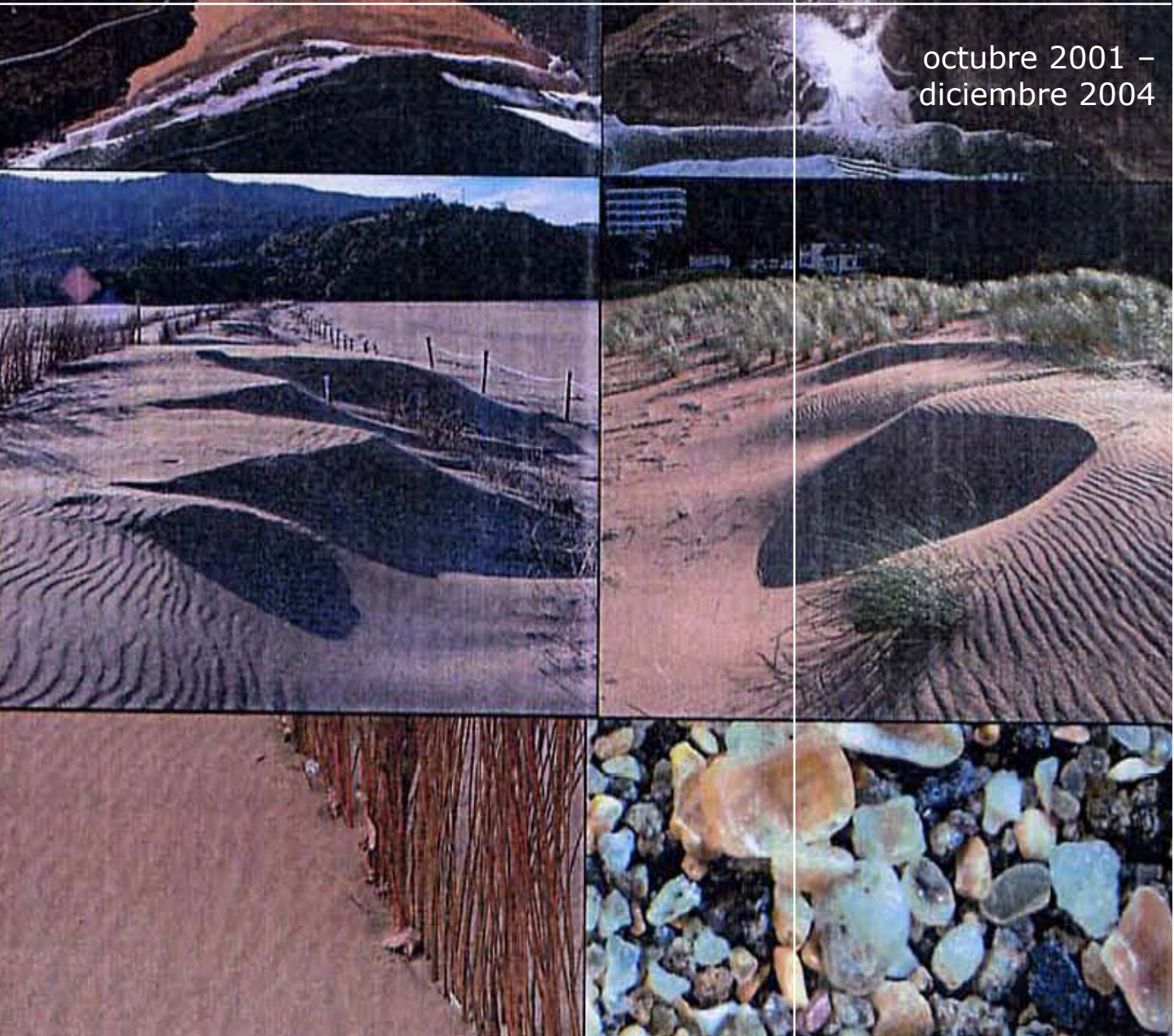


SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN SEDIMENTOLÓGICA DEL PROYECTO DE REGENERACIÓN DUNAR EN LAIDA (RESERVA DE LA BIOSFERA DE URDAIBAI)



biodibertsitatea
eta paisaia
BIODIVERSIDAD Y
PAISAJE

octubre 2001 –
diciembre 2004



EUSKO JAURLARITZA



GOBIERNO VASCO

INGURUMEN ETA LURRALDE
ANTOLAMENDU SAILA

DEPARTAMENTO DE MEDIO AMBIENTE
Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO

 **ingurumena.net**

Documento: SEGUIMIENTO Y EVALUACIÓN
SEDIMENTOLÓGICA DEL PROYECTO DE
REGENERACIÓN DUNAR EN LAIDA
(RESERVA DE LA BIOSFERA DE URDAIBAI)

Fecha de edición: 2004

Autor: **Harea Ikerketa Taldea**
Alejandro Cearreta
Eneko Iriarte
Manu Monge

Propietario: Gobierno Vasco. Departamento de Medio
Ambiente y Ordenación del Territorio.

Estructura del Informe final

1. Introducción	2
2. Objetivos del trabajo	5
3. Metodología empleada.....	5
4. Resultados obtenidos e Interpretación	
4.a) <u>Comportamiento de las variables meteorológicas</u>	6
<i>i) Régimen general de vientos en el litoral</i>	<i>7</i>
<i>ii) Régimen local de vientos en el litoral</i>	<i>9</i>
4.b) <u>Caracterización del sedimento</u>	13
4.c) <u>Etapas de crecimiento dunar</u>	15
4.d) <u>Arquitectura deposicional y estructuras sedimentarias.</u>	17
<i>i) Sets bipolares.....</i>	<i>17</i>
<i>ii) Superficies de discontinuidad erosiva.....</i>	<i>17</i>
<i>iii) Laminaciones diarias.....</i>	<i>18</i>
4 e) <u>Volumen, morfología y estructura de acumulación</u>	19
<i>i) Zona dunar norte.....</i>	<i>19</i>
<i>ii) Zona dunar sur.....</i>	<i>27</i>
<i>iii) Conjunto de Laida.....</i>	<i>30</i>
4.f) <u>Modelo de evolución dunar</u>	36
5. Conclusiones	36
6. Agradecimientos	38
Anexo fotográfico	39

1. Introducción

Debido a la naturaleza acantilada de la costa vasca, los sistemas dunares representan uno de los ecosistemas litorales más escasos en nuestra franja costera. Tras su sistemática destrucción y deterioro durante los últimos 200 años, y debido a su importancia como sistema natural de protección del litoral y a su papel en la conservación de la biodiversidad, el mantenimiento y regeneración de estos ecosistemas únicos se ha convertido en un tema de gran interés social.

Con el objetivo de conseguir el mayor grado de naturalidad posible dentro de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, el Patronato de la misma se propuso regenerar el campo dunar que antaño existía en Laida, y que aparece registrado en diversa documentación gráfica de la primera mitad del siglo XX. A tal fin, ese Patronato propuso a este equipo redactor el diseño de un Estudio de Seguimiento y Evaluación Sedimentológica del Proyecto de Regeneración Dunar para conocer y evaluar los diferentes procesos físicos que van a operar a lo largo del tiempo en la zona de actuación, y asegurar así el éxito final del proyecto. Durante el mes de junio de 2003, este estudio se integró como un proyecto de investigación dentro de la *Cátedra UNESCO sobre Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental en el marco de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai*. En julio de 2004, la Comisión Europea concedió al Patronato de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai el proyecto LIFE04NAT/ES/000031 *Regeneración del ecosistema dunar en la playa de Laida (Urdaibai)*(2004-2007) con el fin de continuar los esfuerzos de mejora ambiental de la zona de Laida.

Tras los buenos resultados obtenidos en una primera prueba-piloto llevada a cabo en Diciembre 1999, el Patronato decidió utilizar los materiales arenosos que a lo largo de los últimos años han sido dragados dentro de los canales mareales en la zona inferior de la ría y vertidos en las zonas inter- y supramareal de la playa de Laida como sustrato sobre el que desarrollar este proyecto de regeneración dunar. Durante los meses transcurridos desde el vertido de arena de 1999, la zona fue colonizada de modo natural por diversas especies vegetales (*Cakile maritima*, *Poligonum maritimum*, *Eringium maritimum*, *Euphorbia paralias*, *Honkenya peploides*,...).

En el mes de Octubre de 2001 comenzó la primera fase del trabajo con la implantación de 3 filas de captadores de arena a la que siguió, en Febrero 2002, una segunda fase con la colocación de 2 filas adicionales de captadores en la zona axial de la actuación. Además, durante el invierno-primavera 2003, se procedió a la plantación de 100.000 unidades de *Ammophila arenaria* y *Elymus farctus*, con el fin de estabilizar y naturalizar la acumulación arenosa.

La necesidad de mayor calado en el canal principal del estuario por parte de la empresa Astilleros de Murueta S.A. condujo a la realización del denominado *Proyecto de Dragado para la Recuperación del Calado del Canal de la Ría de Mundaka* con la extracción de 242.952 m³ de arena y su vertido en la zona supramareal sur de la playa de Laida, siguiendo las recomendaciones recogidas en el primer informe anual de este Proyecto de seguimiento y evaluación. Una vez finalizado el vertido de sedimento arenoso en Junio de 2003, se procedió a la implantación de 2.250 m lineales de captadores de mimbre con los objetivos de ampliar significativamente el campo dunar en Laida y retardar la reintroducción de esos sedimentos en el canal principal, evitando así la acelerada pérdida de calado en éste.

Durante el segundo semestre del año 2004, se ha procedido a la plantación de 225.000 unidades de plantas dunares en las acumulaciones arenosas generadas sobre el último vertido realizado.

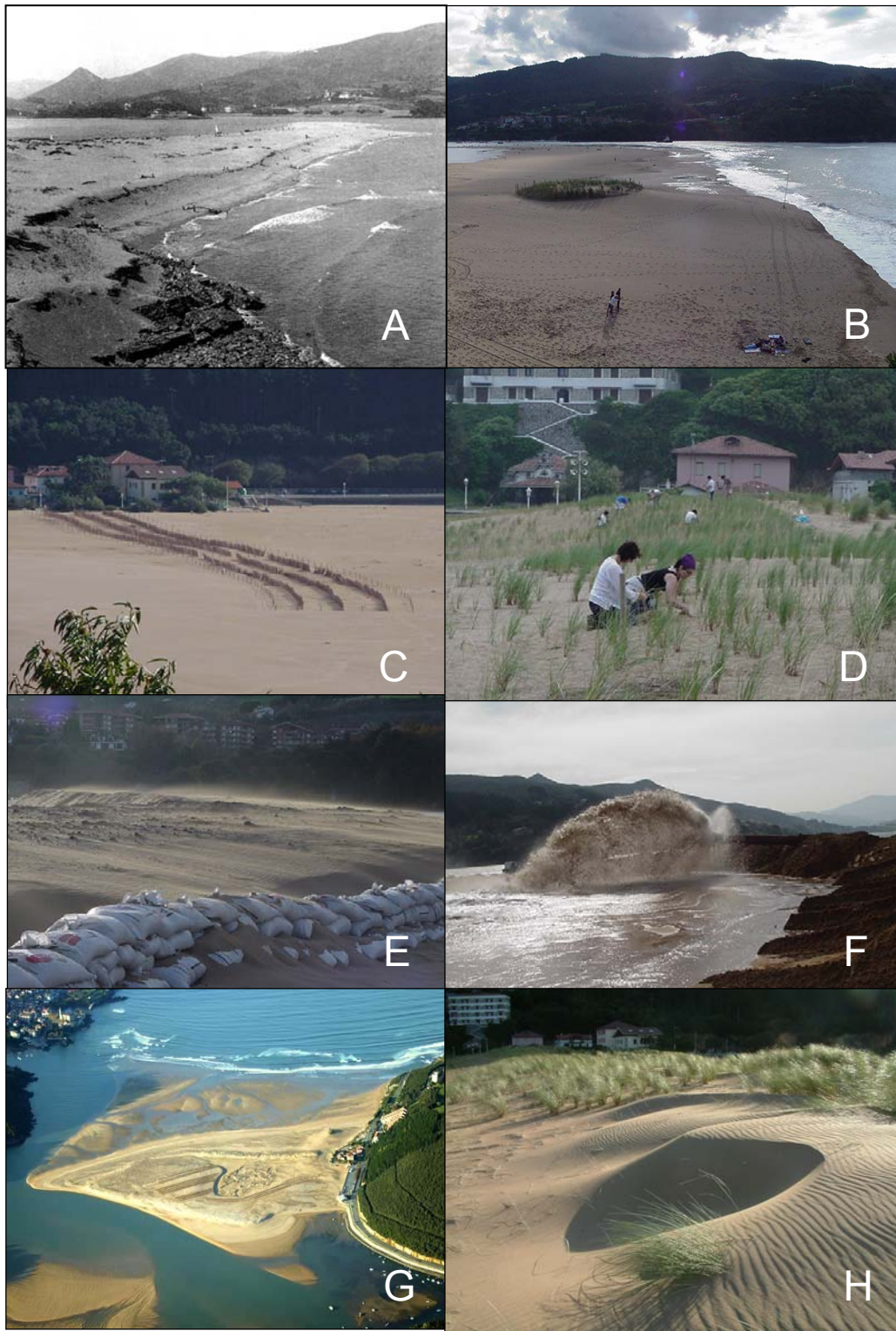


Figura 1. Principales actuaciones llevadas a cabo en la zona de estudio. A: imagen de Laida en la década de 1950; B: Vista general de Laida en 2001; C: captadores de arena en 2002; D: plantación de *Ammophila* y *Elymus* en 2003; E: construcción de la barrera antifuel en 2003; F: vertido de arena dragada sobre la zona sur en 2003; G: vista general del conjunto dunar en regeneración; H: situación actual del sistema dunar.

2. Objetivos del trabajo

Los objetivos establecidos para este estudio de seguimiento y evaluación de los procesos de acumulación arenosa en Laida son los siguientes:

1. Identificar los parámetros meteorológicos incidentes en la zona de estudio.
2. Definir los fenómenos de transporte y deposición de material sedimentario.
3. Analizar las características sedimentarias del material depositado.
4. Determinar las fases de acumulación arenosa.
5. Describir las estructuras sedimentarias y la estructura interna del cuerpo dunar a diferentes escalas.
6. Cuantificar el volumen de arena depositado en la zona de acumulación.
7. Establecer el modelo de evolución dunar.
8. Valorar el éxito de la actuación regenerativa.

