

Dimensión ambiental

Seminario WP3 - LIFE AdaptCalaMillor

Taller 1: How can climate change hazard, vulnerability and risk be assessed in urban beaches?

Taller 2: How will Cala Millor be affected by climate change?

Estructura de la sesión

TALLER 1 · D3.5

Cómo se pueden evaluar los peligros, la vulnerabilidad y el riesgo del cambio climático en las playas urbanas

Indicadores de sensibilidad y capacidad adaptativa.
Cálculo de vulnerabilidad ambiental.
Cruce con peligros climáticos para obtener riesgo.
Salida: capas ambientales para la matriz de riesgo.

TALLER 2 · D3.4

Cómo se verá afectada Cala Millor por el cambio climático

Evolución histórica y estado actual de la duna.
Pérdida/recuperación funcional de humedales y marismas.
Estado y proyecciones de P. oceanica.
Salida: diagnóstico ambiental para discutir adaptación.

Posidonia



Dunas



Marismas



TALLER 1

¿Cómo se pueden evaluar los peligros, la vulnerabilidad y los riesgos del cambio climático en las playas urbanas?

Deliverable D3.5



Elementos expuestos ambientales

La parte ambiental aporta capas que después se incorporan a la matriz de riesgo.

Elemento expuesto
Sistema dunar

Elemento expuesto
P. oceanica

Elemento ambiental
Marismas

Peligro principal
Inundación marina permanente y extrema

Peligro principal
Aumento de Tª del mar

**Espacio potencial para restauración y
soluciones basadas en la naturaleza**

Producto del análisis
**Vulnerabilidad y riesgo por pérdida de
superficie**

Producto del análisis
**Vulnerabilidad y riesgo por pérdida de
densidad, estructura y funcionalidad
ecológica**

**No se calcula una capa específica de
riesgo, sino que se incorpora como
criterio ambiental para valorar futuras
medidas de adaptación.**



Cadena metodológica: del indicador al mapa

La metodología transforma datos ambientales heterogéneos en capas normalizadas y comparables entre escenarios.

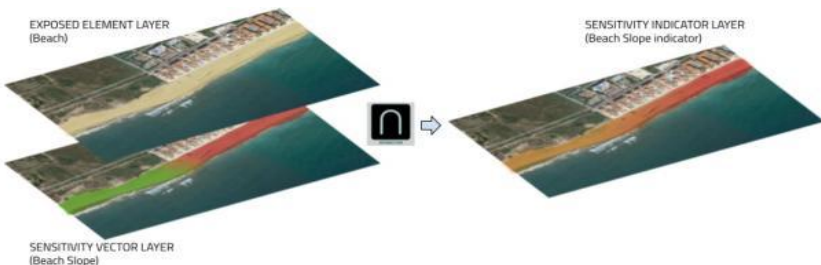
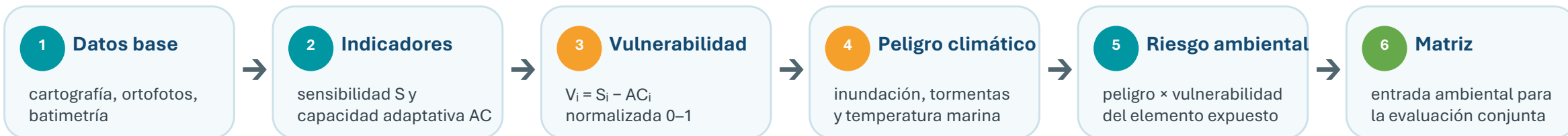


Figure 1. Example of intersection between exposed element layer (beach) and sensitivity indicator (beach slope layer), resulting in the Sensitivity index layer.

Ejemplo de intersección GIS entre elemento expuesto e indicador.

Lectura metodológica

- Cada indicador se normaliza entre 0 y 1 para poder comparar variables distintas.
- Los índices compuestos agregan indicadores normalizados de sensibilidad y capacidad adaptativa.
- La vulnerabilidad se cruza con el peligro climático correspondiente para obtener riesgo ambiental por celda y escenario.
- El resultado no es solo “cuánto impacto”, sino “dónde se concentra”.

Sensibilidad y capacidad adaptativa

Sensibilidad (S)

- Evalúa cuánto puede verse afectado un elemento por un peligro climático.
- Depende de características físicas/ecológicas del propio elemento.
- Se normaliza entre 0 y 1: más valor = mayor sensibilidad.

Capacidad adaptativa (AC)

- Evalúa el margen que tiene el elemento para mantenerse, recuperarse o reducir el impacto.
- Puede depender de espacio, gestión, restauración o mitigación climática.
- Se normaliza entre 0 y 1: más valor = mayor capacidad adaptativa.

Vulnerabilidad

$$V_i = S_i - AC_i$$

donde S_i agrega indicadores de sensibilidad y AC_i resume la capacidad de respuesta o recuperación del elemento expuesto.

Normalización 0-1 · mapas por escenario

Sistema dunar: indicador de sensibilidad y capacidad adaptativa

En Cala Millor la vulnerabilidad de las dunas queda dominada por la pérdida de superficie y la ausencia de espacio de recuperación.

Sensibilidad: disminución de área dunar

< 12,5%
impacto bajo

12,5-33,3%
impacto medio

> 33,3%
impacto alto



Capacidad adaptativa = 0

La duna está confinada por la urbanización, sin espacio suficiente para migrar, regenerarse o reconstruirse tras eventos de erosión/inundación.

Consecuencia metodológica: en este caso, sensibilidad y vulnerabilidad se consideran equivalentes.

Sistema dunar : vulnerabilidad frente a inundación

- Se usan escenarios de inundación permanente y extrema, con el estado escenario-dependiente de la pradera de Posidonia.
- La reducción de la duna se interpreta como pérdida de capacidad para amortiguar energía de oleaje y tormentas.
- La recuperación natural es especialmente limitada donde hay urbanización, caminos y poco espacio de acomodación.

