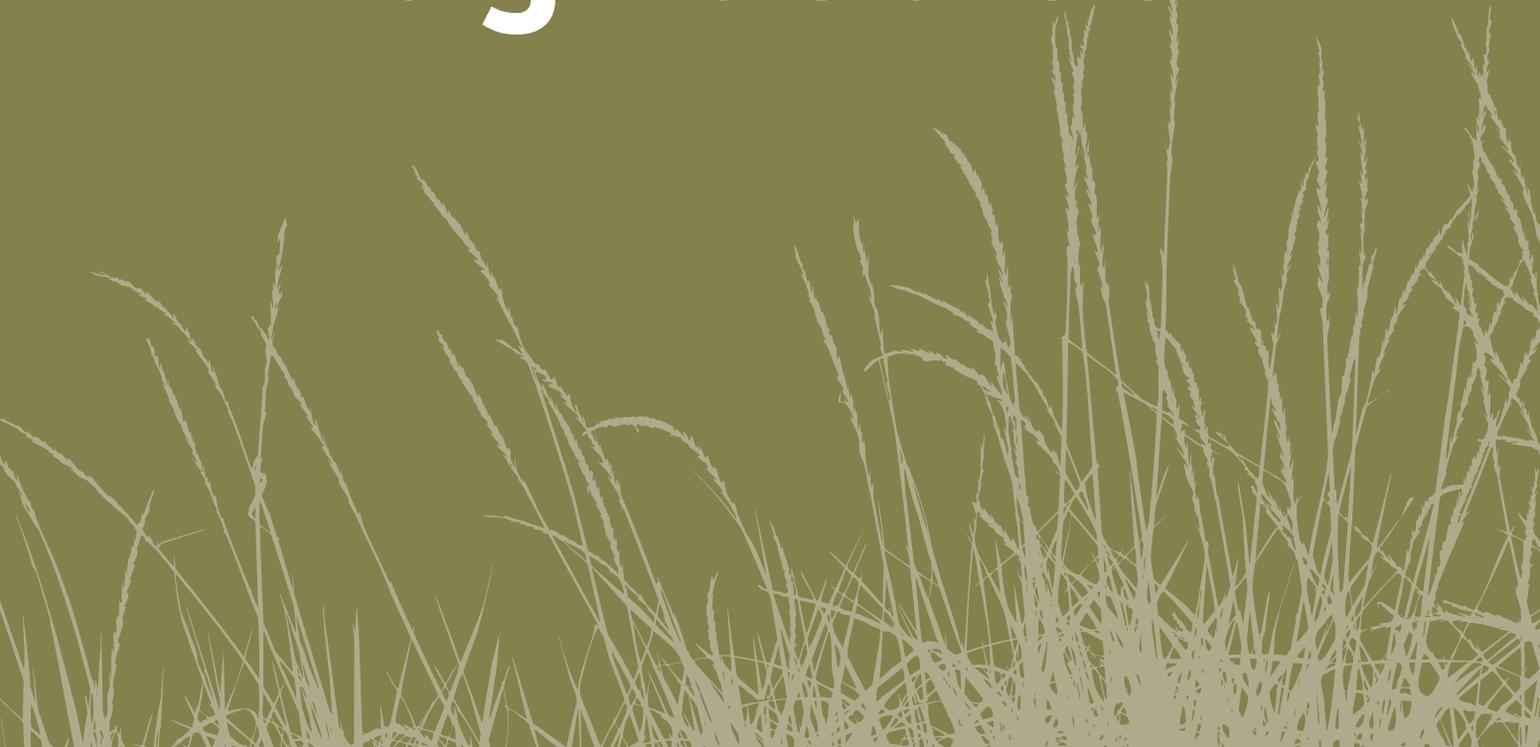


5

Diagnóstico





Introducción

A la hora de abordar cualquier tipo de actuación de gestión en un ecosistema, incluida la restauración, se debe de establecer como primer paso cuál es el estado de conservación/degradación y cuáles son los factores que lo han llevado a tal situación. Para ello, es necesario realizar un estudio detallado de los elementos físicos y biológicos que forman dicho ecosistema, así como de los procesos y relaciones que los mantienen en el espacio y en el tiempo (procesos geomorfológicos y ecológicos).

En los últimos años se han desarrollado numerosos índices para evaluar la sensibilidad o vulnerabilidad de las zonas costeras debida a factores naturales o antrópicos. Se entiende por vulnerabilidad la pérdida de capacidad de un ecosistema de retornar al estado original después de una perturbación. Vulnerabilidad es un antónimo de elasticidad (Orians, 1975) o resiliencia (Pimm, 1991).