3. Metodología empleada

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, se aplicó la siguiente metodología de trabajo:

1. Estudio bibliográfico de informes y publicaciones previas sobre la zona de estudio.
2. Análisis de la composición mineralógica (difracción de rayos X) y características granulométricas (tamizaje en seco) de los materiales arenosos en la zona de acumulación.
3. Seguimiento quincenal de la red de estacas de madera graduadas establecida en la zona de acumulación.
4. Determinación y comparación de la topografía semestral de Laida y batimetría de las zonas inter-submareales adyacentes.
5. Levantamiento bimensual de transectos topográficos en dirección N-S y E-W.
6. Realización de fotografías aéreas oblicuas de la zona de acumulación.
7. Recogida y análisis de datos diezminutales sobre régimen de vientos, lluvias y temperaturas procedentes de las estaciones meteorológicas colocadas en la playa de Laida (propia) y en Mundaka (Red de Calidad Ambiental del Gobierno Vasco).
8. Inspección semanal de la zona de trabajo con el fin de identificar nuevos elementos y procesos de carácter geológico y biológico.

9. Tratamiento informático de los datos meteorológicos, oceanográficos, topográficos y sedimentológicos recogidos durante el período de estudio.
10. Elaboración de informes anuales donde se presente la información recogida, se discutan los procesos involucrados, se valore el progreso de la actuación regenerativa y se planteen posibles medidas correctoras.

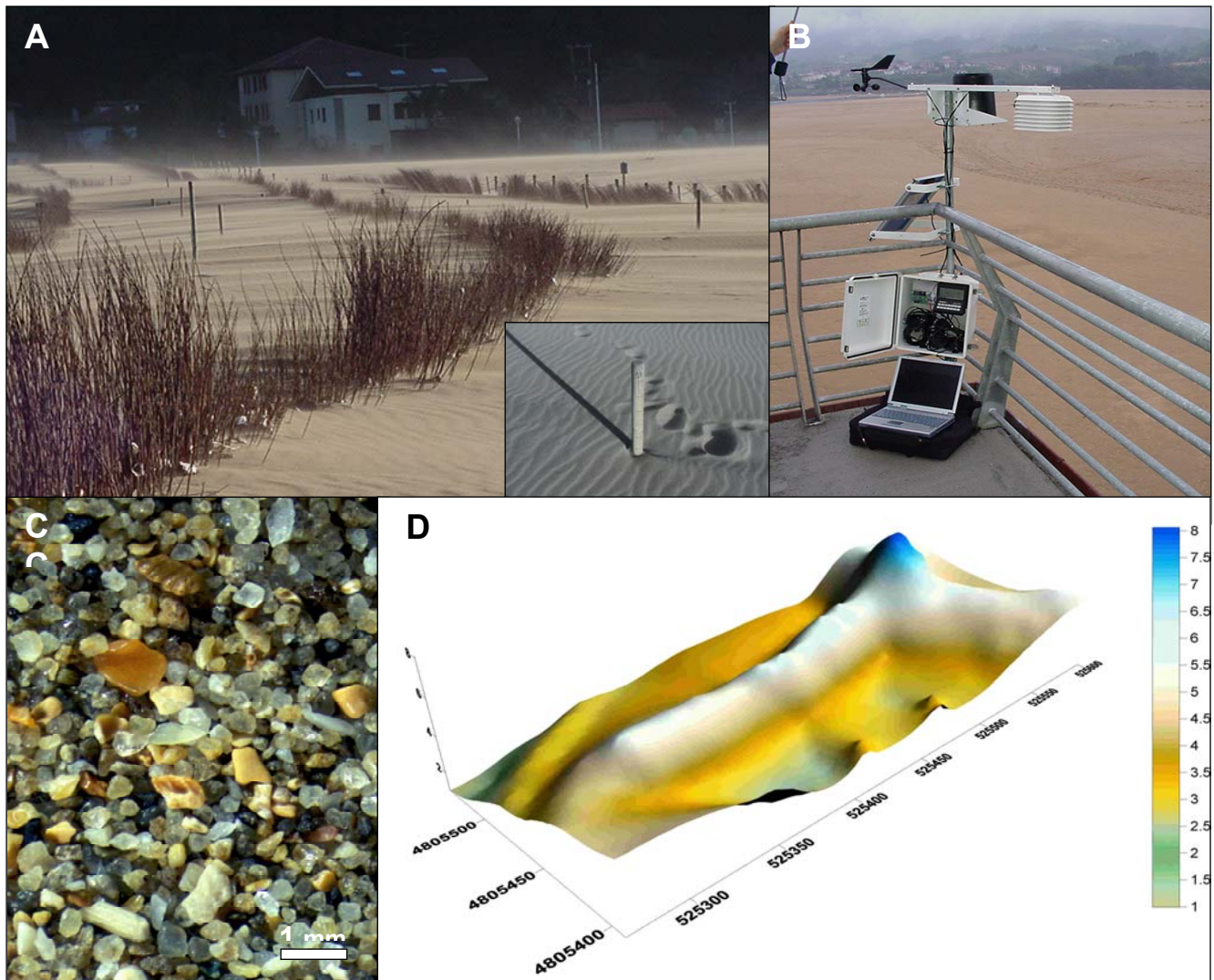


Figura 2. Diferentes metodologías utilizadas en el proyecto. A: captadores de arena y estacas graduadas de medición; B: estación meteorológica propia; C: arena dunar bajo el microscopio óptico; D: modelo topográfico tridimensional.

4. Resultados obtenidos e Interpretación

4.a) Comportamiento de las variables meteorológicas

La zona de estudio presenta un clima mesotérmico, moderado en cuanto a la temperatura y muy lluvioso, que se denomina clima templado húmedo sin estación seca o clima atlántico. Las

masas de aire cuyas temperaturas se han suavizado en contacto con las templadas aguas oceánicas llegan a la costa y provocan que las oscilaciones térmicas entre la noche y el día, o entre el verano e invierno, sean poco acusadas. El factor orográfico explica la gran cantidad de lluvias.

i) Régimen general de vientos en el litoral

La zona costera es recorrida por vientos generales del W que describen amplios meandros, de modo que tanto las corrientes de aire procedentes del S y del N como las contracorrientes del E pueden afectar temporalmente al litoral vasco (Figura 4).

Los vientos en invierno son más fuertes que en verano. El viento del NW es un viento promedio derivado del flujo general W, mientras que el N es debido a las brisas locales. Los vientos del NW son debidos a un factor orográfico. La orientación W-E de las sierras, el hecho de que las montañas vascas sean más bajas que las montañas de la Cordillera Cantábrica (al W) y de los Pirineos (al E), y el efecto de succión del aire producido por la región ciclogénica del Mediterráneo occidental, hacen que con frecuencia el flujo general del W se dirija hacia la cuenca mediterránea a través de la CAV.

Por otra parte, el viento S es el viento más veloz y sopla generalmente atemporalado. Se desencadena cuando en los mapas isobáricos existe una presión baja situada al W y una presión alta localizada al E. Este aire tiende a colarse sobre el País Vasco situado orográficamente en una zona de paso entre los altos relieves de la Cordillera Cantábrica y los Pirineos. En su descenso por la vertiente N hacia el Golfo de Bizkaia el aire se calienta por compresión y se deseca (efecto Foehn).

Todas estas características aparecen claramente reflejadas dentro de la distribución semestral de la dinámica eólica en la zona de estudio. El semestre 1 (Octubre-Marzo) se caracteriza por vientos dominantes del N que alcanzan una velocidad media diaria igual o superior a 4 m/s, con máximos que llegan a alcanzar incluso los 11 m/s. Sin embargo, durante el semestre 2 (Abril-Septiembre) los vientos dominantes son de componente E-SE, alcanzando velocidades medias diarias entre 1 y 2 m/s, con un máximo registrado de 7 m/s.

En cuanto a la humedad relativa, se ha observado que durante el semestre 1 los valores oscilan entre el 40% y el 90 % con un valor medio en torno al 70%. Sin embargo, durante el semestre 2 los valores oscilan entre 50% y >90%, con un valor medio en torno al 80%.

Por otra parte, la temperatura durante el semestre 1 muestra unos valores comprendidos entre los 5°C y 20°C, mientras que en el semestre 2 varía entre 15°C y >30°C.

La pluviometría es abundante a lo largo de los dos semestres con valores medios en torno a los 6 l/m².

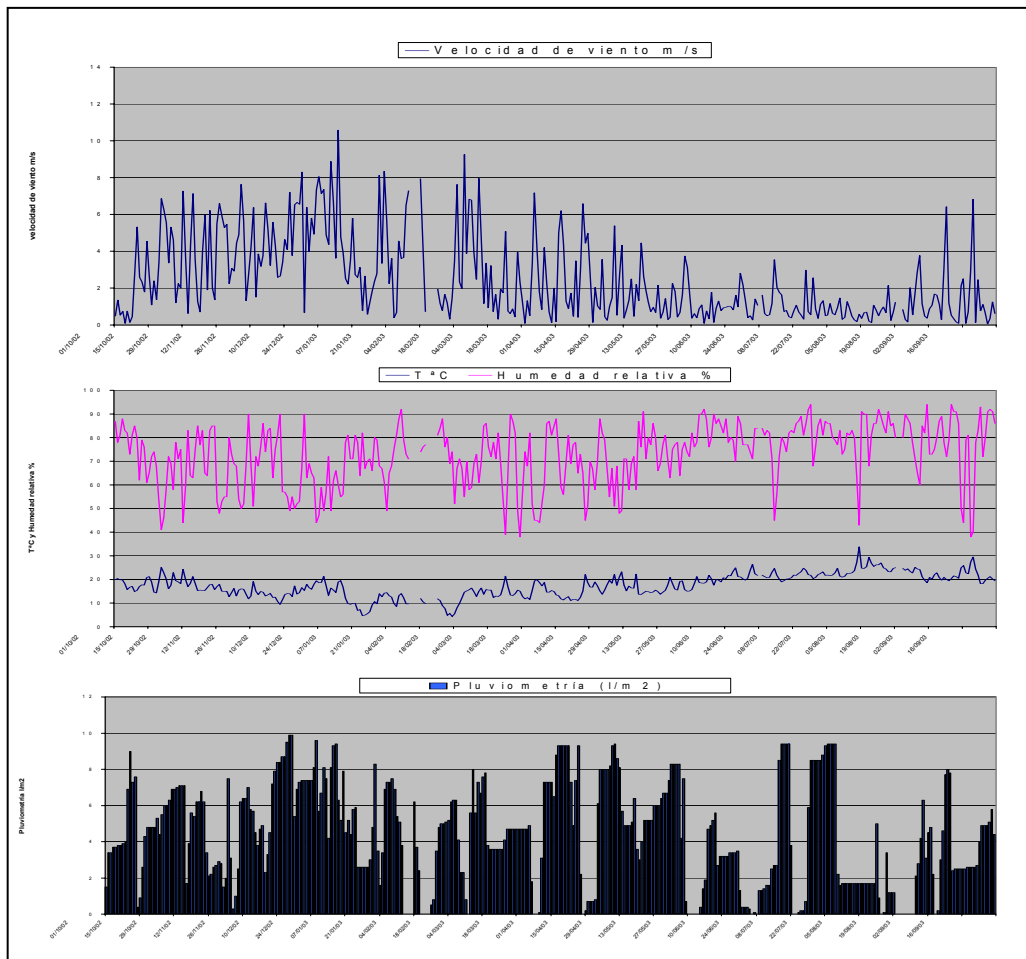
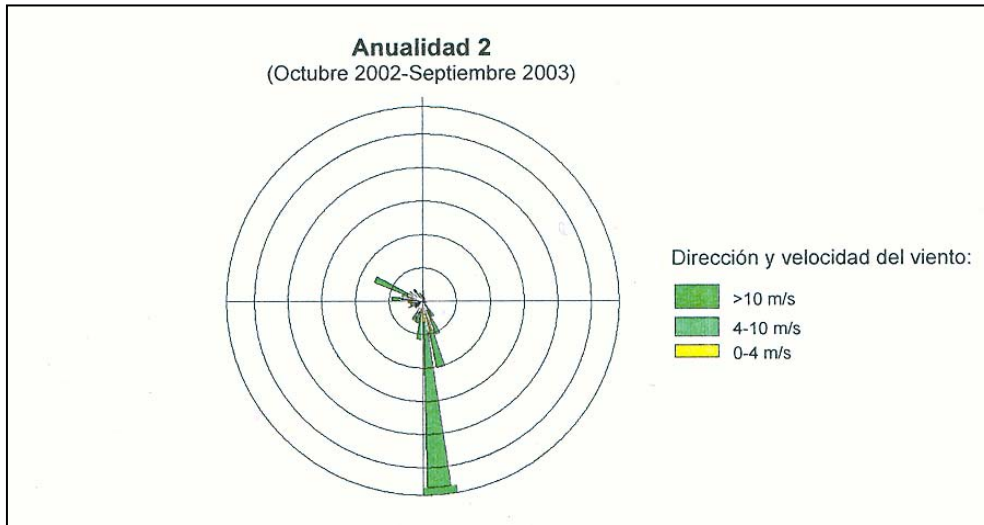


Figura 3. Parámetros meteorológicos medios diarios en la zona de estudio durante un año hidrológico tipo.

ii) Régimen local de vientos en el litoral

En los días soleados con cielo despejado y vientos regionales débiles, el calentamiento de la tierra adyacente al mar es mucho más rápido e intenso que el del agua marina. Este proceso diferencial da lugar a la aparición de un contraste de temperatura entre el mar y la tierra que genera un gradiente de presión y circulación local de aire que penetra en la costa procedente del mar: las brisas marinas. De manera contraria, durante la noche el rápido enfriamiento de la superficie de la tierra y el nulo enfriamiento del agua del mar suponen una reversión de los vientos con flujos de aire procedentes de tierra que se introducen en el mar.

El análisis de los datos recogidos en la estación meteorológica de Laida permite observar claramente este fenómeno de variabilidad diaria en la dirección del viento. Así, por ejemplo, durante los meses de verano tiene lugar una alternancia diaria en los valores de temperatura, dirección y velocidad del viento. Observando esta tendencia con mayor detalle se observa que los 3 parámetros anteriormente mencionados varían simultáneamente. Así, la temperatura muestra valores mínimos al amanecer y asciende paulatinamente hasta alcanzar un valor máximo entorno a las cuatro de la tarde, momento a partir del cual desciende de modo continuado. Como es conocido, el máximo de temperatura del aire no coincide con el máximo de insolación debido al importante efecto de la radiación térmica de la superficie del suelo durante las primeras horas de la tarde.

En cuanto a la dirección del viento, se observa que entre la medianoche y las once de la mañana se mueve exclusivamente de dirección SE mientras que en el intervalo comprendido entre las once de la mañana y la siguiente medianoche los vientos son exclusivamente de componente NW.

Por otra parte, la velocidad del viento presenta un valor medio menor a 2 m/s durante el periodo nocturno. Durante el periodo diurno, sin embargo, la velocidad oscila alrededor de los 6 m/s. Los valores máximos se dan entre las 15:00 y 18:00 horas, coincidiendo con los valores máximos de temperatura.