Criterio de clasificación

Baja	< 12,5% de reducción	V = 0
Moderada	12,5 - 33,3%	V = 0,5
Alta	≥ 33,3%	V = 1

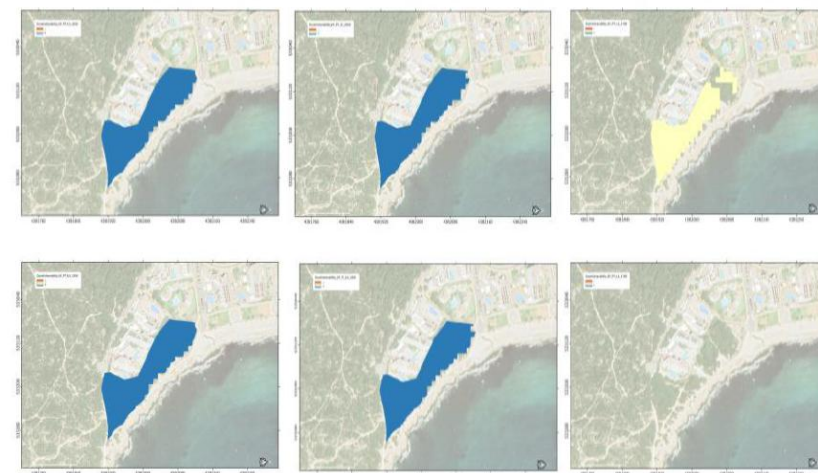


Figure 12. Sensitivity maps under Extreme Flooding under RCP-4.5 (top row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right). The same for RCP-8.5 (bottom row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right).

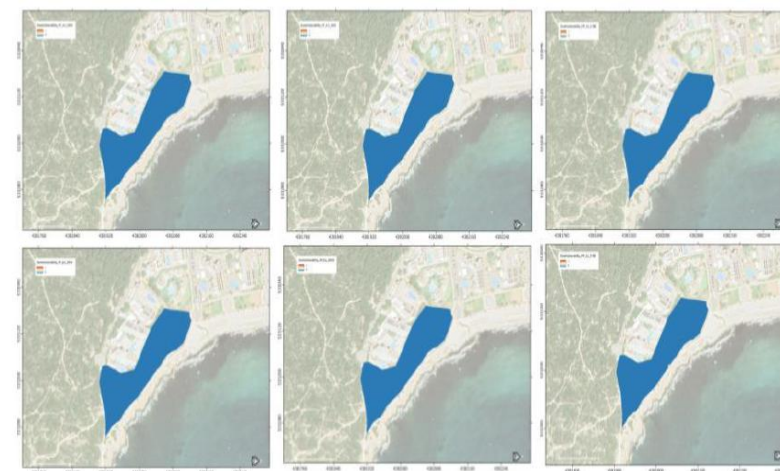


Figure 13. Sensitivity maps under Permanent Flooding under RCP-4.5 (top row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right). The same for RCP-8.5 (bottom row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right).

Sistema dunar: del impacto al riesgo

El riesgo dunar se obtiene al combinar la pérdida potencial de superficie dunar con los escenarios de inundación marina permanente y extrema.

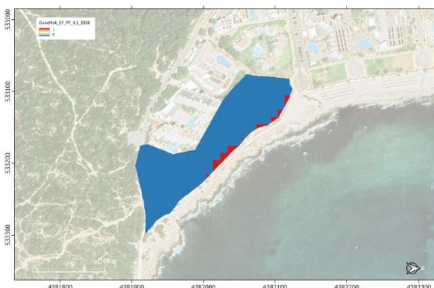
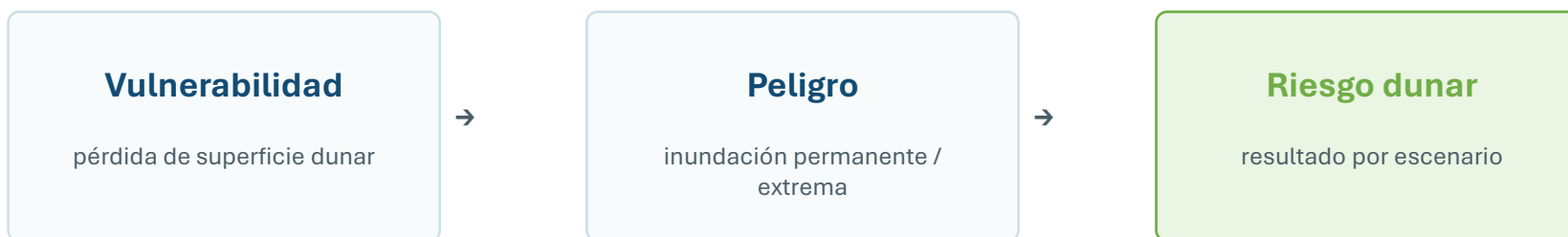


Figure 32. Extreme flooding: Ef_Pt_RCP-4.5_2030.



Figure 34. Permanent flooding: Pf_RCP-4.5_2030.

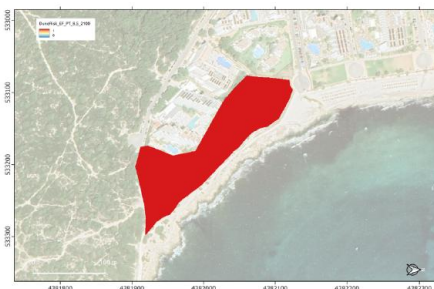


Figure 33. Extreme flooding: Ef_Pt_RCP-8.5_2100.

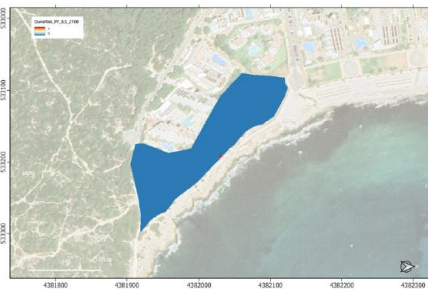


Figure 35. Permanent flooding: Pf_RCP-8.5_2100.

- Los mapas muestran que la duna actual presenta mayor riesgo cuando aumenta la superficie afectada por la inundación, especialmente en escenarios extremos y de mayor calentamiento.
- Este riesgo no representa solo pérdida de área, sino reducción de la función dunar como barrera natural, reserva sedimentaria y elemento de conectividad litoral.

