficas*. Chile, 29: 35-55.

Araya-Vergara, J. F. (1986). Significance of Barhcans in Beach-Dune System Interactions in Central Chile. *Thalassas* 4: 23-27.

Araya-Vergara, J. F. (1987). *The evolution of modern coastal dune systems in central Chile*. International Geomorphology 1986 Part II. Ed. V. Gardiner. John Wiley & Sons Ltd., 1231-1244.

Araya-Vergara, J. F. (1989). Remnant Coastal Dunes and their significance in Chilean Ergs. *Geokoplus*, 1:1-15.

Araya-Vergara, J.F., (1996). Sistema de interacción oleaje-playa frente a los ergs de Chanco y Arauco, Chile. *Gayana Oceanol.*, 4(2): 159-167.

Araya-Vergara, J. F. (2001). Los ergs del desierto marginal de Atacama, Chile. *Investigaciones Geográficas Chile* 35: 27-66.

Aqueveque, C. (2008). *Análisis de Suelos Desarrollados en Dunas Litorales Antiguas de Chile Central. Sistemas El Yali, Putú y Chanco*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago.

Astudillo, F. (2011). *Controles determinantes en la geoquímica y mineralogía de los sedimentos fluviales activos en la cuenca del Río Limarí – IV Región de Coquimbo, Chile*. Memoria para optar al Título Profesional de Geólogo. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Bagnold, R.A., (1941). *Physics of blown sand and desert dunes*. Methuen, London, 289 pp.

Bird, E. (2008). *Coastal Geomorphology: An introduction*. 2nd Edition. J. Wiley & Sons Ltd. 411p.

Benavente, N. (2015). *Relaciones dinámicas asociadas al litoral-playa-dunas anteriores del campo de dunas de Los Choros, región de Coquimbo*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile.

Carter, R. W. G., Hesp, P. & Nordstrom, N. F. (1990). "Erosional landforms in coastal dunes," in *Coastal Dunes: Form and Process*, eds. K. F. Nordstrom, N. Psuty & B. Carter (Brisbane, Australia: John Wiley and Son) 217–252.

Carter, R.; Curtis, T.; Sheehy-Skeffington, M. (eds.) (1992). *Coastal Dunes. Geomorphology, Ecology and Management for Conservation*. Balkema, Rotterdam.

Castro, C. (1985). "Reseña del estado actual del conocimiento de las dunas litorales en Chile", *Rev. Geog. de Chile Terra Australis* 28: 13-32.

Castro, C.; Brignardello, L. (2005). Geomorfología aplicada a la ordenación territorial de litorales arenosos. Orientaciones para la protección, usos y aprovechamiento sustentables del sector de Los Choros, Comuna de La Higuera, IV Región. *Rev. Geografía Norte Grande*, núm. 33, pp. 33-57. Pontificia Universidad Católica de Chile Santiago, Chile.

Cooke, R.; Warren, A.; Goudie, A. (1993). *Desert geomorphology*. London, UCL Press.

CONAMA. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe Final. Santiago, Chile. CONAMA. 63 p.

Creixell, T., Ortiz, L. & C. Arévalo. (2012) Geología del área Carrizalillo – El Tofo. Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa Geológico, N° 133 y 134, mapa escala 1:100.000, Santiago.

Davis, J. L. (1980). *Geographical Variation in Coastal Development*. London, UK: Longman.

Davison-Arnott, R. (2010). *Introduction to coastal processes and geomorphology*. 2nd Edition. Cambridge University Press, New York. 442p.

Flor, G. y Martínez, P. (1991). Características morfológicas y sedimentológicas de las dunas eólicas de Sonabia (zona oriental de Cantabria, NO de España). *Estudios Geológicos* 47 (5-6): 317-337.

Gimingham, C.; Ritchie, W.; Willetts, B.; Willis, A. (eds.) (1989). *Coastal Sand Dunes. Proceedings of the Royal Society of Edinburgh Section B (Biological Sciences) Vol. 96*.