Tomando los 3 parámetros en conjunto, se pueden definir 2 ciclos diarios constituidos por mínima temperatura, menor velocidad de viento y dirección SE durante la noche, mientras que durante el día se manifiestan máxima temperatura, mayor velocidad de viento y una dirección exclusivamente NW. Estos ciclos están relacionados con el diferente comportamiento térmico entre la tierra firme y el mar descrito anteriormente, dando lugar a un sistema de brisas marinas durante el día y de brisas terrales durante la noche (Figuras 5 y 6). Este patrón tiene lugar durante periodos cálidos y de cielo despejado mientras que, por el contrario, no se cumple cuando se producen precipitaciones.

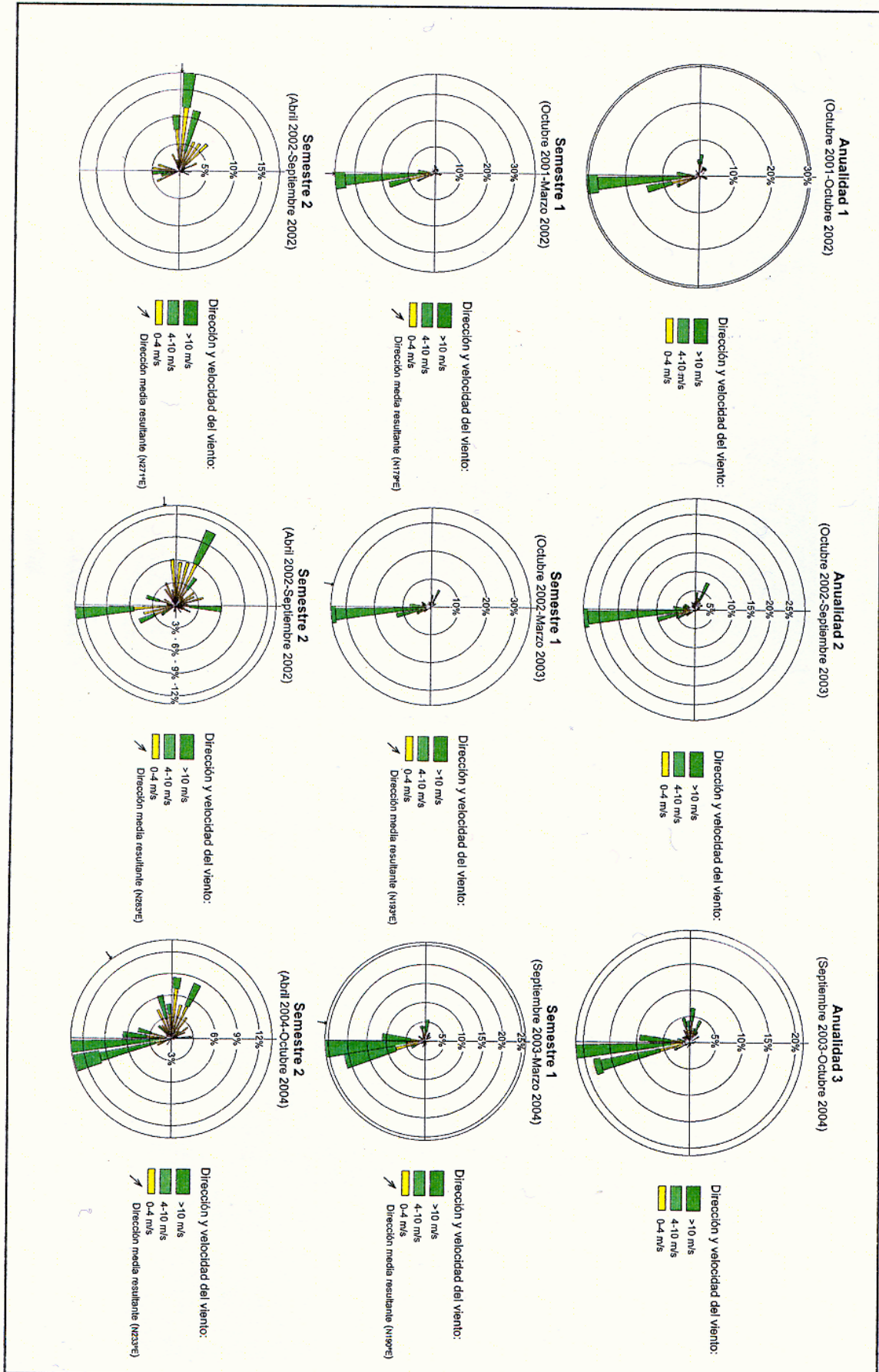


Figura 4: Rosas de los vientos anuales y semestrales correspondientes a las 3 anualidades del periodo de estudio.

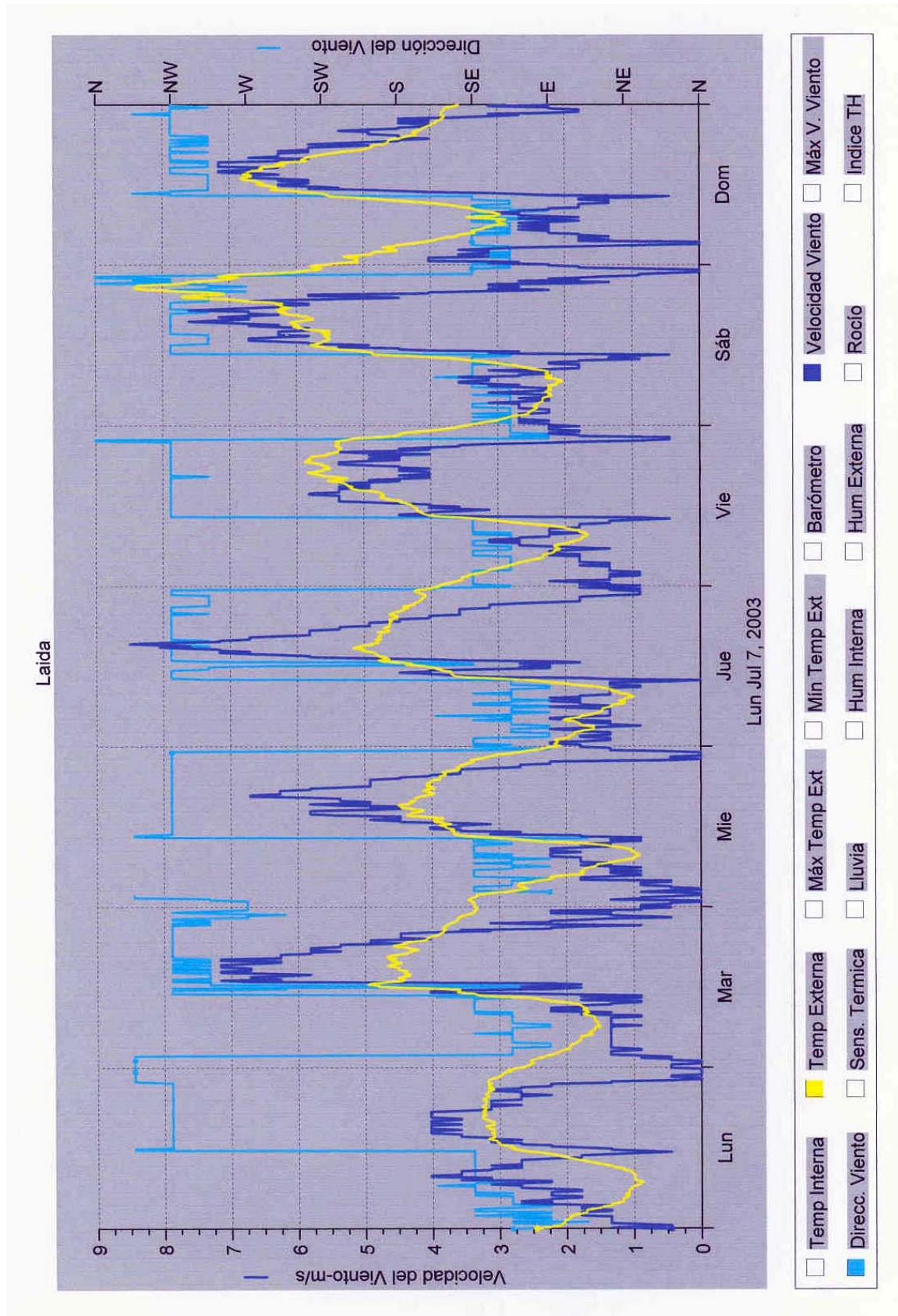


Figura 5. Parámetros meteorológicos correspondientes al período 7-13 de Julio 2003 (semanal) obtenidos en la estación meteorológica de Laida.

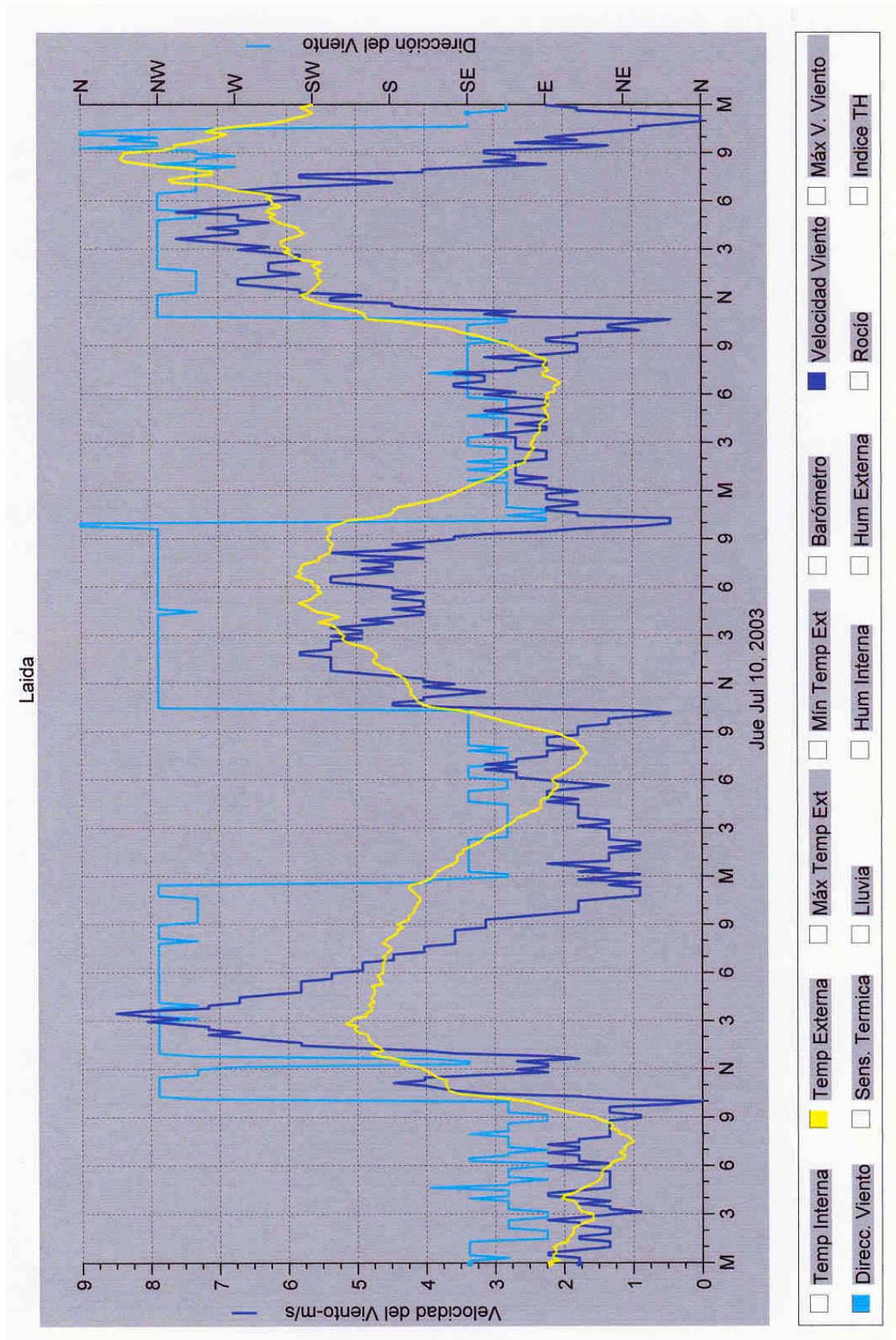


Figura 6. Parámetros meteorológicos correspondientes al período 10-12 de Julio 2003 (diario) obtenidos en la estación meteorológica de Laida.

4.b) Caracterización del sedimento

El sedimento arenoso utilizado en este proyecto de regeneración dunar proviene de sucesivos dragados de los canales mareales en la zona inferior del estuario y ha sido depositado artificialmente en las zonas inter- y supramareal de Laida desde 1998.

Desde el punto de vista mineralógico, la arena acumulada en la duna es de naturaleza mixta, con un contenido mayoritario de granos de cuarzo que varía entre 55-90% del total. El resto está compuesto mayoritariamente por bioclastos de naturaleza carbonatada (calcita y aragonito) y de forma minoritaria se ha observado mediante difracción de R-X la presencia de granos de dolomita, hematites y filosilicatos.

La fracción carbonatada está constituida exclusivamente por bioclastos de naturaleza orgánica, principalmente fragmentos de moluscos, espículas de equínidos y caparzones de foraminíferos bentónicos de especies marinas típicas de plataforma interna. Su presencia dominante en los materiales arenosos de Laida indica un origen marino para este material que ha sido transportado en grandes cantidades dentro del estuario por el oleaje y las corrientes mareales.

La actividad eólica a la que está sometida la playa de Laida hace posible encontrar en la superficie dos tipos de sedimento bien diferenciados. Por una parte, los materiales gruesos de naturaleza bioclástica que se sitúan en las zonas donde predomina la deflacción (erosión eólica). Por otra parte, la arena media-fina que se localiza en las zonas de acumulación eólica. Este sedimento se encuentra bien clasificado (*sorting*: 0,30-0,70) (Figura 2C y 7B). En cuanto a su tamaño de grano, la fracción dominante está constituida por arena de grano medio (0,4-0,2 mm) que en su mayoría se compone de cuarzo. Los bioclastos, sin embargo, constituyen la mayor parte de las fracciones de arena gruesa a muy gruesa (0,5-1,5 mm). Esta diferencia responde al diverso comportamiento aerodinámico derivado de su distinta densidad y forma. El estudio de los parámetros estadísticos refleja valores típicos de sedimentos eólicos.

Todas estas características son indicativas de que la arena ha sido introducida en el estuario de Urdaibai desde la estrecha plataforma continental por las diversas corrientes de deriva, tormenta, oleaje y marea. Tras su vertido artificial en Laida ha sido posteriormente retrabajada por la acción del viento.