P. oceanica: sensibilidad de la pradera

La sensibilidad de la pradera se evalúa a partir de dos indicadores ecológicos: el límite inferior y la densidad de haces.

Indicador 1: límite inferior de la pradera

Integra condiciones ambientales como disponibilidad de luz, turbidez y calidad del agua.

> 35 m
óptimo
S = 0,2

35-30 m
intermedio
S = 0,5

< 30 m
crítico
S = 1

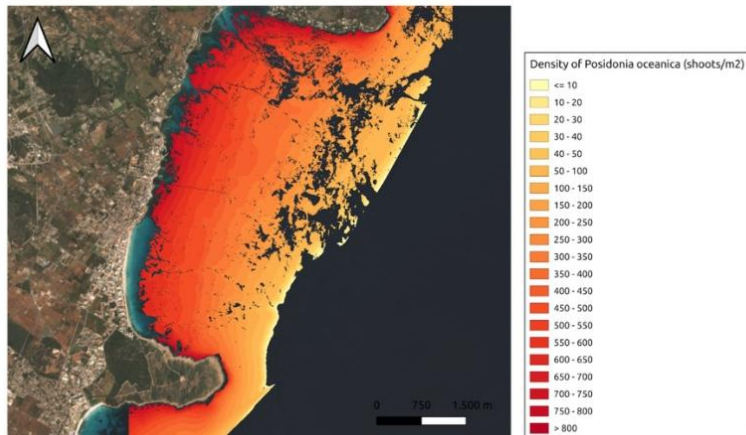
Indicador 2 densidad de haces

La densidad refleja la condición estructural de la pradera y su respuesta a estrés ambiental.

> 400 haces/m²
densa
S = 0

400-300
equilibrio dinámico
S = 0,5

< 300
regresión
S = 1



Densidad actual de P. oceanica como línea base

A mayor pérdida de densidad o menor profundidad del límite inferior, mayor sensibilidad de la pradera frente al calentamiento y a otros estresores ambientales.

P. oceanica: capacidad adaptativa

En una especie de crecimiento lento y sensible al calentamiento, la capacidad adaptativa se representa mediante escenarios de mitigación climática.

AC alta

RCP4.5 · P25

trayectoria de mitigación fuerte

AC media

RCP4.5 P50/P75 · RCP8.5 P25

calentamiento intermedio

AC nula

RCP8.5 · P50/P75

calentamiento alto

En este análisis, la capacidad adaptativa se aproxima a partir del escenario climático: la temperatura máxima anual del mar condiciona la mortalidad de haces y, por tanto, la densidad futura de la pradera.

No se incorpora la posible adaptación biológica de la pradera, como aclimatación local, micro-refugios térmicos o selección de clones más resistentes.

Cuanto mejor conservada esté la pradera —más densa, conectada y con menos presiones locales—, mayor será su resiliencia y su margen real de respuesta frente al calentamiento.

P. oceanica: mapas de vulnerabilidad por escenario

Se generan mapas para RCP4.5 y RCP8.5, 2030/2050/2100 y percentiles P25/P50/P75.

Sensibilidad ecológica
Límite inferior + densidad de
haces

Capacidad adaptativa
Alta · media · baja/nula según
escenario climático

Vulnerabilidad espacial
 $V_i = S_i - AC_i$

Los mapas muestran la
vulnerabilidad resultante de
combinar los indicadores de
sensibilidad de P. oceanica con la
capacidad adaptativa
considerada para cada escenario
climático.

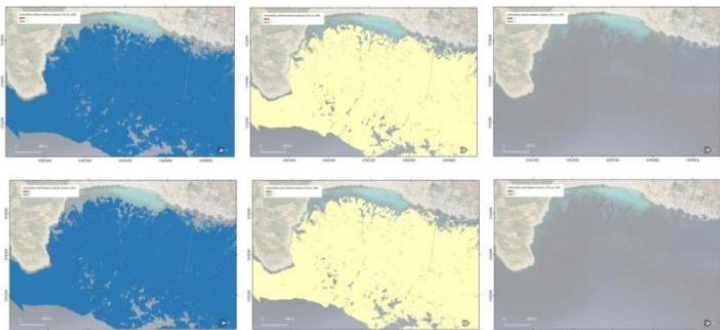


Figure 14. Vulnerability maps for percentile 50 and medium adaptive capacity corresponding to RCP-4.5 (top row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right). The same for null adaptive capacity corresponding to percentile 50 and RCP-8.5 (bottom row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right).

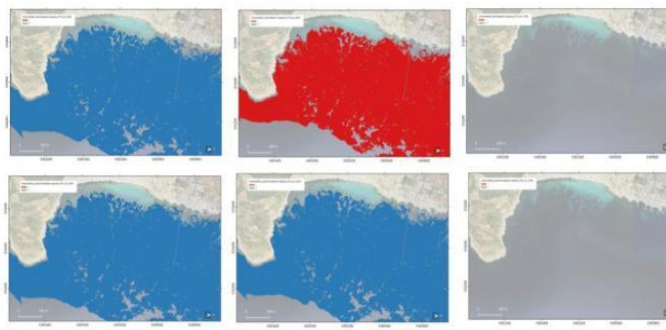


Figure 15. Vulnerability maps for percentile 75 and null adaptive capacity corresponding to RCP-8.5 (top row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right). The same for percentile 25 and optimal adaptive capacity corresponding to RCP-4.5 (bottom row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right).

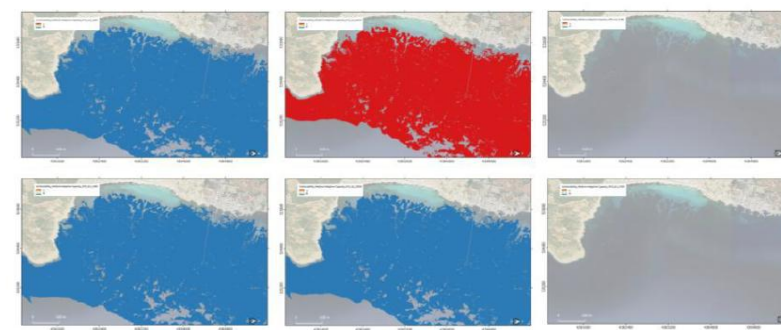


Figure 16. Vulnerability maps for percentile 75 and medium adaptive capacity corresponding to RCP-4.5 (top row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right). The same for percentile 25 and medium adaptive capacity corresponding to RCP-8.5 (bottom row) for 2030 (left), 2050 (center) and 2100 (right).