Asimismo, existe un amplio abanico de índices que se han formulado como herramienta de diagnóstico y gestión en la prevención de riesgos derivados del aumento potencial del nivel del mar (Gornitz, 1990, 1992; Hughes *et al.*, 1992; Daniels *et al.*, 1992; entre otros), en la identificación de áreas susceptibles de erosión (Queleennec, 1989; Gornitz y Kanciruk, 1989) y en la elaboración de sistemas de información costera (Flemming y Townend, 1989; Williams *et al.*, 1993). Estos índices suelen aplicar factores hidrodinámicos, climáticos y antrópicos. Los índices específicos para determinar la capacidad de respuesta a la perturbación natural y humana de sistemas dunares activos europeos son los elaborados por Bodere *et al.*, (1991) en País de Gales y Bretaña Occidental; Williams *et al.*, (1993), para Inglaterra y Williams *et al.*, (1994), para el SW de la Península Ibérica. Estos índices fueron obtenidos a partir de listas de control.

A pesar de los numerosos índices desarrollados por los diversos investigadores, no existe en la actualidad uno que esté totalmente aceptado por la comunidad científica. No obstante, al objeto de aportar información sobre el conjunto de variables que deben ser analizadas a la hora de realizar un diagnóstico del estado de un sistema dunar y un posible método de analizar la vulnerabilidad de estos ámbitos litorales, se presenta a continuación el índice de vulnerabilidad desarrollado por García Mora y colaboradores (2001).

5.2

Vulnerabilidad del sistema dunar

García Mora y colaboradores (2001) elaboraron un **índice de vulnerabilidad** específico para las costas españolas, aunque desarrollado en el Golfo de Cádiz, se amplió posteriormente a una zona geográfica más amplia (Williams *et al.*, 2001), y últimamente, ha sido aplicado en costas tropicales del Golfo de México (Martínez *et al.*, 2006).

En este índice de vulnerabilidad, además de variables geomorfológico-sedimentarias, marinas, climáticas y antrópicas, se han incluido variables ecológicas, que tienen en cuenta el estado de la vegetación dunar. Mediante la aplicación del índice a partir de una lista de control, es posible sectorizar el frente costero y establecer comparaciones en un contexto espacial, facilitando el establecimiento de prioridades de conservación y gestión, incluida la restauración. Asimismo, permite establecer el origen de la alteración para diseñar medidas correctoras.

La vulnerabilidad de un sistema dunar se determina mediante el denominado “índice de vulnerabilidad” que sintetiza de forma cuantitativa la capacidad de respuesta de un sistema dunar costero ante los diversos procesos que interactúan y determinan los ajustes y la evolución del frente costero. El índice de vulnerabilidad se termina evaluando de 0 a 4 las 54 variables descriptivas del sistema dunar que se establecen en la Tabla 5.1, agrupadas en función del tipo de proceso en el que se integran: geomorfo-sedimentario, oceanográfico, climático, ecológico y antrópico. El valor de 0 a 4 se asigna en función de un valor físico cuantitativo de la variable, de tal manera que el valor 0 corresponde a la condición óptima para la conservación del sistema dunar, mientras que el valor 4 corresponde al caso opuesto.

El rango de valores que toma cada variable se ha basado en información obtenida a partir de la bibliografía existente así como del consenso de un grupo multidisciplinar e internacional de expertos en zonas costeras (Proyecto Dunes-ELOISE, V Programa Marco UE). Considerando cada grupo de variables independientemente, se obtiene un índice de vulnerabilidad parcial que permite identificar el tipo de proceso dominante en la pérdida de resiliencia del sistema: a) características geomorfológicas, b) efecto erosivo marino, c) efecto erosivo eólico, d) características de la cubierta vegetal o, e) efecto de los impactos humanos. La aplicación de este índice se ha demostrado útil en un amplio rango de sistemas dunares costeros. Las bases conceptuales de este diagnóstico, así como la metodología empleada en su aplicación a los sistemas dunares costeros se exponen a continuación.

Para la realización del estudio de vulnerabilidad, los sistemas dunares deben clasificarse previamente en tramos con características homogéneas y aplicarse una lista de control a un sector costero de 100m representativo del mismo.

En el Tabla 5.1., se muestra la *lista de control* utilizada para el cálculo del *índice de vulnerabilidad*.

Tabla 5.1. Lista de control aplicada en el estudio de vulnerabilidad del sistema dunar