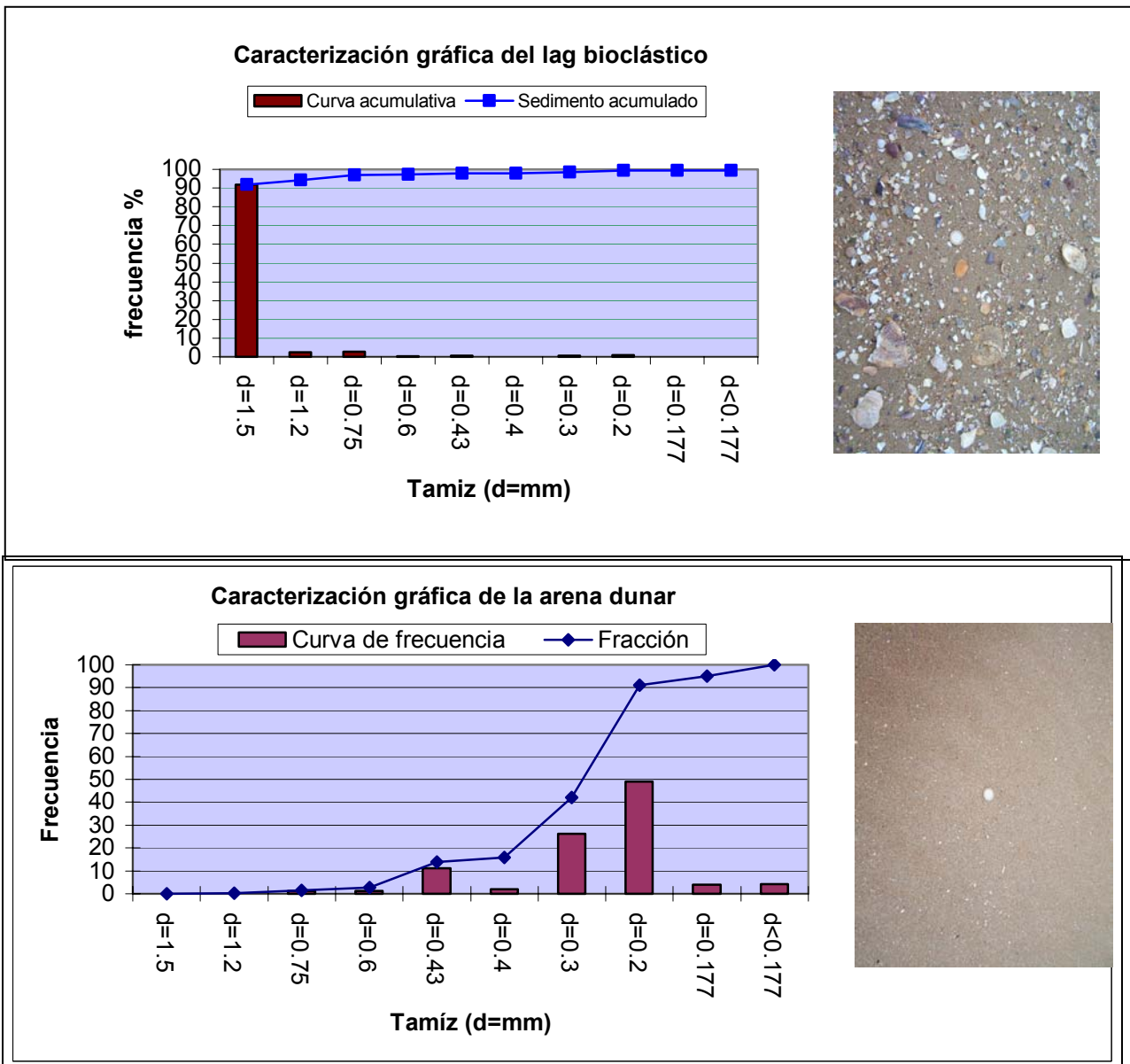


Figura 7. Fotografía y caracterización granulométrica de los dos tipos de sedimento presentes en Laida. A: lag bioclástico grueso; B: arena media-fina.

4.c) Etapas de crecimiento dunar

En el desarrollo temporal de la duna en regeneración se han observado dos tendencias generales a lo largo del período de estudio. Por una parte, desde Octubre hasta Marzo (semestre 1) se produce una acumulación sostenida importante de arena en la zona de actuación mientras que, por otra parte, desde Abril hasta Septiembre (semestre 2) tiene lugar una acumulación neta muy inferior a la del semestre anterior y, prácticamente, se ha estabilizado el volumen de arena alcanzado anteriormente. Este modelo de crecimiento dunar es consecuencia del modelo de viento que actúa en la zona de estudio y que ha sido descrito en la sección 4a.

Comparando el modelo de crecimiento durante las tres anualidades de estudio se observa, en general, que todas las anualidades presentan una morfología de crecimiento escalonada con una fase de mayor acumulación durante el primer semestre y una segunda fase donde el incremento sedimentario es inexistente. Por lo que respecta a la intensidad de la acumulación (pendiente de las líneas en la Figura 8). Durante la primera anualidad, la presencia de captadores de mimbre activos sobre la duna (actualmente enterrados) provocó un crecimiento vertical muy intenso de la misma durante los primeros seis meses. Sin embargo, el menor contraste observado entre los dos semestres de la segunda y tercera anualidades responde a la ausencia de captadores lo que provocó un desarrollo de la acumulación dunar más horizontal que vertical.

Los datos obtenidos durante el inicio del semestre 1 de la cuarta anualidad (Otoño- 2004) parece indicar que la creciente presencia de vegetación sobre la superficie dunar acentuará de nuevo la pendiente de la fase de crecimiento, actuando de un modo similar a como lo hicieron los captadores de arena durante la primera anualidad.

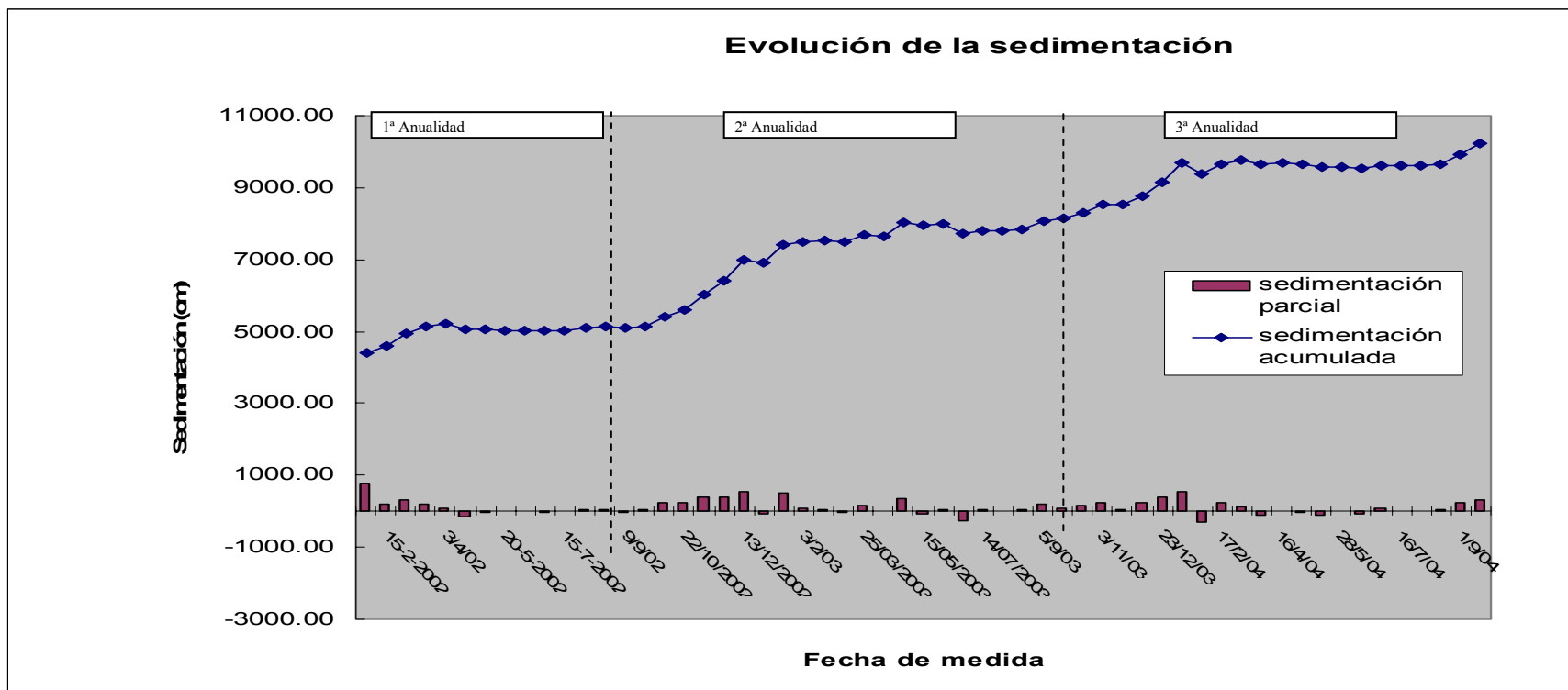


Figura 8. Evolución de la acumulación en la duna a lo largo del período de estudio (oct 01-nov 04).

4.d) Arquitectura deposicional y estructuras sedimentarias

La observación sistemática de los procesos sedimentarios ocurridos en la duna ha permitido poner de manifiesto la gran variedad de estructuras y procesos eólicos activos a distintas escalas desarrollados en esta zona. Esta diversidad es consecuencia del régimen de vientos fuertemente variable en intensidad y dirección que altera notablemente y de manera cíclica la morfología y los procesos imperantes en el sistema dunar. De la misma manera, eventuales episodios erosivos han permitido observar las distintas estructuras sedimentarias que constituyen la arquitectura interna de la duna y que, a su vez son el resultado de la actividad de las estructuras superficiales. Aunque los afloramientos son reducidos y efímeros y las estructuras son poco visibles, ha sido posible identificar las características más evidentes. Entre ellas se describen las más significativas a distinta escala:

i) Sets bipolares

La estructura interna del acúmulo arenoso está compuesta por *sets* oblicuos de extensión métrica y potencia decimétrica que se disponen de manera aproximadamente paralela a ambos flancos de la duna, de manera análoga a la estructura *chevron* típica de ripples de oscilación.

Los *sets* presentan laminaciones internas de distintos tipos y distribución heterogénea, desde cruzada a paralela, y que obedecen a la alternancia de distintos tamaños de grano, desde arena gruesa bioclástica a lutitas limolíticas. Estas laminaciones se interpretan como consecuencia de la superposición de depósitos causados por distintos tipos de estructuras sedimentarias (ripples y dunas) y procesos de sedimentación eólica como *grainfall*, *grainflow* agradación de ripples eólicos y depósitos de adhesión, todos ellos observables en la superficie de la duna.

La formación y disposición de estos *sets* se interpreta como consecuencia de la alternancia en la dirección de los vientos activos sobre la duna, debido al carácter bimodal de los vientos regionales de dirección NW y SE (Figura 9).

ii) Superficies de discontinuidad erosiva

Las superficies entre *sets* son superficies de distinta entidad. En su mayoría responden tanto a superficies de reactivación como a superficies erosivas oblicuas (subparalelas a los flancos de la duna) que limitan los *sets*. Son de mayor importancia las superficies relacionadas con los eventos erosivos debidos a temporales invernales. Estas últimas superficies erosivas se presentan a menudo tapizadas por sedimentos arcillosos de adhesión.

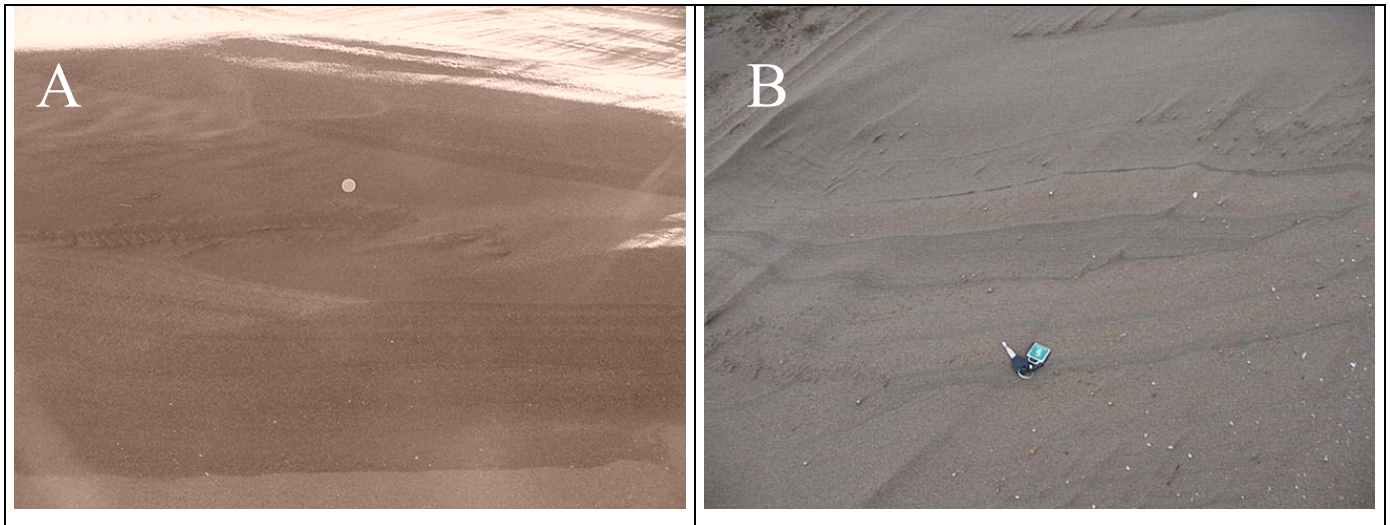


Figura 9. Estructura interna de la duna con laminación producida por la alternancia arena-finos. A: perfil transversal; B: perfil longitudinal.

iii) *Laminaciones diarias*

Los eventuales temporales erosivos dejan al descubierto, especialmente en el flanco norte de la duna, una laminación de alta frecuencia compuesta por la alternancia de láminas centimétricas de arena y láminas milimétricas a centimétricas de limos y arcillas. Esta laminación buza ligeramente (10° - 20°) y de manera uniforme hacia el norte (flanco norte) y forma *sets* de hasta un metro de potencia.

La naturaleza de estos depósitos denota una variación cíclica y frecuente de las condiciones de sedimentación. El tipo de sedimento acumulado responde a una variación tanto en la capacidad de transporte del viento (velocidad) como se deduce de la alternancia en el tamaño de grano (arena vs. arcillas y limos), como en el tipo de sedimentación (agradación de ripples eólicos vs. adhesión).

Efectivamente, este tipo de variaciones en el régimen de vientos y procesos de sedimentación han sido medidos en la playa de Laida en relación a las brisas. Las brisas son especialmente notables en verano cuando la meteorología es menos variable y no se da una superposición sinóptica de vientos regionales. Este patrón varía a lo largo del año, y en invierno el régimen de brisas es similar al expuesto en la Figura 6, pero aparece casi siempre enmascarado por la acción de los fuertes vientos y/o lluvias típicos de esta época.