P. oceanica: mapas de riesgo

Impacto

Diferencia entre densidad
actual y densidad futura
proyectada



Vulnerabilidad



Mapa de riesgo por escenario

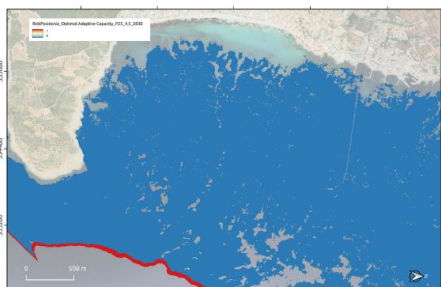


Figure 36 Optimal adaptive capacity_RCP-4.5_2030.

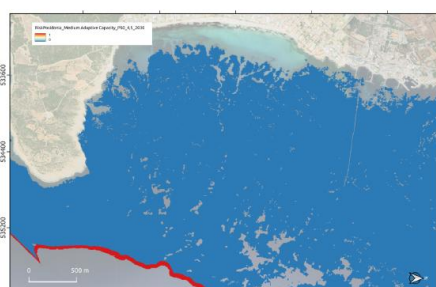


Figure 38 Medium adaptive capacity_RCP-4.5_2030.

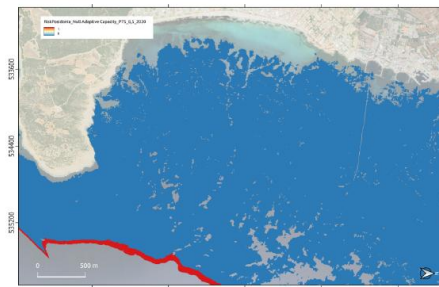


Figure 40 Null adaptive capacity_RCP-8.5_2030.

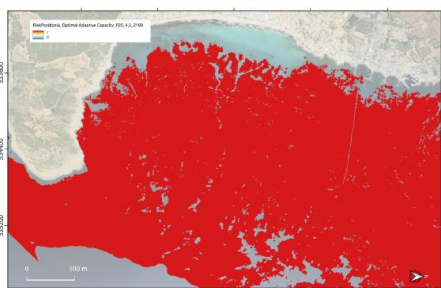


Figure 37 Optimal adaptive capacity_RCP-4.5_2100.

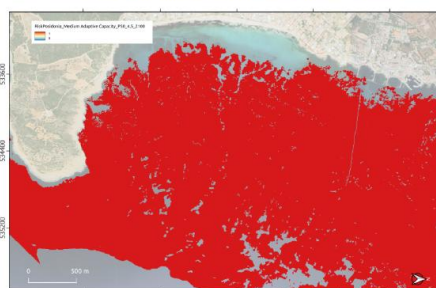


Figure 39 Medium adaptive capacity_RCP-4.5_2100.

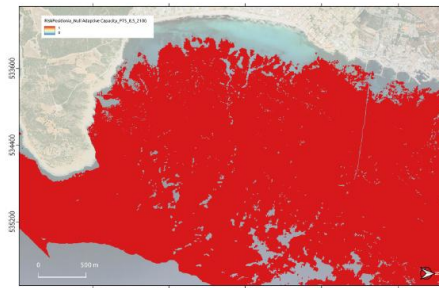


Figure 41 Null adaptive capacity_RCP-8.5_2100.

Los escenarios de 2030 mantienen valores bajos o moderados, mientras que hacia 2100 el riesgo aumenta claramente, especialmente bajo condiciones de mayor calentamiento y menor capacidad adaptativa.

Marismas:

Aunque no se calcula una capa específica de vulnerabilidad o riesgo para marismas, estos espacios son importantes para pensar la adaptación futura de Cala Millor.

Funciones ecológicas

- Ayudan a recuperar la transición natural entre playa, duna y zona interior.
- Pueden mejorar la retención de agua, sedimentos y nutrientes.
- Favorecen la biodiversidad y la conectividad ecológica.
- Pueden ayudar a retener temporalmente el agua y reducir el impacto de lluvias intensas e inundaciones.

Cómo se incorporan al análisis

No se presentan como un resultado de riesgo equivalente a duna o *P. oceanica*, sino como un criterio ambiental para valorar futuras medidas de restauración y soluciones basadas en la naturaleza.

Resumen

Sistema dunar actual: La metodología permite estimar cómo la inundación afecta a la duna actual y cómo esa afección se traduce en pérdida de función protectora.

***P. oceanica*:** La metodología permite pasar de indicadores ecológicos —densidad, límite inferior y capacidad adaptativa— a mapas de vulnerabilidad y riesgo frente al calentamiento del mar.

Uso para la toma de decisiones: La información ambiental permite comparar escenarios y orientar las medidas de adaptación hacia las zonas más vulnerables.

TALLER 2

Cómo se verá afectada Cala Millor por el cambio climático

Deliverable D3.4

Qué analizamos en el diagnóstico ambiental

D3.4 describe la evolución, estado actual y proyecciones de impacto sobre los elementos ambientales.

Sistema dunar

Qué analizamos

Evolución histórica, estado actual y fragmentación.

P. oceanica

Qué analizamos

Estado actual, límite superior, crecimiento/enterramiento, densidad y proyecciones futuras.

Sistema dunar: transformación histórica y pérdida de extensión

El sistema dunar de Cala Millor se redujo drásticamente durante la urbanización turística del frente litoral, pasando de un sistema amplio y continuo a un remanente muy limitado.