A. ÍNDICE GEOMORFOLÓGICO-SEDIMENTARIO DEL SISTEMA DUNAR (IGD)

1. Longitud del sistema dunar activo (Km)	<input type="checkbox"/> 0 >20	<input type="checkbox"/> 1 >10	<input type="checkbox"/> 2 >5	<input type="checkbox"/> 3 >1	<input type="checkbox"/> 4 >0.1
2. Anchura del sistema dunar activo (Km)	<input type="checkbox"/> 0 >2	<input type="checkbox"/> 1 >1	<input type="checkbox"/> 2 >0.5	<input type="checkbox"/> 3 >0.1	<input type="checkbox"/> 4 <0.1
3. Anchura de la duna primaria en % de la del sistema dunar activo <5	<input type="checkbox"/> 0 <5	<input type="checkbox"/> 1 <25	<input type="checkbox"/> 2 <50	<input type="checkbox"/> 3 <75	<input type="checkbox"/> 4 >75
4. Altura modal de las dunas del sistema dunar costero (m)	<input type="checkbox"/> 0 >25	<input type="checkbox"/> 1 >10	<input type="checkbox"/> 2 >5	<input type="checkbox"/> 3 >1	<input type="checkbox"/> 4 <1
5. Altura modal de la duna primaria (m)	<input type="checkbox"/> 0 >25	<input type="checkbox"/> 1 >15	<input type="checkbox"/> 2 >10	<input type="checkbox"/> 3 >5	<input type="checkbox"/> 4 <5
5a. Si cordones dunares paralelos: n°	<input type="checkbox"/> 0 ≥10	<input type="checkbox"/> 1 >4	<input type="checkbox"/> 2 >2	<input type="checkbox"/> 3 2	<input type="checkbox"/> 4 1
5b. Si duna rampante: pendiente de la base	<input type="checkbox"/> 0 Suave		<input type="checkbox"/> 2 Media		<input type="checkbox"/> 4 Alta
5c. Si duna sobre acantilado: altura del acantilado (m)	<input type="checkbox"/> 0 <2		<input type="checkbox"/> 2 2-5		<input type="checkbox"/> 4 >5
6. Superficie relativa de las depresiones interdunares húmedas	<input type="checkbox"/> 0 Media		<input type="checkbox"/> 2 Escasa		<input type="checkbox"/> 4 Ninguna
7. Grado de fragmentación del Sistema dunar.	<input type="checkbox"/> 0 Bajo		<input type="checkbox"/> 2 Medio		<input type="checkbox"/> 4 Alto
8. Granulometría de la ladera de barlomar de la duna primaria (ϕ)	<input type="checkbox"/> 0 ≤-1	<input type="checkbox"/> 1 0	<input type="checkbox"/> 2 1	<input type="checkbox"/> 3 2	<input type="checkbox"/> 4 3

B. ÍNDICE DE INCIDENCIA MARINA (IIM)					
1. Fetch geográfico (Km)	<input type="checkbox"/> 0 <25	<input type="checkbox"/> 1 <100	<input type="checkbox"/> 2 <250	<input type="checkbox"/> 3 >500	<input type="checkbox"/> 4 >1000
2. Estado modal de la playa	<input type="checkbox"/> 0 Disipa.		<input type="checkbox"/> 2 Interm.		<input type="checkbox"/> 4 Reflej.
3. Anchura de la zona intermareal (Km)	<input type="checkbox"/> 0 >0,5	<input type="checkbox"/> 1 >0,2	<input type="checkbox"/> 2 >0,1	<input type="checkbox"/> 3 >0,05	<input type="checkbox"/> 4 <0,05
4. Carrera de marea (m)	<input type="checkbox"/> 0 <2		<input type="checkbox"/> 2 2-4		<input type="checkbox"/> 4 >4
5. Exposición costera ⁽¹⁾	<input type="checkbox"/> 0 10-45°		<input type="checkbox"/> 2 0-10°		<input type="checkbox"/> 4 0°
6. N° de barras arenosas sumergidas o emergidas	<input type="checkbox"/> 0 >1		<input type="checkbox"/> 2 1		<input type="checkbox"/> 4 0
7. Anchura de la playa seca (m)	<input type="checkbox"/> 0 >75	<input type="checkbox"/> 1 <75	<input type="checkbox"/> 2 <25	<input type="checkbox"/> 3 <10	<input type="checkbox"/> 4 0
8. Superficie relativa de los cortes en la duna primaria debidos al oleaje	<input type="checkbox"/> 0 0%	<input type="checkbox"/> 1 <5%	<input type="checkbox"/> 2 <20%	<input type="checkbox"/> 3 <50%	<input type="checkbox"/> 4 >50%
9. % de la longitud de la duna primaria con escarpes de erosión debidos al oleaje	<input type="checkbox"/> 0 0	<input type="checkbox"/> 1 <25	<input type="checkbox"/> 2 <50	<input type="checkbox"/> 3 <75	<input type="checkbox"/> 4 >75
10. Granulometría del sedimento de la playa seca (ϕ)	<input type="checkbox"/> 0 <0		<input type="checkbox"/> 2 0-2		<input type="checkbox"/> 4 >2