La génesis de la laminación diaria podría, por tanto, adscribirse a la acción de las brisas, especialmente en verano. En esta época, a partir del mediodía y hasta la medianoche, el viento del

NW con velocidades entre 4 y 6 m/s es capaz de transportar arena sobre la duna mediante la migración de ripples eólicos. Esta migración produciría la acumulación (acreción) de una capa arenosa sobre el sustrato. A partir de la medianoche y hasta el siguiente mediodía, el viento sopla del SE con velocidades que raramente superan los 3 m/s. Durante este periodo no cabe esperar transporte alguno de arena. Sin embargo, el drástico incremento de la humedad relativa del aire debido a un descenso moderado de la temperatura durante la noche provoca la condensación de rocío y el humedecimiento de la superficie dunar. Sobre esta superficie húmeda, y a lo largo de toda la mañana, los sedimentos finos que son transportados en suspensión por el débil viento del SE son susceptibles de depositarse por adhesión, tapizando la superficie de la duna con una delgada lámina. A partir del mediodía, este tapiz de materiales finos es recubierto por sedimento arenoso con ripples que generarán una nueva capa de arena sobre el tapiz arcilloso.

4.d) Volumen, morfología y estructura de acumulación

Dentro del conjunto de Laida se han diferenciado las siguientes zonas: zona dunar norte, zona dunar sur y conjunto de Laida.

i) Zona dunar norte

A fin de comparar directamente los resultados obtenidos durante las tres anualidades de estudio, el volumen de acumulación se ha calculado mediante la diferencia entre las mediciones de cotas topográficas a lo largo del tiempo. Así, durante la primera anualidad se llegaron a acumular 3.708 m³, durante la segunda anualidad 3.500 m³ y en la tercera 2.056 m³ (Figura 10). En consecuencia, durante la primera y segunda anualidades los volúmenes de arena acumulados fueron muy similares, mientras que durante la tercera anualidad el volumen de arena no alcanzó los 2/3 del volumen logrado en las anteriores anualidades. La explicación a este fenómeno se encuentra en el tipo de crecimiento y en la morfología variable de la duna. Así, durante la primera anualidad la superficie de actuación estaba cubierta por los captadores que permitieron una rápida acumulación vertical agradacional con flancos de elevada pendiente. Esta morfología posibilitó durante la segunda anualidad un acumulo de arena equivalente en las zonas de flanco (progradacional) dando lugar a una morfología dunar con pendientes de flanco más suaves. Esta morfología de flancos más tendidos a comienzo de la tercera anualidad permitió durante este último período una menor sedimentación en el área. Secundariamente, el importante volumen arenoso existente en la zona sur

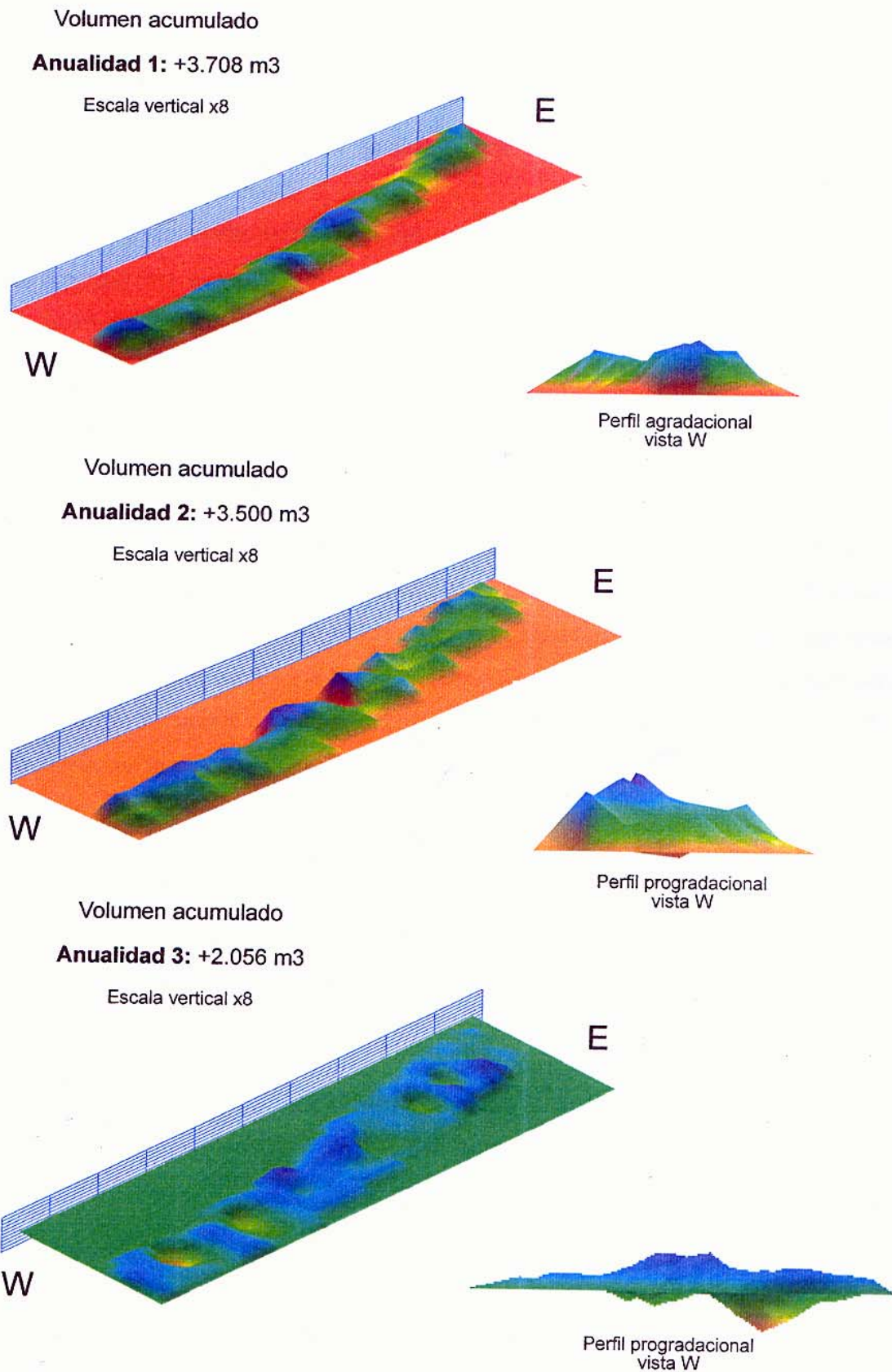


Figura 15. Evolución morfológica del volumen acumulado durante las dos anualidades de estudio. 1ª anualidad perfil agradacional. 2ª anualidad perfil progradacional. 3ª anualidad perfil progradacional.

de Laida como consecuencia del vertido de dragado realizado en Marzo-Junio 2003, podría haber provocado, por un lado, la disminución de la intensidad del viento de componente sur sobre la duna y, por otro lado, la acumulación de arena en la zona central más deprimida de Laida. El resultado final de este proceso ha sido la llegada de una menor cantidad de arena susceptible de ser acumulada en la zona norte de la playa.

En cuanto a la distribución morfológica del volumen acumulado en cada anualidad, durante el primer año los mayores acúmulos de arena tuvieron lugar en la zona central originando una morfología de acumulación dunar con una cresta axial (perfil agradacional). Sin embargo, durante la segunda anualidad las mayores acumulaciones de arena tuvieron lugar en las zonas laterales de la duna, incluso fuera del perímetro original, dando lugar a una morfología de acumulación con dos máximos en las zonas de flanco y una depresión central (perfil progradacional). La mayor amplitud de la duna generada por este proceso durante la segunda anualidad motivó la necesidad de ampliar el perímetro de la zona de actuación (15 m en dirección N y S respectivamente) y la colocación de una nueva fila de estacas graduadas de medida (Fila 0 en el flanco N). Durante la tercera anualidad se ha observado una continuación del crecimiento progradacional disminuyendo aún más la pendiente de los flancos de la duna. Este hecho es particularmente evidente en la vertiente sur, ya que la vertiente norte se encuentra con la barrera natural que supone la línea de costa (Figura 11).

Este variable modo de crecimiento anual de la duna puede observarse también en la Figura 12 donde se aprecia que la altura máxima alcanzada (incremento vertical de 3 m, cota +6,2 m) se logró durante la primera anualidad en la zona axial de la duna mientras que durante los dos años siguientes se fueron alcanzando mayores alturas sobre todo en los flancos de la acumulación dunar.

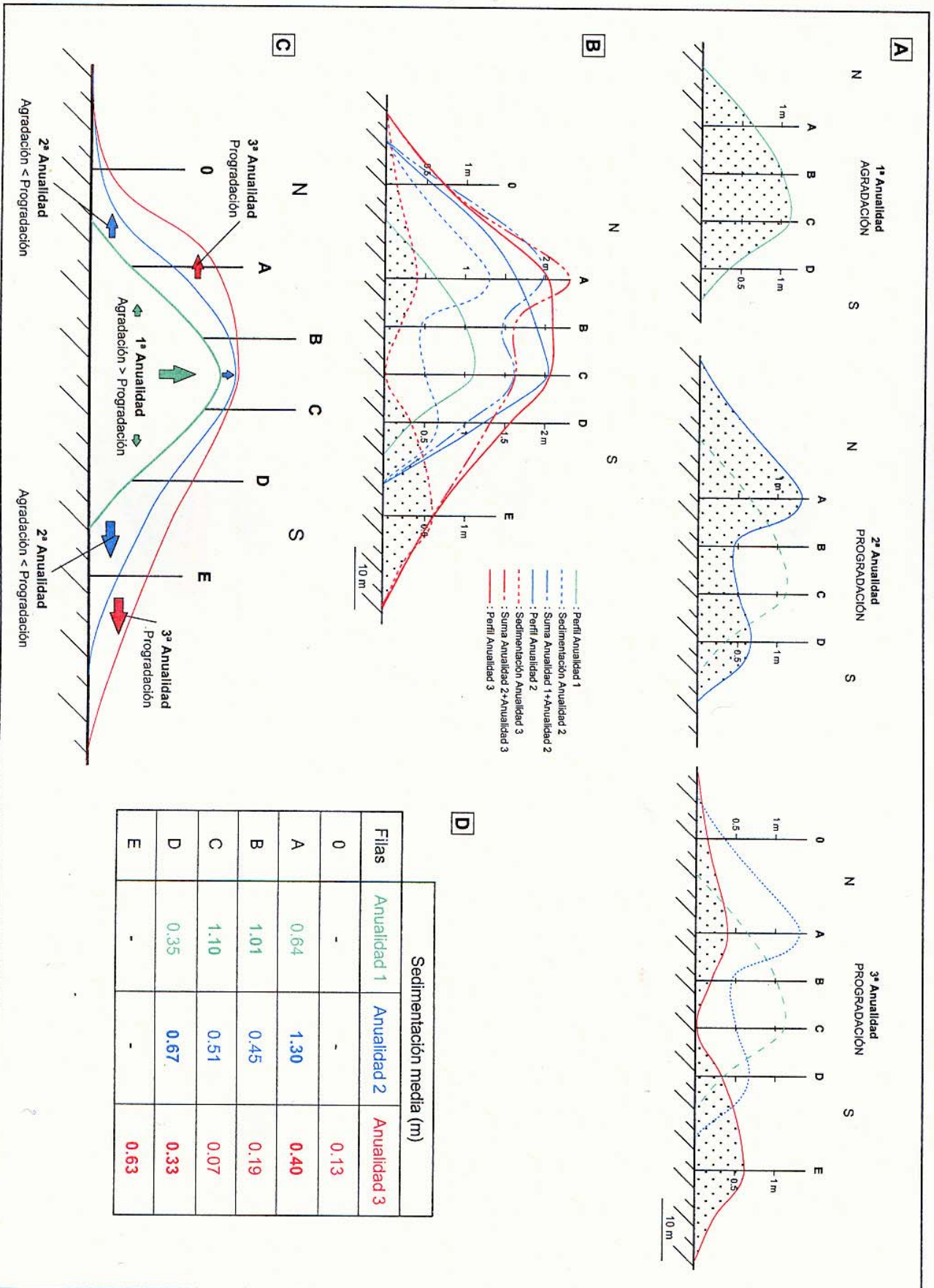


Figura 11. Desarrollo morfológico de la duna durante el periodo de estudio. A: Perfil de la acumulación arenosa para las anualidades 1, 2 y 3 respectivamente. B: Perfiles de los volúmenes acumulados durante las tres anualidades, junto con el perfil teórico y el perfil real obtenido. C: Modelo de crecimiento propuesto. Las letras 0-E corresponden a las filas de estacas instaladas en la duna.