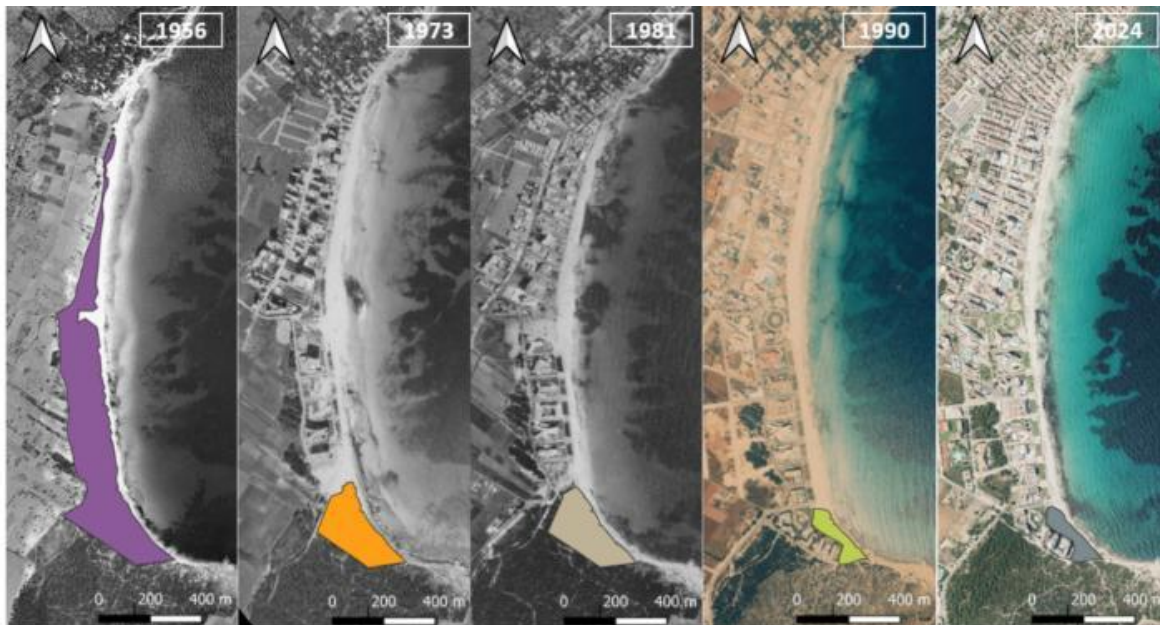


Figure 55. Cala Millor coastal dune system extension evolution, 1956-2024.

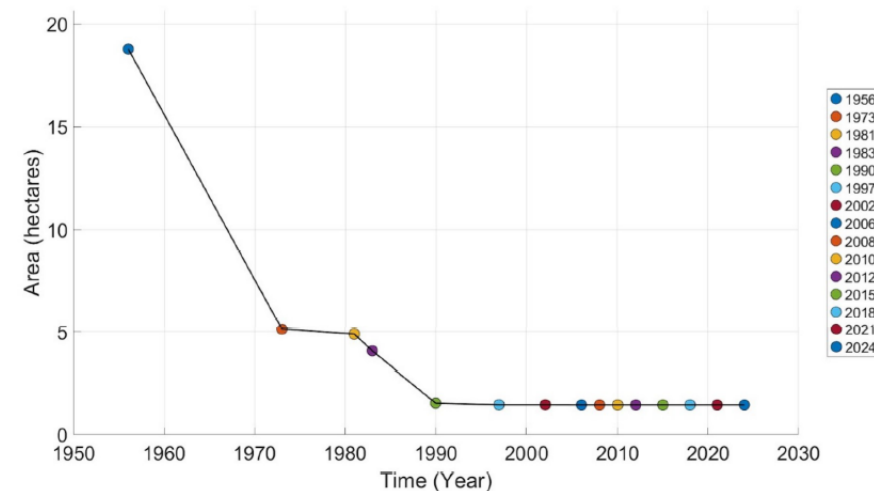


Figure 56. Area occupied by dune system in Cala Millor from 1950 to 2024.

La pérdida de superficie dunar implica menos reserva sedimentaria, menor continuidad ecológica y menor capacidad natural de protección frente a temporales e inundación.

1956 · 18,8 ha
Sistema dunar amplio y continuo.

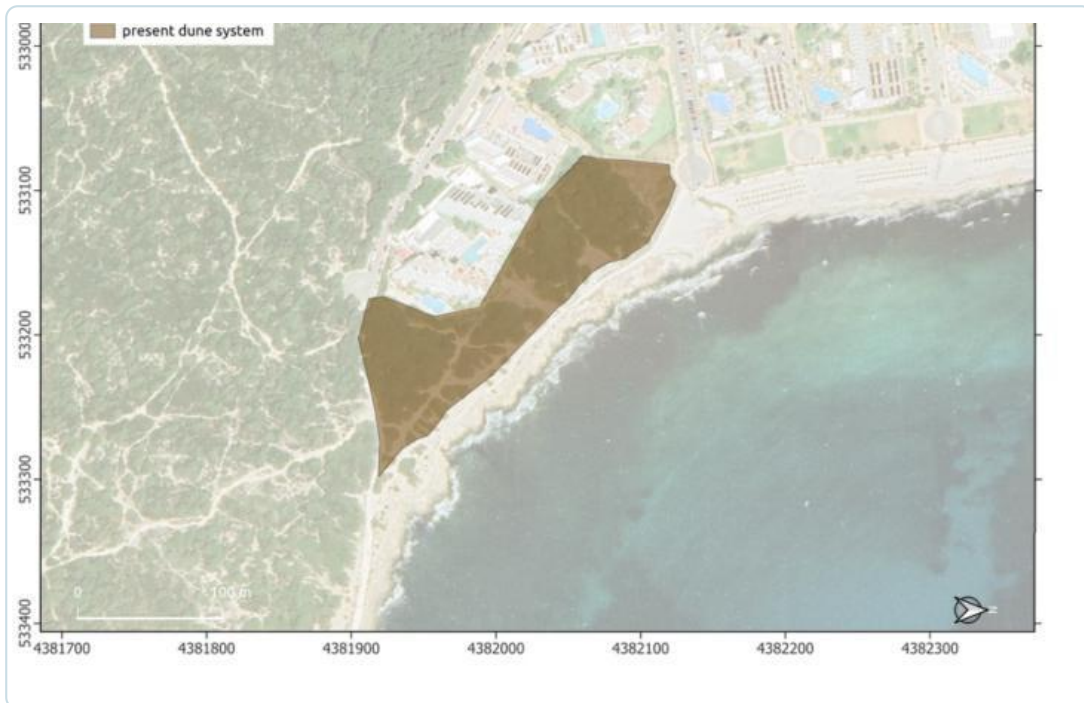
1973 · 5,1 ha
Pérdida aproximada del 73%.