Goldsmith, V. (1989). Coastal sand dunes as geomorphological systems. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. Section B. Biological Sciences*, 96, pp 3-15.

Hesp, P. y Thorn, B. (1990). Geomorphology and evolution of active transgressive dunefields. NORDSTROM, PSUTY y CARTER (eds.) Coastal Dunes: Form and Process. Wiley and Sons: 253-288.

Hesp, P. A. & Hyde, R. (1996) Flow dynamics and geomorphology of a trough blowout. *Sedimentology* 43, 505–525.

Hesp, P. (1999). The beach backshore and beyond. In: Short, A. (eds.). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. John Wiley & Sons, 1999, p. 145-169.

Hesp, P. (2000) Coastal sand dunes: form and function. *Forest Research (coastal Dune Vegetation Network)*. CDV NETWORK

Hesp, P. (2002). Foredunes and Blowouts: Initiation, Geomorphology and Dynamics. *Geomorphology* 48: 245-68.

Hesp, P.A., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Ayup-Zouain, R.N., Esteves, L.S., Gruber, N.L., Toldo, E.R. Jr., Tabajara, I.L.C.A. & L.C.P. Clerot. (2005) Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. *An Acad Bras Ciênc.* 77(3):493–508.

Hesp, P. (2013). Conceptual models of the evolution of transgressive dune field systems. *Geomorphology* 199, 138-149.

Hugget, R. (2011). *Fundamentals of geomorphology*. 3rd Edition. Routledge Fundamentals of Physical Geography Series. Ed. Routledge. 516p.

Illemerger, W. K. (1988). The dunes of the Alexandria coastal dunefield, Algoa Bay, South Africa. In: *S. Afr. J. Geol.*, 91 (3): 381 – 390.

Kuzukuoglu, C., Parish, R. & Karabiyikoglu, M., 1998. The dune systems of the Konia Plain (Turkey): their relation to environmental changes in Central Anatolia during the Late Pleistocene and Holocene. *Geomorphology*, 23: 257 – 271.

Lancaster, N. (1982b). Linear dunes. *Progress in Physical Geography*, 6, 476–504.

Lancaster, N.; Oilier, C.D. (1983) Sources of sand for the Namib Sand Sea. *Zeitschrift für Geomorphologie*, Supplementband 45, 71–83

Lancaster, N. (1995). Geomorphology of desert dunes. Routledge, London, 290 pp.

Lancaster, N. (2004). Dune, Aeolian, in *Encyclopedia of Geomorphology* Vol. 1 Routledge. London, p 285-291.

Lancaster, N., (2009), Aeolian features and processes, *in* Young, R., and Norby, L., Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America, p. 1–25

Martinho, C.T., Hesp, P. & S. Dillenburg. 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, 117: 14-32.

Martínez, C. (2001) *El efecto de ensenada en los procesos litorales de las ensenadas de Valparaíso, Algarrobo y Cartagena, Chile*. Tesis para optar al grado de Magíster en Geografía. Universidad de Chile.

Marzolf, J. (1988). Controls on late Paleozoic and early Mesozoic eolian deposition of the western United States. *Sediment. Geol.* 56: 167–192.

Moscoso, R.; Nasi, C. y Salinas, P. Hoja Vallenar y Parte Norte de La Serena. Santiago: SERNAGEOMIN, Carta Geológica de Chile 1:250.000, N° 55, 1982.

Muñoz, J. (2000). *Geomorfología General*. 3° Edición. Series Espacios y Sociedades. Editorial Síntesis, Madrid. 351p

Niemeyer, H. (sin fecha). Hoyas hidrográficas de Chile: Cuarta Región. Biblioteca de Dirección General de Aguas. Chile.

Nordstrom, K.; Psuty, N.; Carter, B. (1990). Coastal dunes: form and process. Chichester, John Wiley and Sons.