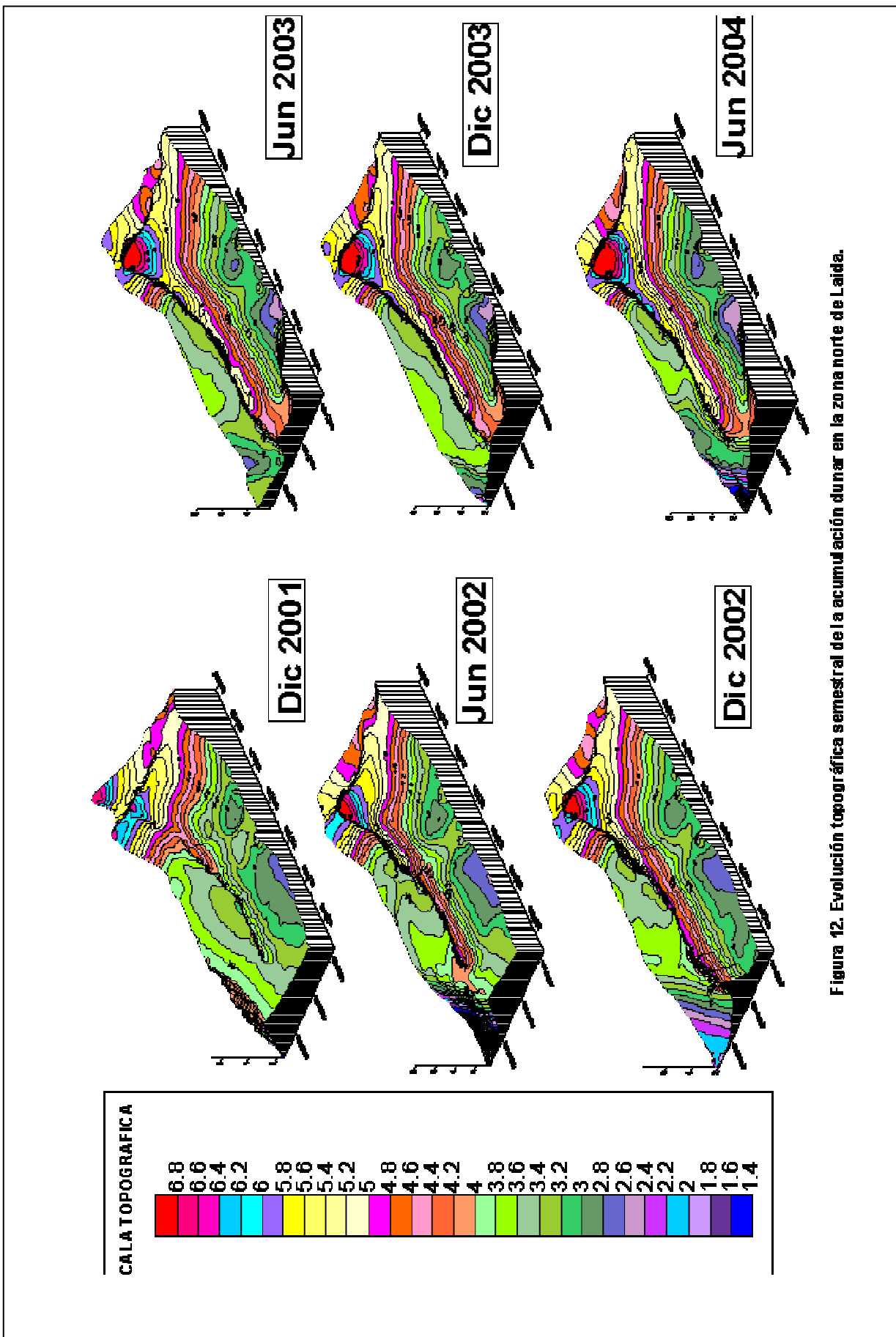
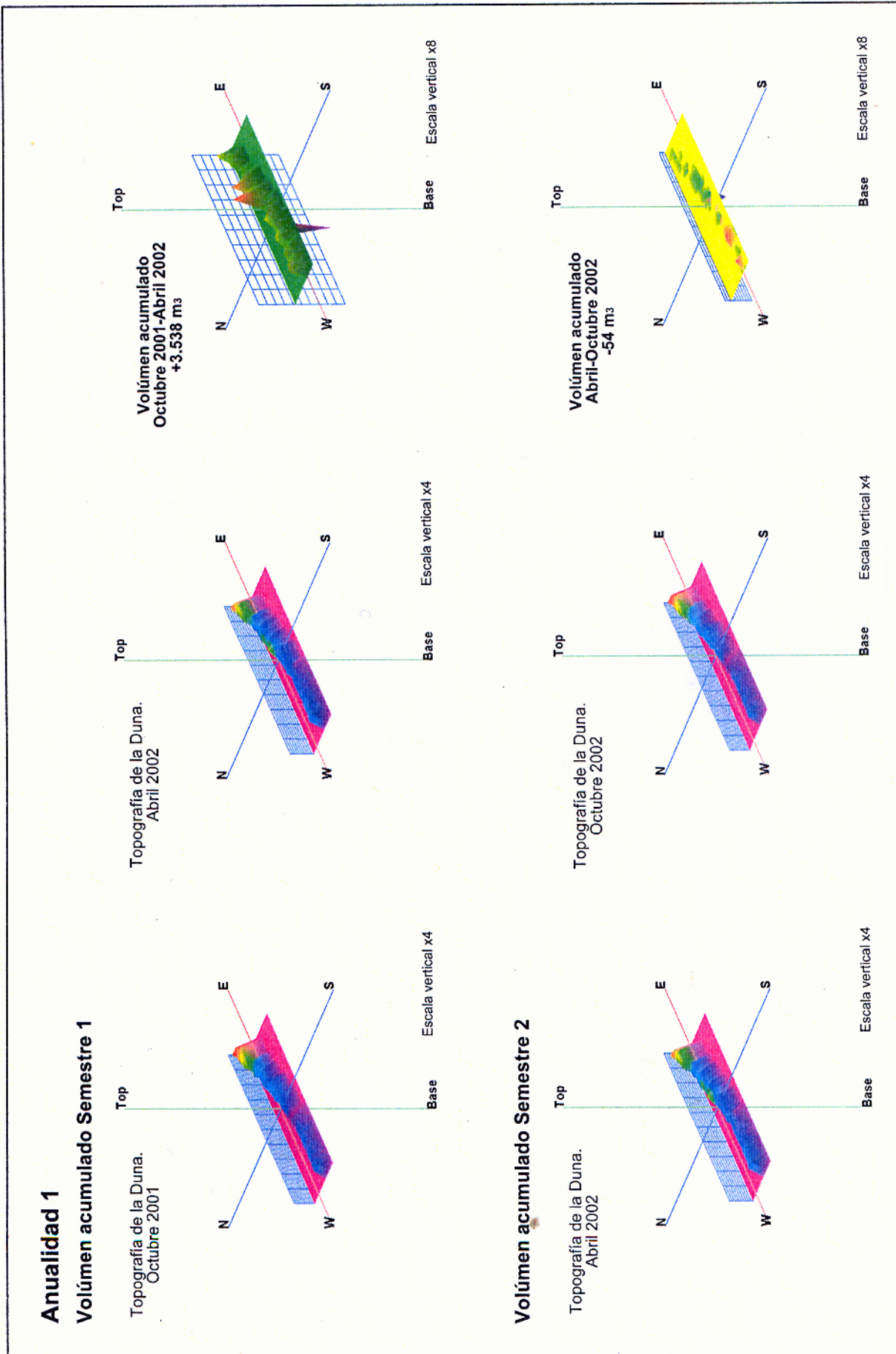
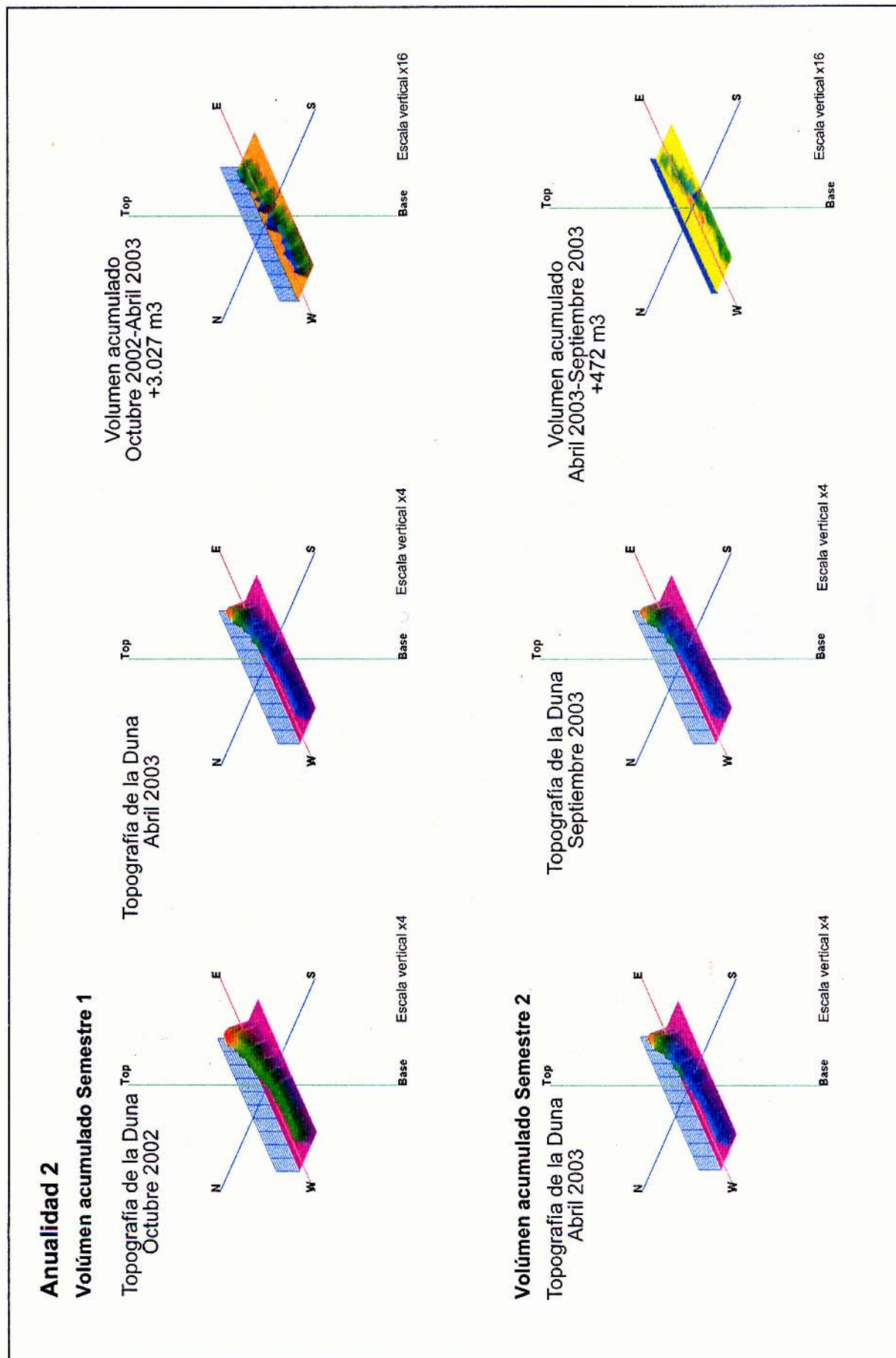


Figura 12. Evolución topográfica semestral de la acumulación dunar en la zona norte de Laida.





ii) Zona dunar sur

Tras el vertido de arenas de dragado sobre la zona sur de Laida en marzo-junio de 2003 se implantaron 14 filas de captadores de mimbre en aras de consolidar el vertido y favorecer el desarrollo de una acumulación dunar en esa zona, al igual que se hizo dos años antes en la zona norte de Laida. Posteriormente, se colocaron 135 estacas graduadas entre las líneas de captadores con el fin de monitorizar los procesos de acumulación/erosión sedimentaria en esta zona. Del mismo modo, en septiembre de 2003 se procedió al vallado perimetral de este área y en Abril-Mayo de 2004 se realizó una plantación de especies vegetales dunares.

Durante el primer año de seguimiento de esta acumulación dunar (junio 2003-junio 2004) se ha observado un importante incremento de arena tanto en la zona sur-este como en la sur-oeste que topográficamente podemos cuantificar en +0.5 m y +0.20 m respectivamente. De este modo los captadores de la zona sureste han sido prácticamente colmatados por la arena acumulada mientras que no ha sido este el caso en la zona sur-oeste. Esta desigual colmatación obedece a la implantación simultánea de varias filas de captadores que actúan haciéndose sombra unas con respecto a otras en relación al viento dominante en cada momento. Este no hubiera sido el caso si la colocación de los captadores se hubiera realizado de modo escalonado en el tiempo. Este acumulo de ha producido debido a la actuación de las filas de captadores de mimbre y se encuentra en una fase genética similar a la definida para la primera anualidad de la zona norte de Laida (crecimiento agradacional). Por otra parte, el margen sur de esta acumulación dunar muestra una actividad fuertemente erosiva como consecuencia de la dinámica del canal mareal, tal y como se describirá en la siguiente sección, mientras que la vertiente norte de esta acumulación muestra una pérdida de ángulo en su flanco hacia la zona central deprimida adquiriendo un relieve más suave y natural con el paso del tiempo (Figuras 14 y 15).

En cuanto al volumen acumulado en esta zona durante su primera anualidad de desarrollo, mediante la diferencia de cotas topográficas se ha estimado un valor total de 6.425 m³. Este resultado indica claramente que los objetivos planteados para iniciar esta actuación se han logrado satisfactoriamente durante su primera anualidad.

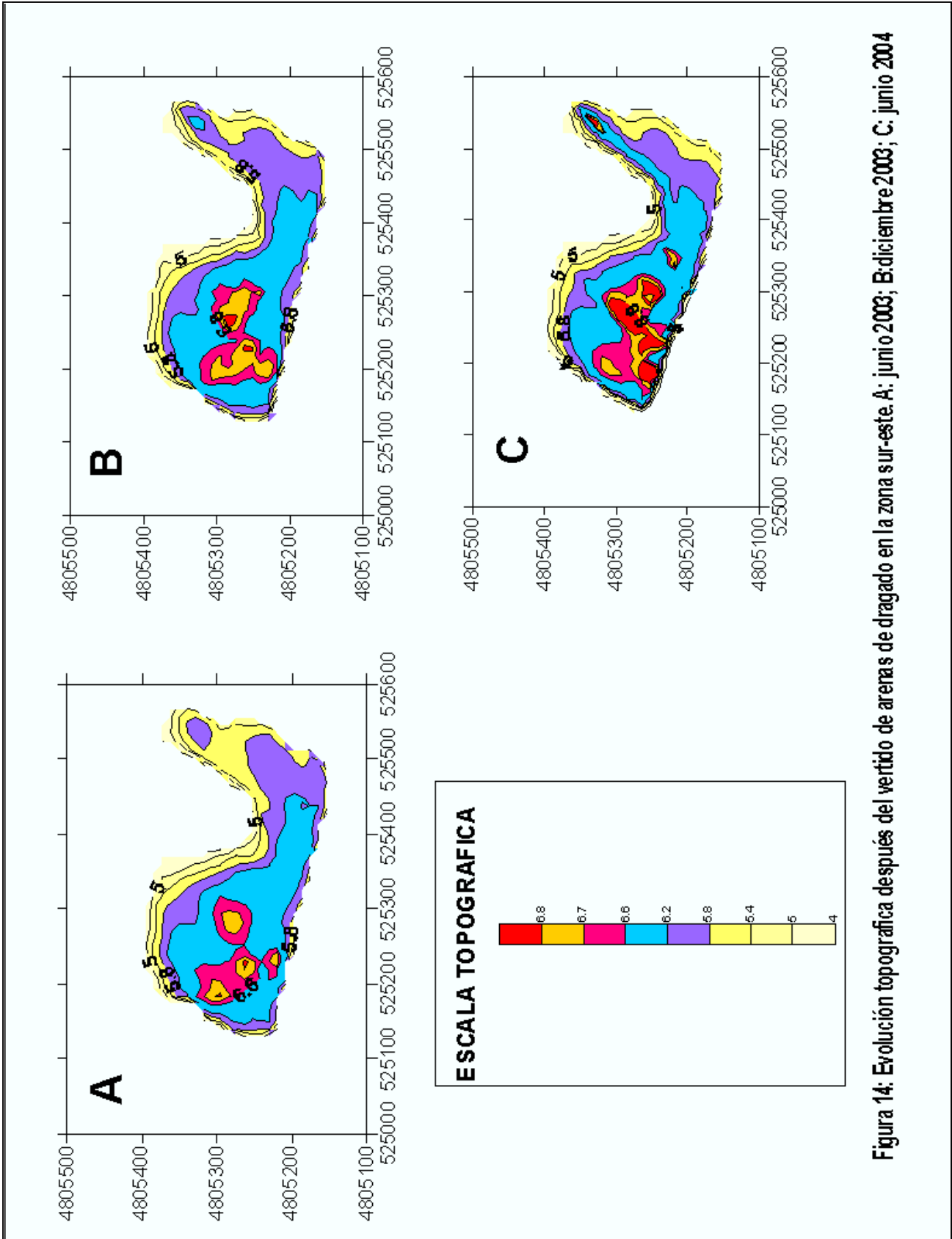


Figura 14: Evolución topográfica después del vertido de arenas de dragado en la zona sur-este. A: junio 2003; B: diciembre 2003; C: junio 2004