C. ÍNDICE DE INCIDENCIA EÓLICA (IIE)

1. Aporte de sedimento a la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 Alto	<input type="checkbox"/> 2 Moderado	<input type="checkbox"/> 4 Bajo		
2. % de la playa seca ocupado por dunas embrionarias	<input type="checkbox"/> 0 >50	<input type="checkbox"/> 1 <50	<input type="checkbox"/> 2 <25	<input type="checkbox"/> 3 <5	<input type="checkbox"/> 4 0
3. % sobre la superficie del sistema dunar ocupado por cubetas de deflación	<input type="checkbox"/> 0 ≤5%	<input type="checkbox"/> 1 >5%	<input type="checkbox"/> 2 >10%	<input type="checkbox"/> 3 >20%	<input type="checkbox"/> 4 >40%
4. % sobre la superficie de la duna primaria ocupado por pasillos de deflación	<input type="checkbox"/> 0 <5%	<input type="checkbox"/> 1 <10%	<input type="checkbox"/> 2 <25%	<input type="checkbox"/> 3 <50%	<input type="checkbox"/> 4 >50%
4.1. Si pasillos de deflación, profundidad como % de la altura de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 <5%	<input type="checkbox"/> 1 <10%	<input type="checkbox"/> 2 <25%	<input type="checkbox"/> 3 <50%	<input type="checkbox"/> 4 >50%
5. % de la superficie de la playa seca cubierto por residuos orgánicos	<input type="checkbox"/> 0 0%	<input type="checkbox"/> 1 <5%	<input type="checkbox"/> 2 >5%	<input type="checkbox"/> 3 >25%	<input type="checkbox"/> 4 >50%
6. % de la superficie de la playa seca con cobertura de gravas	<input type="checkbox"/> 0 0%	<input type="checkbox"/> 1 <5%	<input type="checkbox"/> 2 >5%	<input type="checkbox"/> 3 >25%	<input type="checkbox"/> 4 >50%
7. % de la superficie de la playa seca con cobertura de conchas	<input type="checkbox"/> 0 0%	<input type="checkbox"/> 1 <5%	<input type="checkbox"/> 2 <25%	<input type="checkbox"/> 3 <50%	<input type="checkbox"/> 4 >50%
8. % de la superficie de la ladera de barlomar de la duna primaria con cobertura vegetal	<input type="checkbox"/> 0 >90	<input type="checkbox"/> 1 >60	<input type="checkbox"/> 2 >30	<input type="checkbox"/> 3 >10	<input type="checkbox"/> 4 <10
9. % de la superficie del sistema dunar sin vegetación	<input type="checkbox"/> 0 <10	<input type="checkbox"/> 1 <20	<input type="checkbox"/> 2 <40	<input type="checkbox"/> 3 <75	<input type="checkbox"/> 4 >75

D. ÍNDICE DE CARACTERÍSTICAS DE LA CUBIERTA VEGETAL (ICV)					
1. % de la superficie de la playa seca cubierto por especies Tipo III	<input type="checkbox"/> 0 >50	<input type="checkbox"/> 1 >25	<input type="checkbox"/> 2 >15	<input type="checkbox"/> 3 >5	<input type="checkbox"/> 4 <5
2. % de la sup. de la ladera de barlomar de la duna primaria cubierto por especies Tipo II	<input type="checkbox"/> 0 >90	<input type="checkbox"/> 1 >60	<input type="checkbox"/> 2 >30	<input type="checkbox"/> 3 >15	<input type="checkbox"/> 4 <15
3. % de especies Tipo II en la ladera de barlomar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 <5	<input type="checkbox"/> 1 <15	<input type="checkbox"/> 2 <30	<input type="checkbox"/> 3 <60	<input type="checkbox"/> 4 >60
4. % especies Tipo I en la ladera de barlomar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 <1	<input type="checkbox"/> 1 >1	<input type="checkbox"/> 2 >5	<input type="checkbox"/> 3 >10	<input type="checkbox"/> 4 >30
5. % de especies exóticas en la ladera de barlomar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 0	<input type="checkbox"/> 1 <1	<input type="checkbox"/> 2 <5	<input type="checkbox"/> 3 <15	<input type="checkbox"/> 4 >15
6. % de especies Tipo I y II en los primeros 100 m a sotamar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 >75	<input type="checkbox"/> 1 >50	<input type="checkbox"/> 2 >25	<input type="checkbox"/> 3 >10	<input type="checkbox"/> 4 <10
7. % de plantas vigorosas en la ladera de barlomar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 >75	<input type="checkbox"/> 1 >50	<input type="checkbox"/> 2 >25	<input type="checkbox"/> 3 >10	<input type="checkbox"/> 4 <10
8. % de plantas con raíces expuestas en la ladera de barlomar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 <5	<input type="checkbox"/> 1 >5	<input type="checkbox"/> 2 >15	<input type="checkbox"/> 3 >25	<input type="checkbox"/> 4 >50
9. % de plantas con evidencias de daño físico en la ladera de barlomar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0 <5	<input type="checkbox"/> 1 >5	<input type="checkbox"/> 2 >15	<input type="checkbox"/> 3 >25	<input type="checkbox"/> 4 >50
10. % eliminación antrópica de cobertura vegetal en ladera de barlomar de la duna prim.	<input type="checkbox"/> 0 <10	<input type="checkbox"/> 1 >10	<input type="checkbox"/> 2 >25	<input type="checkbox"/> 3 >50	<input type="checkbox"/> 4 >75

(1) Por exposición costera se refiere al ángulo formado por la dirección dominante del oleaje en profundidades indefinidas y el ángulo del oleaje dominante en rotura.