Novoa, J. E.; López, D. (2001). “IV Región: El Escenario Geográfico Físico”. Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Coquimbo. Ediciones Universidad de La Serena, La Serena, Chile. 2: 13 - 28

Paskoff, R. (1970). *Geomorfología de Chile semiárido*. Trad. por J. Novoa (1993). Facultad de Humanidades, Universidad de La Serena. 321p.

Paskoff, R. & Manríquez, H. (2004). Las dunas de las costas de Chile. Santiago de Chile: Instituto Geográfico Militar de Chile.

Pérez, C. A. (2005). *Cambio climático: Vulnerabilidad, adaptación y rol institucional. Estudios de caso en el valle del Elqui*. Memoria para optar al título de Ingeniero civil ambiental. Universidad de la Serena.

Pye, K. (1984). Models of transgressive coastal dune building episodes and their relationship to Quaternary sea level changes: a discussion with reference to evidence from eastern Australia. *Coastal research: U.K. perspectives*, 81-104

Pye, K. (1993). Introduction: the nature and significance of Aeolian sedimentary systems. *Geological Society, London, Special Publications 72*: 1-4

Pye, K. & Tsoar, H. (2009). *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Springerlink, 2nd printing, 475 p. 280 illus., Hardcover.

Rogers, S. & Nash, D. (2003). *The dune book*. North Carolina Sea Grant, 28p.

Sarricolea, P. & J. Martín-Vide. (2012). Distribución espacial de las precipitaciones diarias en Chile mediante el índice de concentración a resolución de 1 mm, entre 1965-2005. En: *Cambio climático, extremos e impactos*. (Ed) J.M. Cuadrat, P. Dorta, M. J. Estrela, F. González Rouco, J. A. López Díaz, J. C. García Codrón, F. Sánchez Rodrigo, J. Martín Vide y R. García Herrera. Publicaciones de la Asociación Española de Climatología, Salamanca, España. P, 631-639.

Short, A. D. (1999). Waves-dominated beaches, In: Short A (ed). *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. Chichester: John Wiley & Sons, p. 173-191.

Soto, M. V. (1987). *Dinámica y tendencia evolutiva del campo de dunas de Chanco*. Memoria para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile, Escuela de Geografía. Inédito.

Soto, M. V. (2005) Aspectos morfodinámicos de ensenadas desalineadas del litoral de Chile central. Pichilemu y Caleta Los Piures. *Revista de Geografía Norte Grande*, 33:73-87.

Soto, M. V., Arriagada, J.; Castro, C.P., Maeker, M. & G. Rodolfi. (2011). Relación entre el cambio de uso del suelo en la cuenca del Aconcagua y su litoral arenoso correlativo. Chile central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50:187-202.

Tsoar, H. (2001). 17 Types of Aeolian Sand Dunes and Their Formation. Department of Geography and Environmental Development Ben-Gurion University of the Negev Beer-Sheva 84105, Israel

Vargas, I. (1990). Interacciones oleaje - playas - dunas en rocas de Santo Domingo. Informe de práctica. Universidad de Chile, Escuela de Geografía. Inédito.

Veloso, B. (2005). *Estructura y dinámica del sistema dunar de Longotoma*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago.

Verstappen, H. Th., (1968). On the origin of longitudinal (seif) dunes. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.* 12, 200-220.

Verstappen, H. (1972). On dune types, families and sequences in areas of unidirectional winds. *Gottiner Geogr. Abh*, N° 60, p. 341-353.

Villagrán, C. (2007). *Dinámica costera en el sistema de bahías y ensenadas comprendidas entre Bahía Choros y Bahía Tongoy*. Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo. Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. Santiago.

Werner, B. (1995). Eolian dunes: Computer simulations and attractor interpretation. *Geology* 23: 1107–1110.

Wiggs, G. (2001). Desert dune processes and dynamics. *Progress in Physical Geography* 25(1): 53-79.