1990 · 1,6 ha
Pérdida acumulada del 91%.

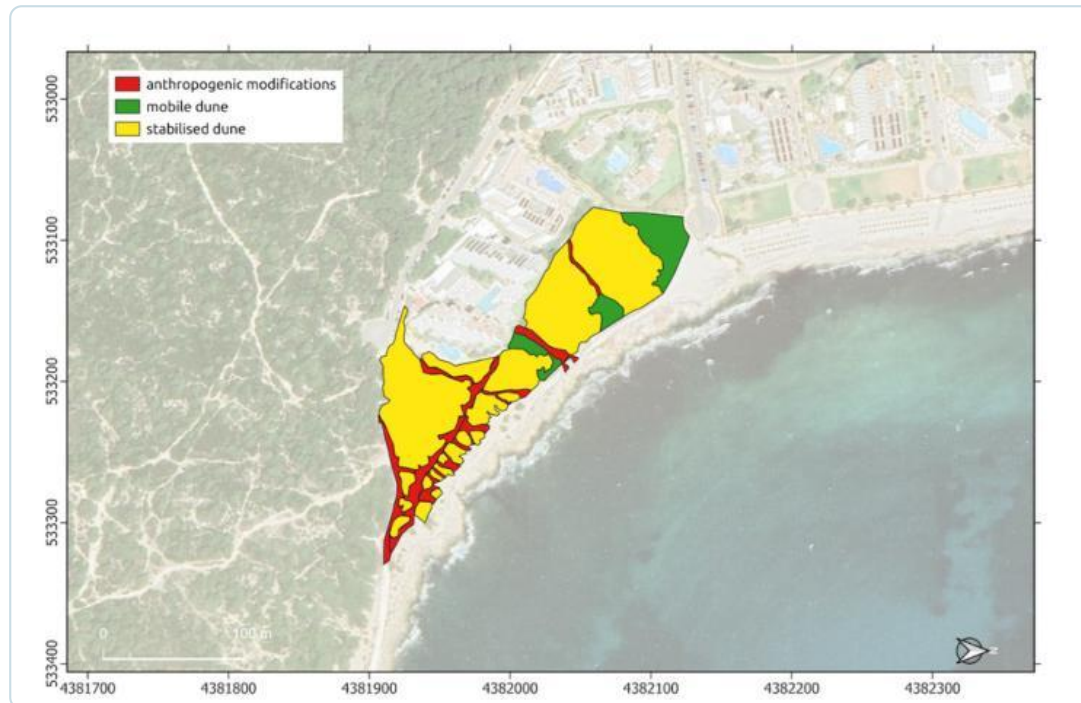
Actualidad
Remanente muy reducido; pérdida superior al 99% de la extensión original.

Sistema dunar actual: pequeño, fragmentado y confinado

El remanente mantiene valor ecológico, pero está desconectado de la dinámica sedimentaria original.



Duna actualmente conectada con la playa.



Delimitación de duna móvil, estabilizada y modificaciones antrópicas.

Funciones

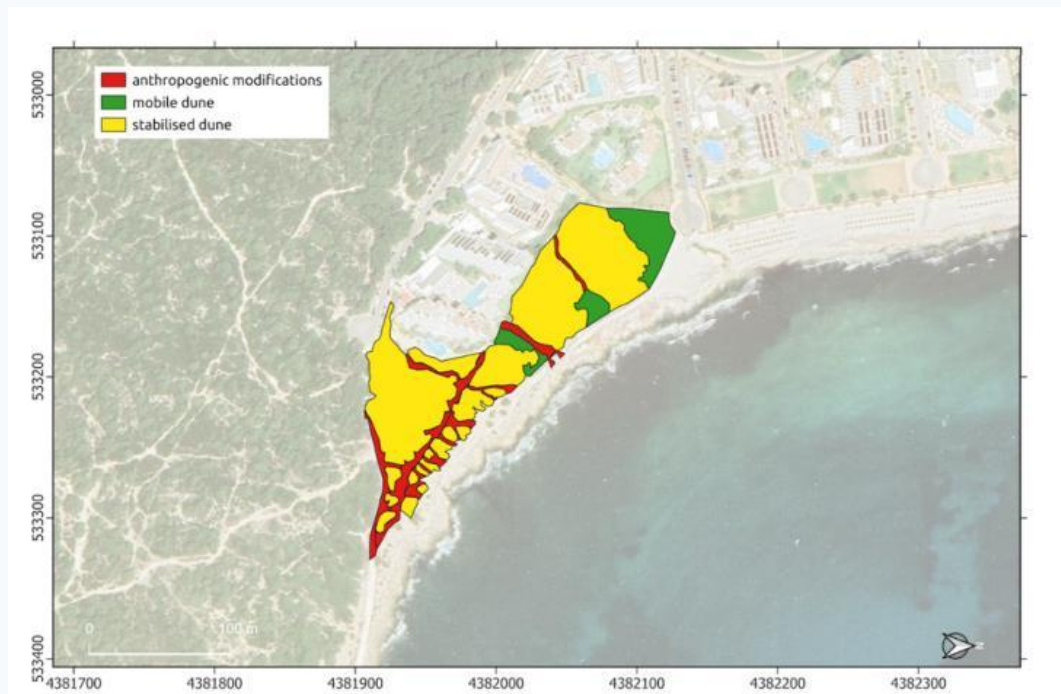
- Retiene sedimento y ayuda a reducir la erosión.
- Actúa como barrera natural frente a temporales y oleaje.
- Mantiene hábitat y biodiversidad de transición litoral.