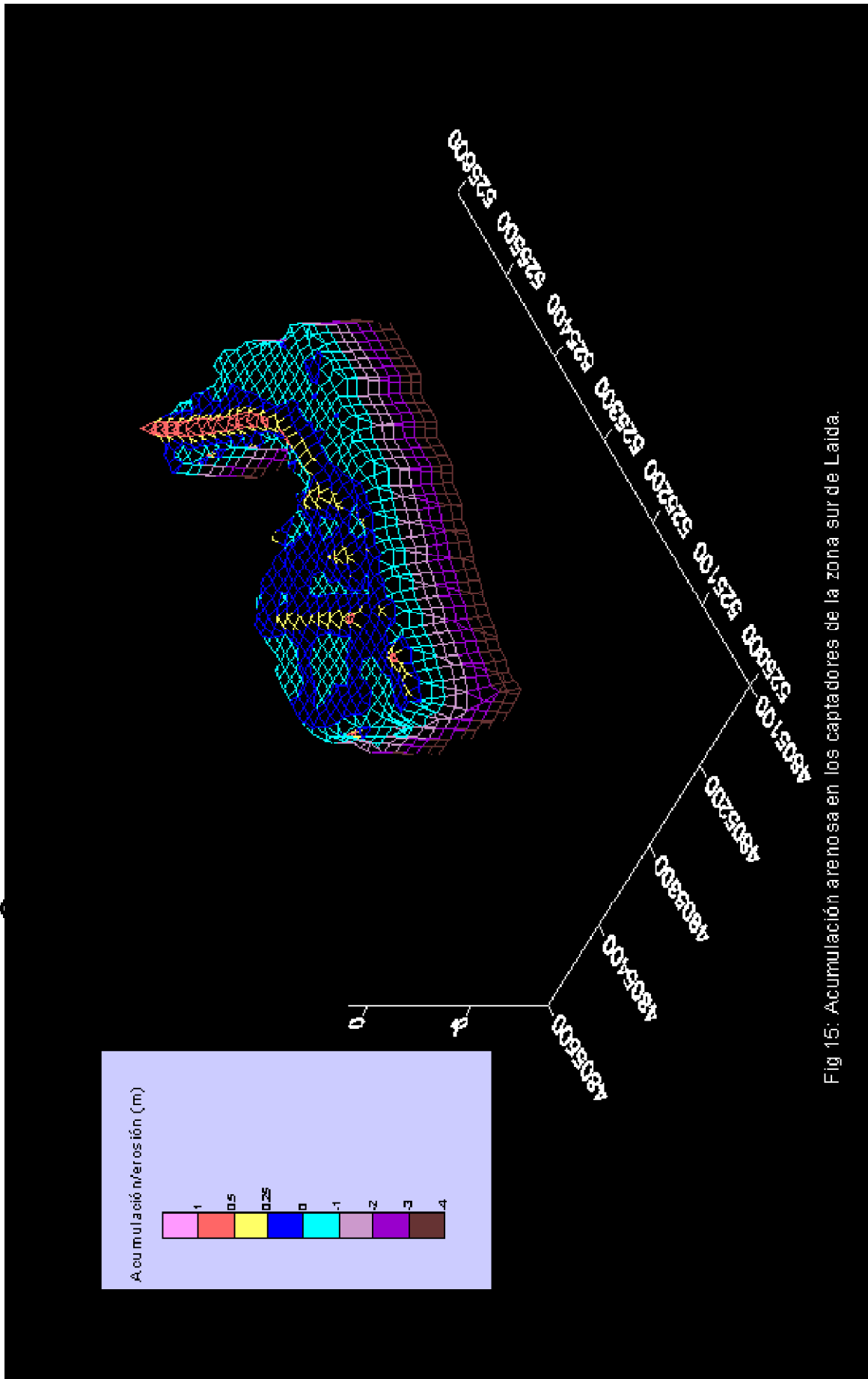


Fig 15: Acumulación arenosa en los captadores de la zona sur de Laida.

iii) Conjunto de Laida

Para el conjunto de Laida se observa un fuerte retroceso erosivo en su margen sur como consecuencia de la actividad del canal mareal. También se produce una erosión del margen noroeste de la playa. El primer proceso responde a la migración lateral del último meandro que describe el canal principal del estuario, meandro de Arketas, mientras que el segundo es consecuencia de las interacciones existentes entre las corrientes mareales de refluo y el oleaje incidente. Por el contrario, la zona supramareal, la zona intermareal norte y el canal principal localizado al oeste de Laida experimentan una acumulación arenosa. Los procesos responsables de la erosión en el margen sur son por un lado, tanto las corrientes mareales, particularmente la de refluo, como la actividad eólica del viento sur. Las corrientes mareales tienden a transportar este sedimento a la zona externa del estuario donde una parte es arrastrada por el oleaje hacia la zona intermareal de la playa de Laida y otra parte, sin embargo, es reintroducida dentro del estuario por las corrientes de flujo. Esta dinámica sedimentaria da lugar a una progresiva acumulación de arena en los fondos del canal principal y en las zonas intermareales adyacentes situadas al norte (delta de refluo o barra de Mundaka y zona intermareal de la playa de Laida) y al sur (delta de flujo) (Figuras 16, 17 y 18). Asimismo, parte de la arena erosionada se acumula en las zonas de regeneración dunar debido a la acción eólica.



Figura 16. Vista aérea oblicua de la desembocadura del estuario.

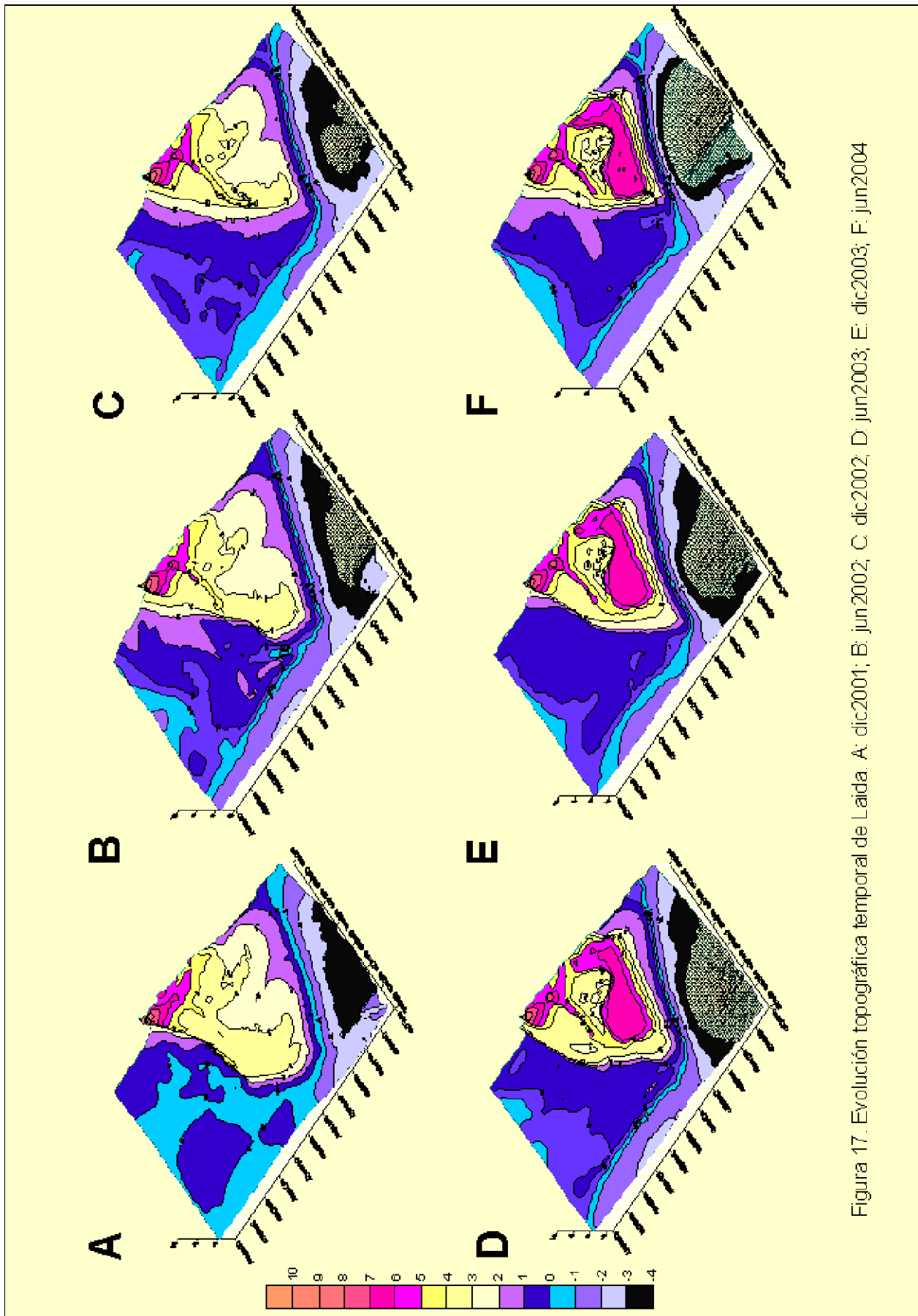


Figura 17. Evolución topográfica temporal de Laida. A: dic2001; B: jun2002; C: dic2002; D: jun2003; E: dic2003; F: jun2004

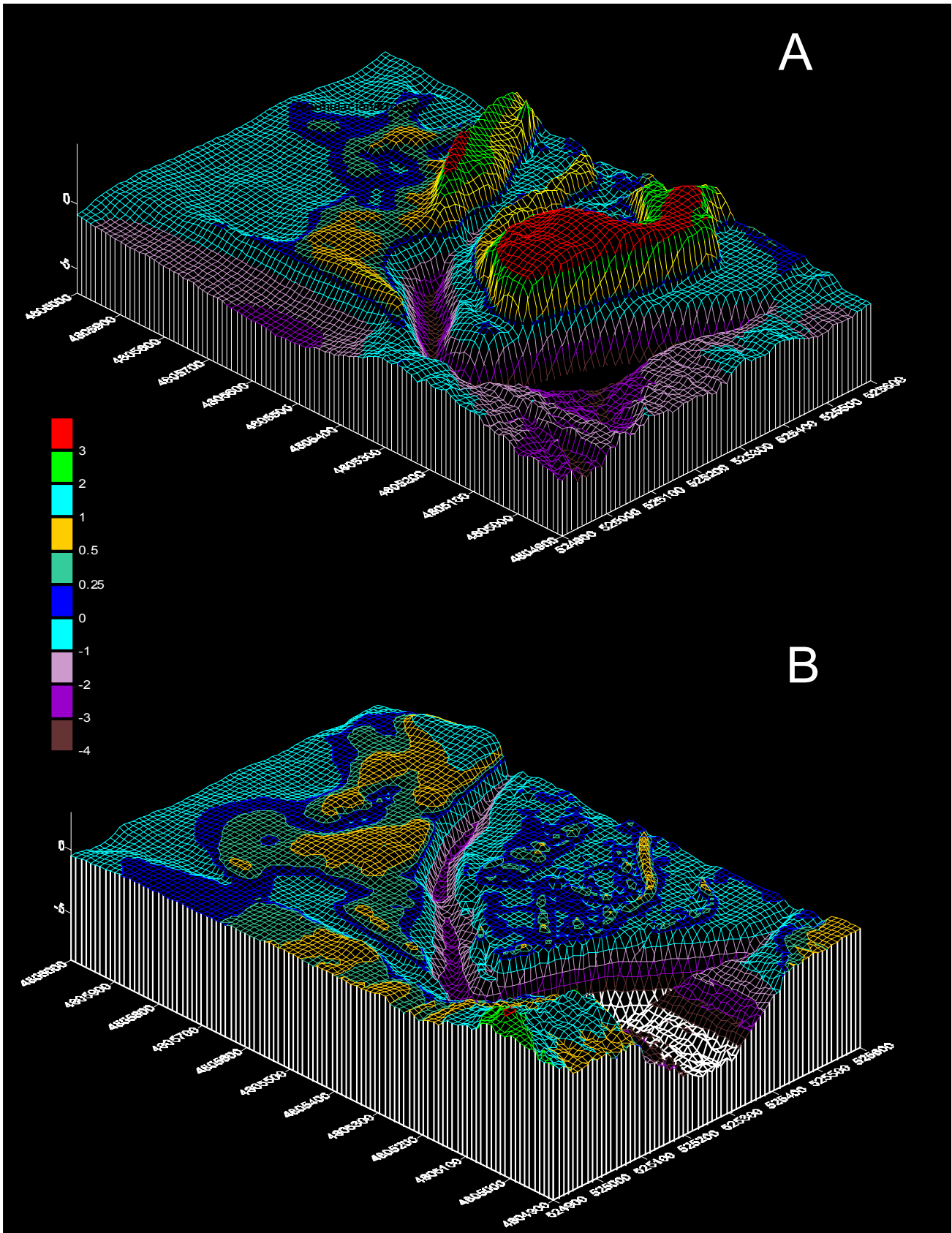


Figura 18. Evolución de los procesos de acumulación/erosión para el conjunto de Laida durante el periodo de estudio. A: diciembre 2001-junio 2003; B: junio 2003-2004.

El análisis en detalle de la evolución morfológica de la playa de Laida observada en un corte transversal N-S muestra como a lo largo del período de estudio se ha producido un importante retroceso erosivo que supera los 130 m lineales en dirección norte, habiéndose calculado un volumen de pérdida de arena equivalente a 160.000 m³ aproximadamente (Figura 18).

Por el contrario, en la zona intermareal norte de la playa de Laida se observa un incremento de arena cuantificado en 76.000m³, probablemente procedentes de la erosión del margen sur (Figura 18). El resto de los materiales ahí erosionados se encontraría acumulado formando parte de los deltas de flujo y reflujos y en el fondo del canal.

Asimismo, en la zona intermareal norte se observan variaciones cíclicas estacionales en el perfil de la playa. Desde el semestre más erosivo (Octubre-Marzo) hasta el intervalo más acumulativo (Abril-Septiembre) el cambio en las condiciones de oleaje conlleva una movilización de material desde las zonas sumergidas hacia las más someras, esto es, un avance de la línea de costa en período de calma.



Figura 19: Perfil de playa y oleaje incidente en la zona norte de la playa de Laida. A: perfil de invierno; B: perfil de verano; C: oleaje en invierno; D: oleaje en verano.

Tras una temporada de repetidos temporales, la playa alcanza una posición de cuasi-equilibrio que se aproxima al de las playas disipativas y se dice que la playa ha alcanzado su perfil de invierno (Figuras 19A, C y 20).