Wright, L.D. & Short, A.D. (1984) Morphodynamic variability of beaches and surfzones: A synthesis. *Marine Geology* 56: 92- 118.

ANEXOS



(a)



(b)

Anexo 1: (a) Duna anterior, con mayor altura registrada durante terreno. 21 m.s.n.m

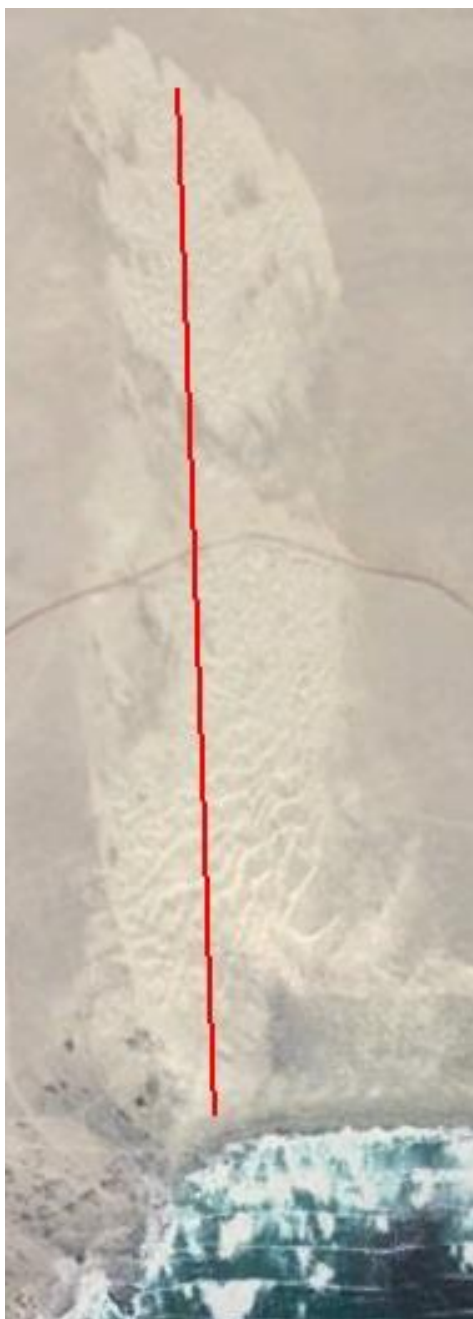
(b) post playa y dunas anteriores zona sur ensenada. Fuente: (a) Proyecto Fondecyt N° 1120234. (b) Aqueveque (2008).



Anexo 2: Cordón dunas paralelas en duna transgresiva activa. Fuente: Proyecto Fondecyt N° 1120234.



Anexo 3: Vista panorámica dunas longitudinales, campo distal. Fuente: Proyecto Fondecyt N° 1120234.