Factores de degradación

- Caminos, pisoteo y compactación.
- Fragmentación y pérdida de conectividad.
- Confinamiento urbano y falta de espacio para desplazarse tierra adentro.
- Presencia de especies exóticas o ruderales asociadas a ambientes alterados.

Sistema dunar actual: muy reducido y fragmentado

La duna remanente conserva valor ecológico, pero está desconectada de la dinámica sedimentaria original.



Dunas directamente relacionadas con la playa en diciembre de 2024



Tipos de duna identificados: móvil, antropizada/alterada y estabilizada

Duna móvil
0,20 ha · 14%

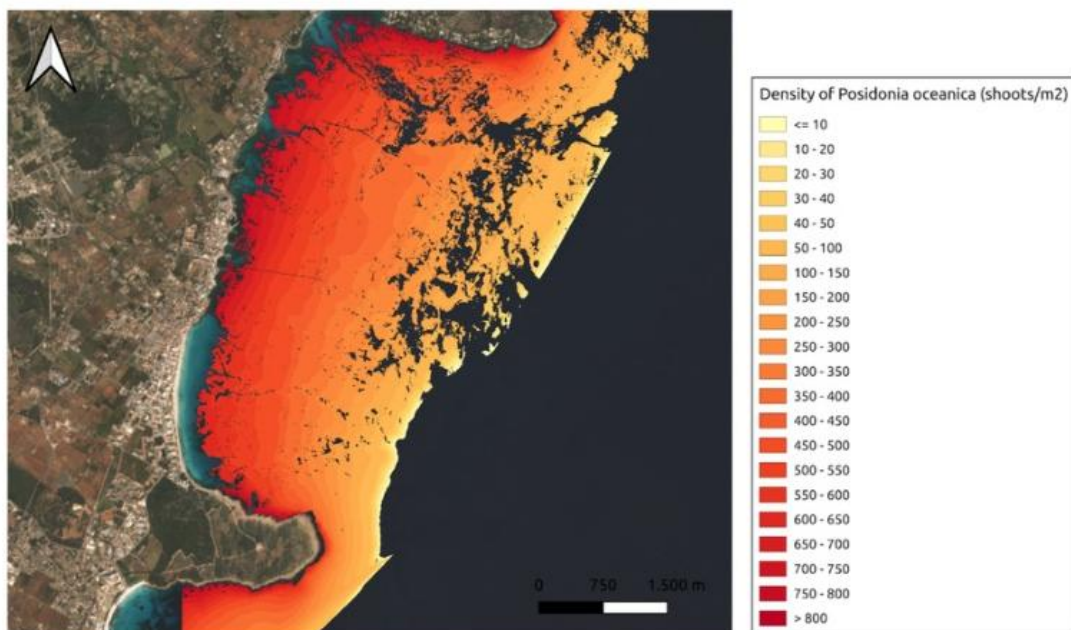
Duna estabilizada
1,15 ha · 76%

**Modificaciones
antropogénicas**
0,15 ha · 10%

- Duna móvil: zona más dinámica, expuesta al oleaje y al viento.
- Duna estabilizada: mayor vegetación y capacidad de retención de sedimento.
- Modificaciones antrópicas: Caminos, pisoteo, compactación y pérdida de continuidad.

P. oceanica: estado actual y función costera

La densidad actual de la pradera se usa como línea base para estimar su evolución futura bajo distintos escenarios de calentamiento.



Mapa de densidad actual estimado con batimetría

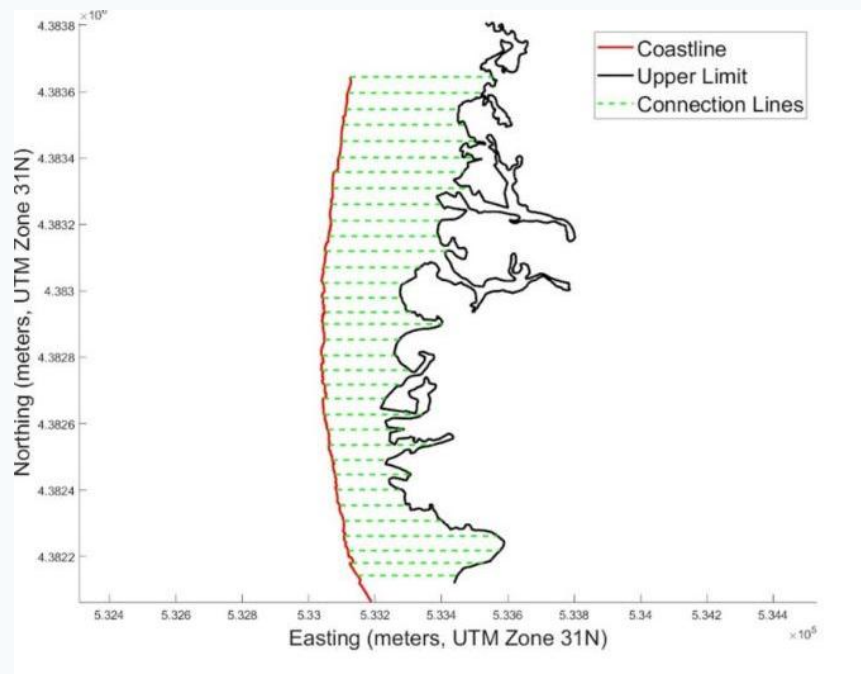
- Endémica del Mediterráneo, crecimiento muy lento y gran longevidad.
- Proporciona secuestro de carbono, reciclaje de nutrientes, habitat para muchas especies, protección frente a erosión y reducción de la energía del oleaje.
- Disminuye con la profundidad por la menor disponibilidad de luz.
- La línea base de densidad se usa para proyectar la evolución futura.

Densidad actual: $D = 807 - 24 \cdot \text{Profundidad}$

Los datos batimétricos proceden del catálogo SOCIB para Cala Millor y permiten generar la distribución espacial actual.

P. oceanica: evolución del límite superior

La posición del límite superior se ha mantenido relativamente estable entre 1956 y 2024, aunque con variabilidad temporal.