E. ÍNDICE DE PRESIÓN DE USO (IPU)

1. Presión de visitantes	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Baja	Moderada	Alta		
2. Frecuencia de visitantes	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Baja	Moderada	Alta		
3. Dificultad de acceso	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Alta	Moderada	Baja		
4. Tránsito de vehículos sobre el sistema dunar activo	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Ninguno	Alguno	Elevado		
5. Tránsito de vehículos sobre la playa seca	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Ninguno	Alguno	Elevado		
6. Paseos a caballo sobre el sistema dunar	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Ninguno	Alguno	Elevado		
7. % de la superficie de la duna primaria con pasillos de deflación de origen antrópico	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0%	<5%	<25%	<50%	>50%
7.1. Anchura de los pasillos de deflación de origen antrópico en la duna primaria (m)	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	<1	<2	<3	<5	>5
7.2. Profundidad de los pasillos como % de la altura de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	<5	<25	<50	>50	>75
8. % de la superficie del campo dunar ocupada por residuos sólidos urbanos	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0%	<5%	<25%	<50%	>50%
9. Extracción de áridos	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Nula	Moderada	Alta		
10. Frecuencia de limpieza de la playa	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Nula	Moderada	Alta		
11. % playa seca afectada por las actividades de limpieza	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0	<25	<50	<75	>75
12. % del sistema dunar activo ocupado por infraestructuras permanentes	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0	<25	<50	<75	>75
13. % del sist. activo ocupado por infraestructuras temporales	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0	<25	<50	<75	>75
14. % de línea forestal 200 m a sotamar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0	<25	<50	<75	>75
15. % de línea de cultivos 200 a sotamar de la duna primaria	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4
	0	<25	<50	<75	>75
16. Pastoreo en el sistema activo	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Ninguno	Moderado	Alto		
17. Presencia de conejos	<input type="checkbox"/> 0	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4		
	Ninguna	Moderada	>Alta		

A continuación, se exponen los índices y variables que configuran la lista de control:

Sección A: Índice Geomorfológico-sedimentario del Sistema Dunar (IGD): 8 variables.

Incluye un conjunto de variables que describen las características geomorfológicas y sedimentarias de las dunas costeras. En general, cuanto mayor sea el volumen de sedimento acumulado en el sistema dunar costero mayor será la capacidad de absorción de impactos y más estable será el sistema.

Del mismo modo, la deflación eólica de un volumen determinado de sedimento será más importante en sistemas de menor tamaño, ya que los efectos de la deflación aumentan con la fracción de material dunar erosionado. En este sentido, e independientemente de la tipología del frente costero, la longitud, altura y potencia de las estructuras dunares activas (A1, A2, A3, A4 y A5), se consideran variables determinantes de la capacidad amortiguadora del sistema dunar ante los efectos erosivos marinos y eólicos.

El efecto de los procesos ambientales dominantes sobre la dinámica de las dunas costeras depende del desarrollo potencial del depósito sedimentario. Éste depende, entre otros factores, de las características de la unidad geomorfológica al que está asociado. Por otro lado, el desarrollo y morfología de los frentes costeros depende de forma muy directa de las características del sedimento, tales como granulometría, forma, cohesión y densidad del grano de arena. Se ha considerado que los diámetros de partículas menores aumentarán la fragilidad de la duna costera, ya que los sedimentos finos son más fácilmente transportados por el viento y, por tanto, favorecerán las pérdidas por deflación. La proximidad del nivel freático a la superficie en las depresiones interdunares (A6) aumenta la cohesión entre las partículas y dificulta el transporte eólico del sedimento, a la vez que favorece una mayor cobertura vegetal, disminuyendo la movilidad de las arenas y la pérdida sedimentaria del sistema. En definitiva, la pérdida de superficie ocupada por elementos morfológicos de acumulación de arena así como la fragmentación del sistema dunar en pequeñas unidades aisladas y dispersas (A7), modifica las condiciones ecológicas y geomorfológicas y acelera la degradación y eliminación de las estructuras de acumulación eólica.

Sección B: Índice de Incidencia Marina (IIM): 10 variables.