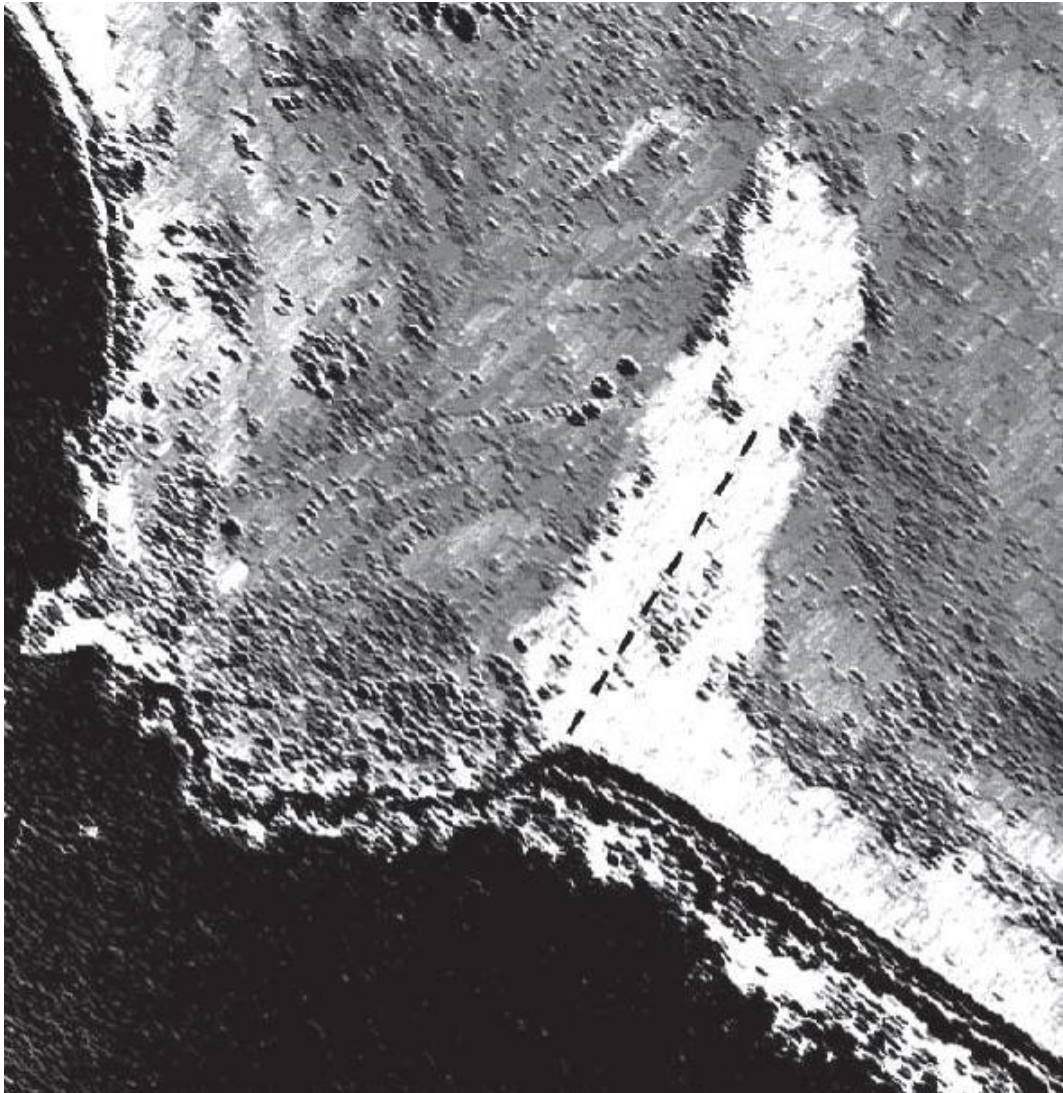
Anexo 4: Zona del perfil año 2014, campo distal. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital. Proyecto Fondecyt N° 1120234.