Contrariamente, tras largos períodos de calma, la playa recupera un perfil cercano al reflejante, indicando que ha alcanzado su perfil de verano. En este caso, el borde de la berma marca claramente el inicio del frente de playa. En la playa seca pueden apreciarse restos de las bermas y escarpes correspondientes a perfiles más retrasados producidos por condiciones de oleaje más energéticas. (Figuras 19B, D y 20)

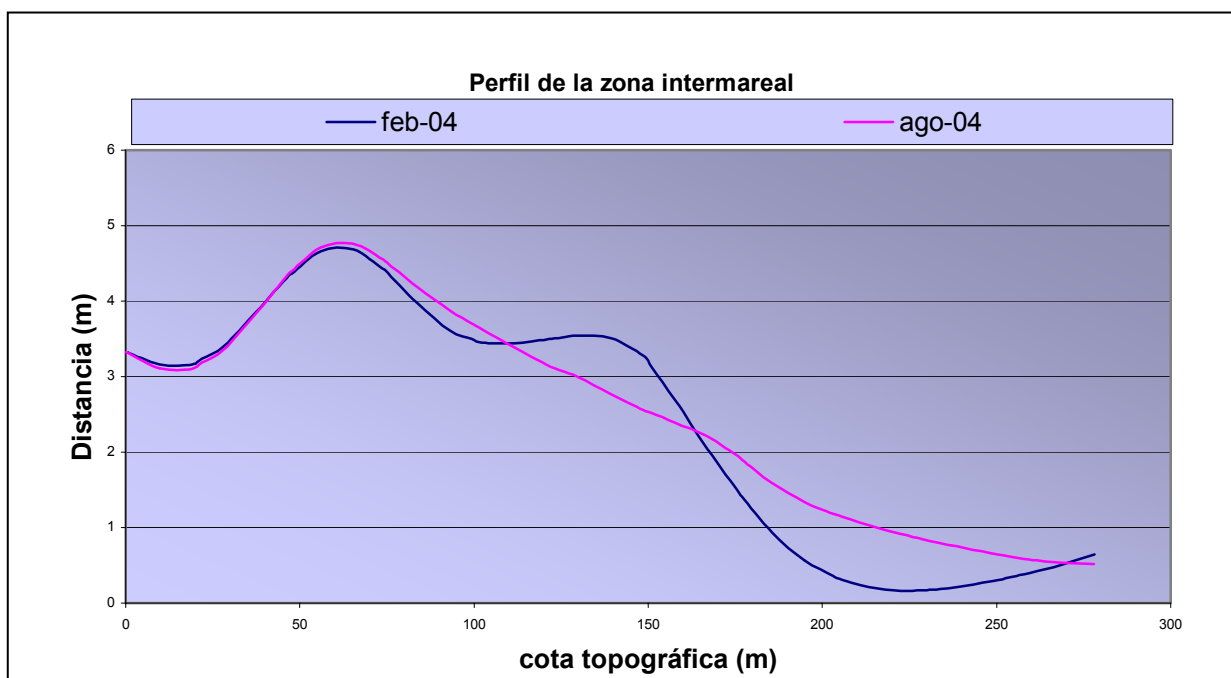


Figura 20. Superposición de perfiles de playa (perpendiculares a la línea de costa) de invierno y verano en la parte norte de la playa de Laida.

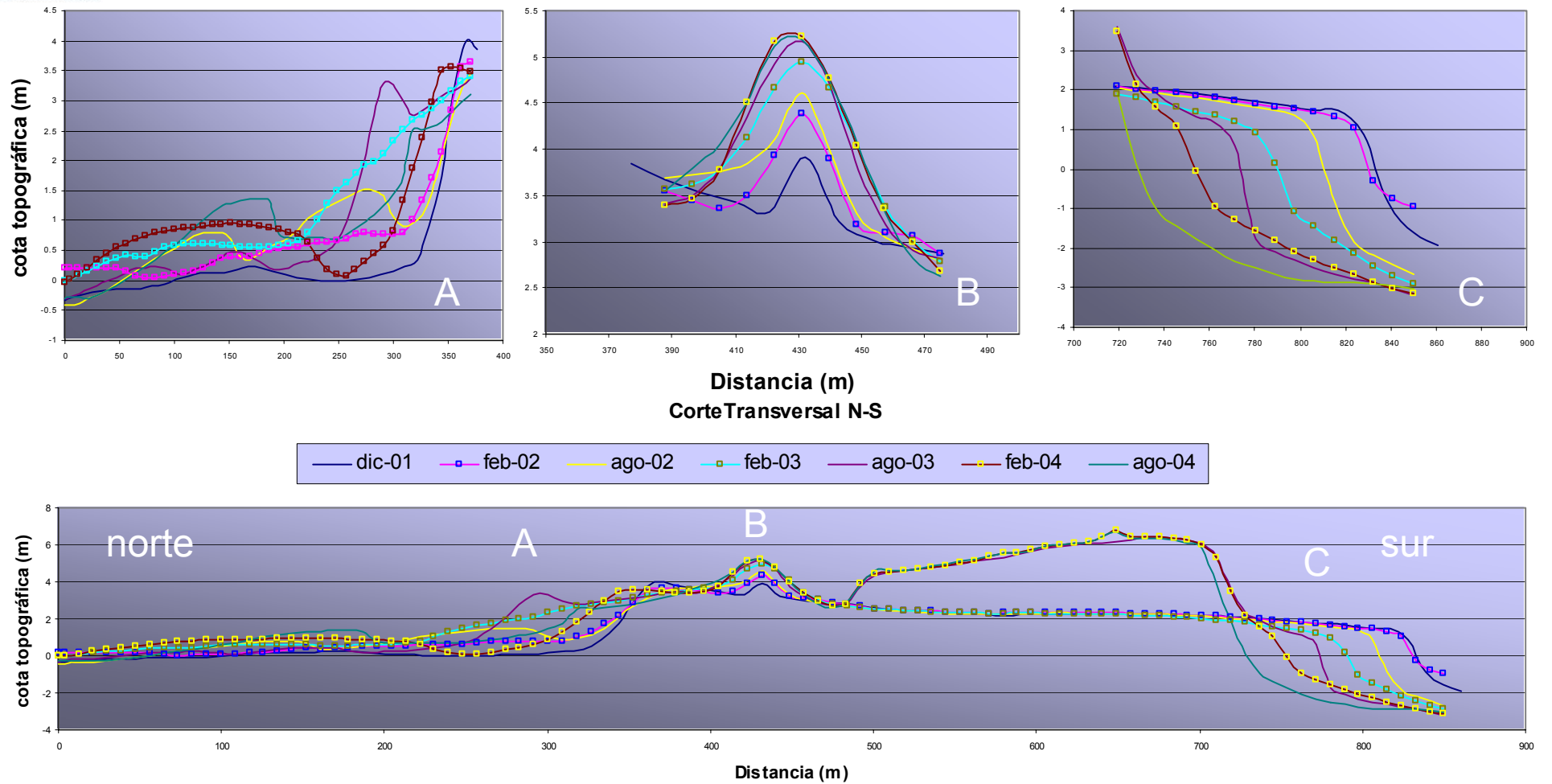


Figura 20. Evolución del perfil transversal N-S de Laida a lo largo del período de estudio.

4.f Modelo de evolución dunar

La integración de los distintos parámetros (meteorológicos, sedimentarios, oceanográficos) involucrados en este estudio ha permitido establecer un modelo de evolución genética del proceso de regeneración dunar en la playa de Laida.

Así, bajo condiciones de vientos moderados (comunes durante los semestres 1 y 2) se produce un depósito de arena tanto en los flancos como en la zona de cresta con la formación de pequeñas dunas y ripples progradantes (Figura 21A). El resultado de este proceso es la formación de sets bipolares métricos compuestos por los diferentes tipos de laminaciones (ver sección 4d).

Bajo condiciones de viento norte fuerte (predominantes durante el semestre 1) tiene lugar una fuerte erosión en el flanco norte y en la zona de cresta dando lugar a la acumulación de arena en el flanco sur. En condiciones húmedas y de fuerte viento la sedimentación se produce por adhesión. Este proceso da lugar a superficies de erosión/reactivación en la estructura de la duna (Figura 21B).

Por último, en condiciones de viento sur fuerte y condiciones ambientales secas (predominantes también durante el semestre 1) se produce una importante erosión en el flanco sur y un depósito elevado en las zonas de cresta y flanco norte de la duna. Los sets tienden a cubrir la superficie erosiva y fosilizan el relieve erosional. En esta situación se produce, asimismo, un importante transporte sin sedimentación (*bypass*) en la zona dunar (Figura 21C).

5. Conclusiones

- La interpretación de los datos meteorológicos ha permitido caracterizar en detalle el patrón de vientos imperante en la playa de Laida, desde la escala diaria (brisas terrales y marinas) hasta la anual (zonación semestral en la dirección e intensidad del viento).
- La acumulación arenosa en el área de regeneración se ha producido de forma continuada a lo largo del periodo de estudio, especialmente durante el período Octubre-Marzo (Semestre 1) debido a la actividad de los vientos dominantes de dirección N y S de velocidad superior a 4 m/s (16 Km/h).
- El desarrollo morfológico de la duna durante todo el período de estudio ha experimentado dos etapas: una primera anualidad con crecimiento fuertemente agradacional (vertical) y una segunda y tercera anualidades con un crecimiento fundamentalmente progradacional (horizontal).

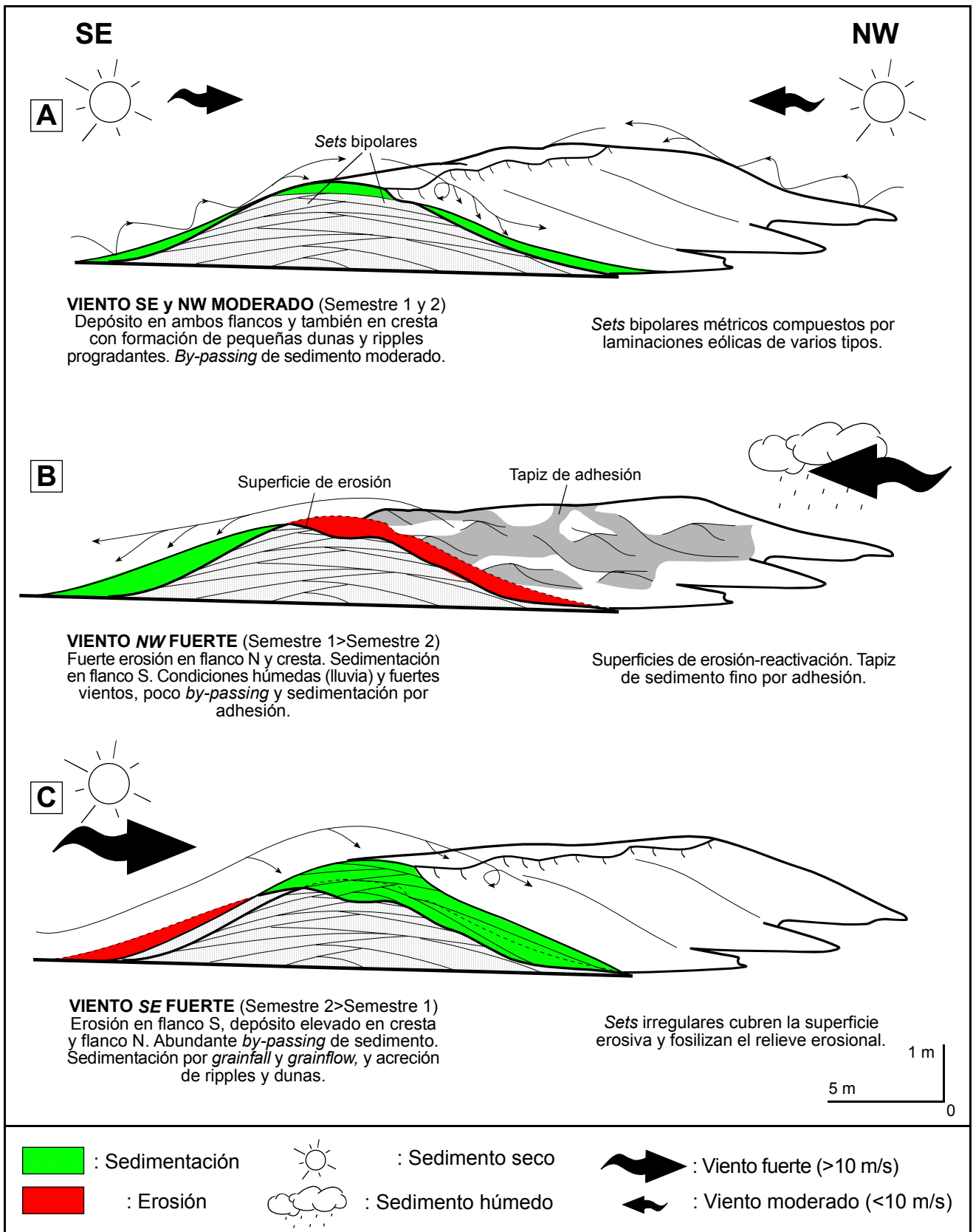


Figura 21: Modelo de evolución de la duna costera en la playa de Laida. Se representan las 3 situaciones (a, b y c) más comunes en la evolución de la duna, con indicación de los procesos meteorológicos y sedimentarios actuantes, así como las estructuras sedimentarias generadas.

- El volumen total acumulado en la duna norte durante el periodo de estudio ha sido de 12.200 m³. Esta acumulación se concentra fundamentalmente durante el primer semestre de cada anualidad.
- El volumen de arena acumulado en la duna sur durante el periodo Junio 2003-2004 ha sido de 6.400 m³.
- Alrededor de la actuación regenerativa se ha detectado una erosión intensa en las zonas S (160.000 m³) y WNW y una acumulación sedimentaria en la zona intermareal N (76.000 m³).
- Las operaciones de dragado influyen sobre la dinámica sedimentaria de manera significativa alterando los procesos sedimentarios.
- La continua monitorización de los procesos sedimentarios, meteorológicos y oceanográficos es una poderosa herramienta para establecer criterios que permitan la toma de decisiones correctas en la gestión de este área protegida.

6. Agradecimientos

El equipo redactor de este informe quiere expresar su reconocimiento al Director-Conservador del Patronato de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai, Xabier Arana, por su apoyo decidido a este proyecto de seguimiento geológico y la infraestructura puesta a nuestra disposición, haciendo que el trabajo se realizara en las mejores condiciones posibles. Asimismo, nuestro agradecimiento a Joseba Abaitua por su dedicación personal en la producción de una excelente información topográfica. Al Ayuntamiento de Ibarangelua y al personal del Bar Atxarre por facilitar la instalación de la estación meteorológica en Laida. Los otros datos meteorológicos fueron amablemente cedidos por el Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente del Gobierno Vasco. Este trabajo ha sido financiado con cargo a la Cátedra UNESCO sobre Desarrollo Sostenible y Educación Ambiental en el marco de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai.



ANEXO FOTOGRÁFICO

Evolución morfológica de Laida durante el periodo de estudio.



Junio 2001



Junio 2002



Marzo 2003



Junio 2003



Noviembre 2003



Mayo 2004



Septiembre 2004