Los efectos inmediatos del mar sobre la duna costera se centran en el control sobre la disponibilidad de sedimento. Uno de los factores determinantes de la disponibilidad sedimentaria lo constituye la energía potencial del oleaje, que puede relacionarse directamente con la longitud de superficie marina sobre la que el viento sopla en una misma dirección (fetch meteorológico)

(B1). El desarrollo de la duna primaria se ve favorecido en aquellas costas donde la mayor parte de la energía del oleaje es disipada antes de llegar a la playa. Estas playas disipativas se caracterizan por presentar pendientes suaves (B2), constituidas a partir de sedimentos finos o muy finos (B10) y, con frecuencia, presentan crecimiento de barras de arena longitudinales (B6). Las barras longitudinales cumplen una doble función de protección de la playa y de la duna costera. Esta protección se lleva a cabo al actuar como zona de rompiente del oleaje, llegando a disipar entre el 80% y el 95% de la energía del oleaje incidente, y al constituir una reserva de sedimento que garantiza el mantenimiento del equilibrio sedimentario tras los temporales. Otro factor determinante de la disponibilidad de sedimento en las playas es la anchura de la zona intermareal (B3) y de la playa seca (B7), ya que al aumentar la superficie expuesta incrementa el área fuente de sedimento susceptible de ser transportado por el viento, lo que favorece el desarrollo de la duna costera.

Por el contrario, el desarrollo de los frentes costeros se ve limitado en playas reflejantes con carreras de marea pequeñas, donde la zona intermareal presenta unas dimensiones reducidas. Además, aunque este tipo de playas se asocia, generalmente, a granulometrías gruesas o muy gruesas, en el caso del litoral suratlántico, por ejemplo, están asociadas a un predominio de condiciones recesivas. En este tipo de costa la anchura de la playa seca es pequeña, produciéndose, como consecuencia, cortes en la duna primaria durante los temporales (B8) y escarpes de erosión en la ladera expuesta de la duna primaria (B9), lo que potencia los efectos erosivos.

Sección C: Índice de Incidencia Eólica (IIE): 9 variables.

El factor eólico es el responsable directo del modelado dunar y su actuación, y al igual que el factor marino, puede inducir en la costa tanto procesos erosivos como acumulativos o deposicionales. El desarrollo de las estructuras de acumulación eólica va a depender, entre otros factores, de la disponibilidad de sedimento susceptible de ser transportado por el viento (C1) y de la textura de la superficie. El tipo de transporte eólico más importante para la formación de los frentes dunares es el transporte por saltación, con vientos superiores al umbral de inicio de movimiento. Sin embargo, la presencia de cantos rodados (C6), restos de conchas (C7), detritus (C5) y vegetación (C8) en la playa seca incrementan la rugosidad superficial modificando el perfil del viento, así como la velocidad umbral a la que el sedimento es susceptible de ser transportado. Estos factores disminuyen la movilidad de la arena y por tanto, el volumen de sedimento transportado hacia el sistema dunar. En estas circunstancias, se pueden llegar a formar en la zona alta de la berma dunas embrionarias dispersas y de poca entidad (C2), que, si se unen, pueden dar lugar a una nueva duna primaria o bien actuar como almacén de sedimento del sistema dunar ya establecido.

La formación de pasillos de deflación (C4), de origen natural o inducido, incrementa la fragilidad del cordón litoral al producirse puntos de ruptura en la continuidad del frente. De esta forma, se hacen más intensos los efectos erosivos eólicos. Estas zonas de inestabilidad se originan, fundamentalmente, como consecuencia del efecto eólico sobre superficies escasamente vegetadas (C9).

Sección D: Índice de características de la cubierta vegetal (ICV): 10 variables.

Como se ha indicado con anterioridad, numerosos autores han concedido gran importancia a la cubierta vegetal en el estudio de los frentes dunares. En realidad, el origen de los frentes costeros está íntimamente relacionado con la presencia de estructuras vegetales. Su localización inicial suele coincidir con la línea de máximo ascenso del oleaje en mareas vivas equinocciales, donde se produce la acumulación marina de rizomas, semillas y materia orgánica. Estos restos son cubiertos rápidamente por arena, dando lugar a montículos dunares. Estas formaciones son fundamentalmente estacionales, siendo, por regla general, destruidas por los temporales. Sin embargo, si tiene lugar un aporte sedimentario adecuado y si existe una cobertura vegetal óptima, se produce la evolución de estos montículos aislados hacia un cordón embrionario menos efímero que puede alcanzar alturas de 1 ó 2 metros. El crecimiento del cordón embrionario inicialmente es lineal, paralelo a la línea de playa, y su morfología va a depender de la cobertura vegetal. En situaciones caracterizadas por la ausencia de vegetación, el cordón costero desarrolla pendientes más suaves en la ladera expuesta a los vientos marinos y más acusadas (34°) en la ladera de tierra, al contrario de lo que ocurre en caso de existir una cobertura vegetal.