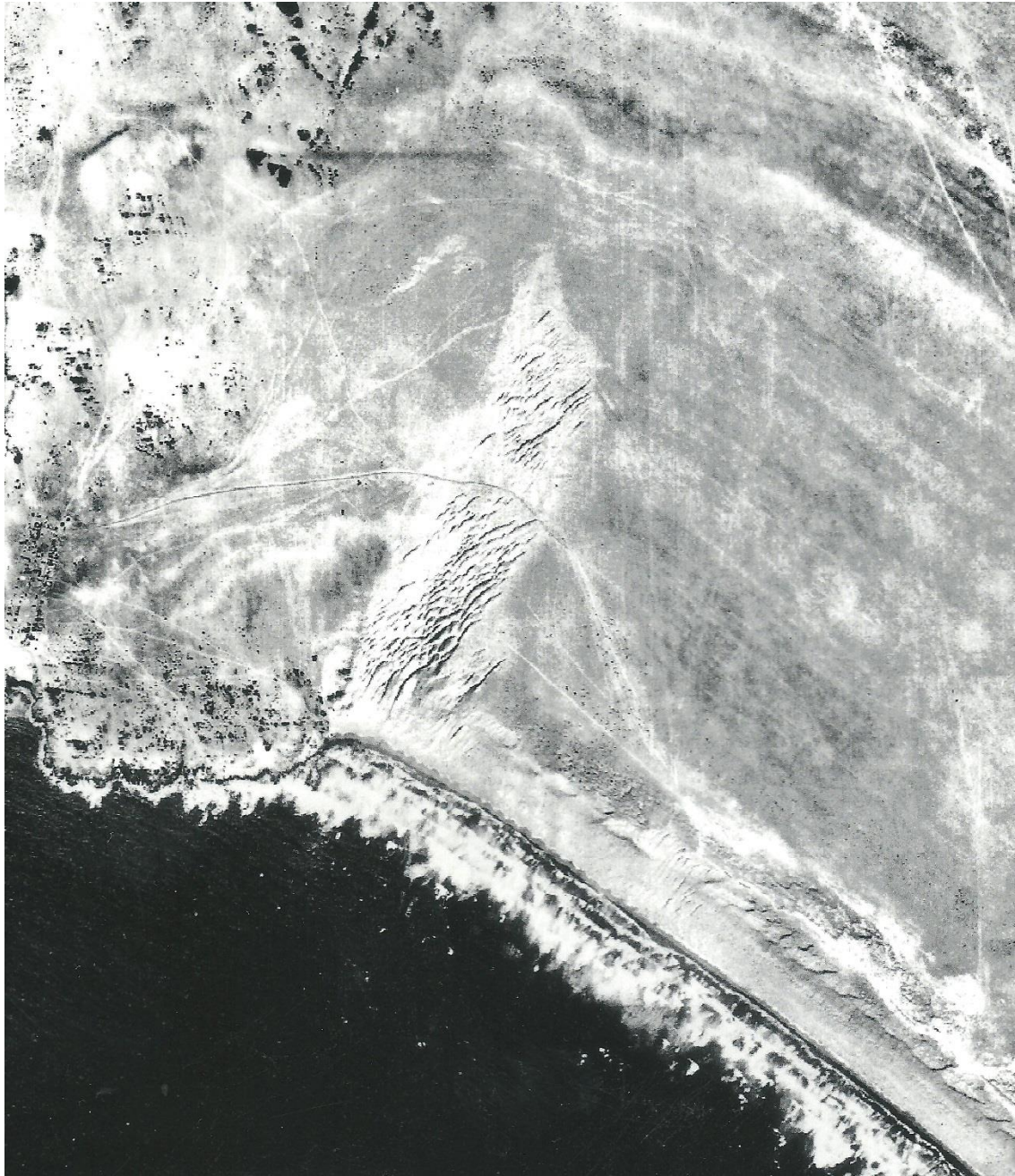
Anexo 5: Zona del perfil año 2014, campo proximal. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital. Proyecto Fondecyt N° 1120234.



Anexo 6: Zona perfil año 2002, campo proximal. Fuente: Castro & Brignardello, 2005.



Anexo 7: Zona perfil año 2002, campo distal. Fuente: Castro & Brignardello, 2005.



Anexo 8: Campo distal, 1997. Dunas longitudinales. Fuente: Fotografía aérea SAF.



Anexo 9: Campo proximal, 1997. Dunas barjanoides. Fuente: Fotografía aérea SAF.



Anexo 10: Dunas anteriores y *nebkas*, zona proximal ensenada. Fuente: Proyecto Fondecyt N° 1120234.



Anexo 11: Paleodunas longitudinales, indicadas por flechas. 2015. Fuente: elaboración propia en base a imagen satelital, año 2015. Proyecto Fondecyt N° 1120234.



Anexo 12: Dunas parabólicas campo proximal. Fuente: Aqueveque (2008)