La capacidad de la vegetación de retener el sedimento disponible va a determinar, entre otros factores, los incrementos de volumen sedimentario y el crecimiento potencial en altura de los cordones litorales. Una vez que la vegetación no es efectiva como pantalla eólica, la estructura sedimentaria estabiliza su altura y comienza a avanzar hacia tierra. Teniendo en cuenta esta interrelación entre geomorfología y vegetación a nivel dunar, se ha considerado, además de la cobertura de la vegetación, por su capacidad de fijar y acumular sedimento, el tipo de vegetación instalada en la duna costera. Esto se debe a que el tipo de vegetación va a determinar, en última instancia, el desarrollo y la morfología de la estructura sedimentaria. En este sentido, se han considerado cuatro tipos de vegetación (véase capítulo 3):

- a) Tipo III: representado por especies psammófilas capaces de dispersarse por el agua de mar y de soportar altas tasas de enterramiento. Plantas perennes con capacidad de reproducción vegetativa o plantas anuales de verano, con adaptaciones foliares a las condiciones de salinidad, viento, insolación y temperatura de las zonas costeras. Favorecen la formación y el desarrollo de las estructuras de acumulación.

- b) Tipo II: herbáceas o leñosas perennes con un sistema radical bien desarrollado y reproducción sexual. Presentan adaptaciones en las estructuras foliares a las condiciones de salinidad, viento, insolación y temperatura de las zonas costeras. No son susceptibles de ser dispersadas por el agua marina y son características de dunas semiestabilizadas. Favorecen la fijación de las arenas, disminuyendo los efectos de la deflación eólica pero no favorecen el crecimiento en potencia de las estructuras dunares.
- c) Tipo I: pequeñas herbáceas anuales de invierno con crecimiento rastrero o en roseta, susceptibles de ser enterradas o descalzadas a partir de pequeñas movilizaciones de sedimento. Este tipo de vegetación incrementa su cobertura en condiciones de alta estabilidad del substrato arenoso debido a una tasa muy baja de deposición/erosión, o por un aumento de compactación provocado por el pisoteo.
- d) Tipo Neófito, incluyendo aquellos taxones vegetales introducidos recientemente por el hombre en la zona costera. Generalmente, presentan un comportamiento invasor (por ejemplo, *Carpobrotus edulis*), pudiendo llegar a desplazar a la vegetación natural.

En las distintas unidades del sistema dunar, se ha considerado la proporción relativa de cada tipo de vegetación, siendo ésta la relación entre la cobertura de un determinado tipo funcional y la cobertura total de vegetación.

Sección E: Índice de Presión de Uso (IPU): 17 variables.

Los impactos humanos producidos sobre la geomorfología y ecología de los cordones litorales son de dos tipos. Por un lado, los que implican modificación de las características del sistema y por otro, los que implican eliminación parcial o total del mismo. Se han incluido en esta sección los impactos antrópicos que afectan directamente al sistema de dunas mediante:

- Incremento en la desestabilización de la arena y eliminación de la vegetación natural (E1-E7, E9-E11, E16 y E17).
- Modificación de la textura de la capa de arena mediante el aporte de residuos y materiales ajenos a las playas arenosas (E8).
- Fragmentación y eliminación parcial del sistema dunar activo mediante la creación de infraestructuras, o por sustitución de la vegetación natural por cultivos o repoblaciones (E12-E15).

5.2.1 Cálculo del Índice de Vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad que se presenta integra el conjunto de variables biológicas y ambientales seleccionadas en una medida de la capacidad de respuesta del sistema dunar costero ante los diversos procesos que interactúan y determinan los ajustes y la evolución del frente costero.

A partir de las listas parciales de control anteriormente expuestas, se obtiene un valor parcial de vulnerabilidad correspondiente a cada sección o grupo de variables, lo que permite identificar el tipo de proceso dominante en la pérdida de elasticidad del sistema.

El índice de vulnerabilidad parcial (IV_p) se calcula como la fracción entre el sumatorio de los valores asignados (V_i) y el sumatorio de los valores máximos posibles de cada grupo de variables (V_{pmax}):

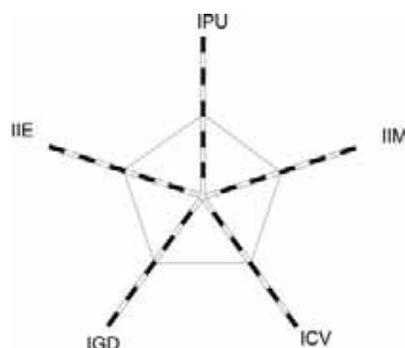
$$IV_p = \sum V_i / \sum V_{pmax}$$

El cálculo de la vulnerabilidad se realiza a partir de la media ponderada de los valores de los cinco índices parciales:

$$IV = \alpha IV_{IGD} + \beta IV_{IIM} + \varphi IV_{IIE} + \lambda IV_{ICV} + \mu IV_{IPU} / (\alpha + \beta + \varphi + \lambda + \mu)$$

Los coeficientes de ponderación (α , β , φ , λ , μ) de cada uno de los índices parciales de vulnerabilidad depende de cada sistema dunar en particular y la importancia relativa de cada uno de los índices en la vulnerabilidad del sistema dunar.

El valor de los índices parciales y del índice de vulnerabilidad varía entre 0 y 1, representando el valor máximo la menor capacidad de acogida de impactos naturales y humanos. Para facilitar la interpretación de los resultados, los valores de vulnerabilidad parcial ponderados se representan gráficamente sobre cinco ejes. Uniendo los valores parciales de vulnerabilidad se obtiene un polígono de cinco lados, cuya superficie es función del índice global de vulnerabilidad.



- **IGD:** Índice Geomorfo-sedimentario del Sistema Dunar.
- **IIM:** Índice de Incidencia Marina.
- **IIE:** Índice de Incidencia Eólica.
- **ICV:** Índice de Características de la Cubierta Vegetal.
- **IPU:** Índice de Presión de Uso.

Figura 5.1. Diagrama de los índices parciales de vulnerabilidad. Los valores de los distintos índices parciales de vulnerabilidad aumentan con la distancia al punto de intersección de los ejes.

Clasificación de los valores del Índice de Vulnerabilidad

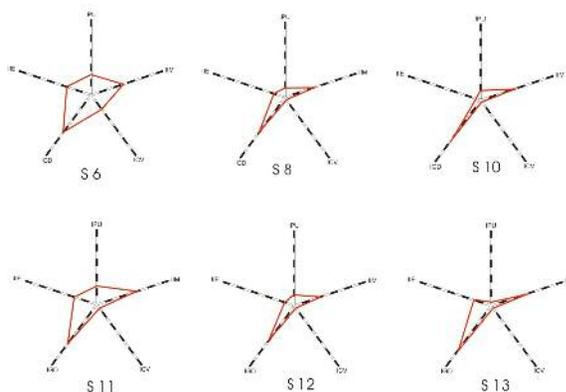
Los resultados de la aplicación de la lista de control sobre los tramos seleccionados se deben estructurar en una matriz de cinco variables (índices parciales de vulnerabilidad) y tantos casos como tramos costeros se hayan considerado (ver Tabla 5.2), donde se ha asignado coeficientes de ponderación iguales a 1 a cada uno de los índices de vulnerabilidad parciales. Al índice de vulnerabilidad global se le asocia una tipo o clase: Clase I ($0 < IV < 0.30$), Clase II ($0.30 < IV < 0.45$), Clase III ($0.45 < IV < 0.60$) y Clase IV ($0.60 < IV < 1$).

Tabla 5.2. Índices parciales y totales de vulnerabilidad

Tramo	IGD	IIM	IIE	ICV	IPU	I. Vulnerabilidad
0	0,57	0,50	0,62	0,73	0,69	0,62 IV
1	0,53	0,48	0,48	0,49	0,63	0,52 III
2	0,69	0,53	0,45	0,35	0,46	0,50 III
3	0,56	0,50	0,44	0,45	0,57	0,50 III
4	0,44	0,60	0,43	0,48	0,32	0,45 II
5	0,44	0,60	0,47	0,58	0,18	0,46 II
6	0,61	0,43	0,33	0,23	0,25	0,37 II
7	0,67	0,70	0,43	0,58	0,11	0,49 III

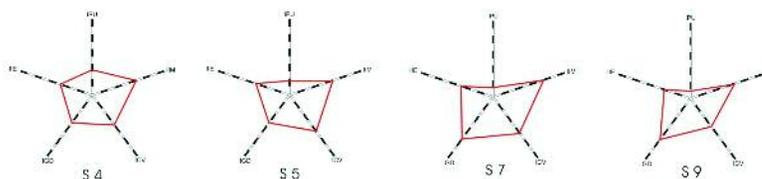
IGD: índice geomorfológico-sedimentario del sistema dunar; IIM: índice de incidencia marina; IIE: índice de incidencia eólica; ICV: índice de características de la cubierta vegetal; IPU: índice de presión de uso.

En las figuras 5.2 y 5.3, se muestran resultados gráficos de la aplicación de la lista de control en casos de vulnerabilidad baja y media (Muñoz Vallés *et al.*, 2005). En cada tramo costero se puede identificar, a partir de la visualización de los valores de cada eje, cuál es el origen principal de la vulnerabilidad dunar.



Vulnerabilidad baja

Figura 5.2. Tramos costeros con vulnerabilidad baja. En este caso, el origen de la vulnerabilidad se debe a las características geomorfológicas del sistema dunar.



Vulnerabilidad media

Figura 5.3. Tramos costeros con vulnerabilidad media. En este caso, el origen de la vulnerabilidad se debe a las características geomorfológicas del sistema dunar y a la dinámica sedimentaria erosiva.