Cálculo de distancia media al límite superior de la pradera

Year	<i>P. oceanica</i> upper limit average distance (m)
1956	398
1973	460
1984	443
1979	479
1997	426
2008	457
2015	468
2024	409

*Table 12. Evolution of the average distance of the upper limit of the *P. oceanica* meadow relative to the 1956 coastline at Cala Millor.*

1956 · 398 m desde la línea de costa de referencia

Máximo observado en 1979 · 479 m

2024 · 409 m

No se observa una regresión neta marcada del límite superior a largo plazo, pero sí fluctuaciones entre años.

Enterramiento y crecimiento vertical:

Los rizomas reflejan la adaptación de la pradera a cambios sedimentarios acumulados.

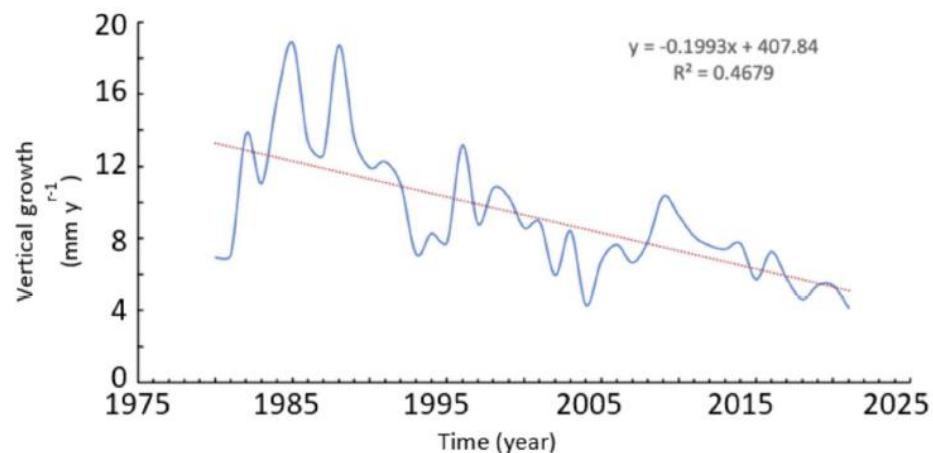


Figure 61. Evolution of the vertical growth rate of *Posidonia oceanica* rhizomes (1975-2022) in Cala Millor.

Evolución del crecimiento vertical de rizomas, 1975-2022

Crecimiento vertical de rizomas

La serie 1975–2022 muestra una tendencia general descendente. Los valores más altos aparecen en las primeras décadas, especialmente en los años 80, y a partir de 1990 se observa una reducción más sostenida.

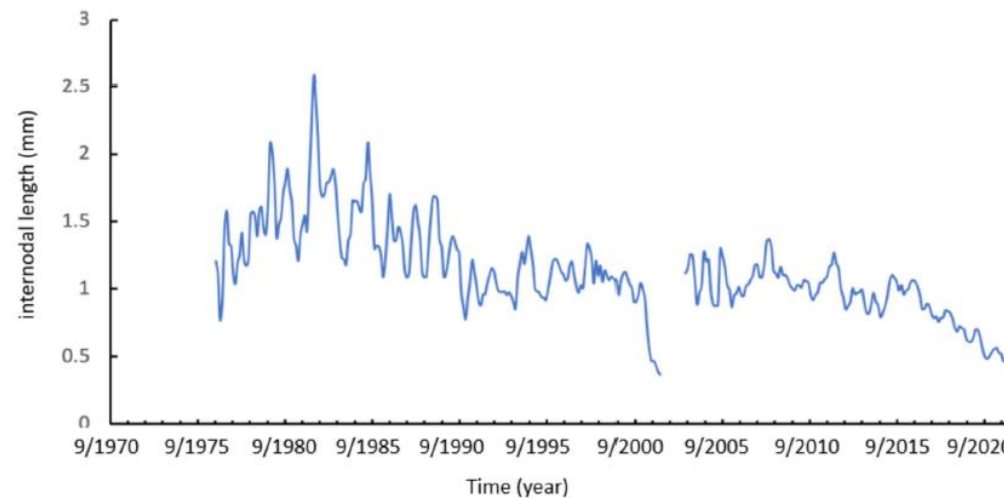


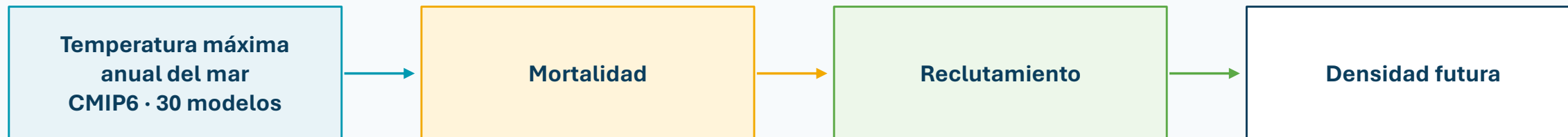
Figure 62. Temporal variation of internode length in *Posidonia oceanica* (1975-2022) in Cala Millor.

Variación temporal de la longitud de entrenudos

Longitud de los entrenudos

La serie también disminuye desde los años 90, lo que indica una menor capacidad de elongación de los rizomas y, por tanto, menor margen para responder a enterramiento continuo.

Modelo de evolución futura de la pradera



Cuantificación de impactos

Posidonia: Proyecciones de densidad

Para modelar la evolución de la densidad a lo largo del tiempo

$$\text{Densidad} = \text{Densidad inicial} \times [-t * (M - R)],$$

(Jordà et al., 2012)

Reclutamiento = 0,076 brotes año⁻¹

Mortalidad = $-0.674 + 0.028 \times T_{\text{max anual}}$

Promedio de
datos in situ de
Cala Millor
durante los
últimos 20
años

(Marbá &
Duarte 2010):

$$\text{Mortalidad} = -0.674 + 0.028 \times T_{\text{max anual}}$$

Las proyecciones de temperatura máxima de la superficie del mar en el Archipiélago Balear para los años 2024-2100

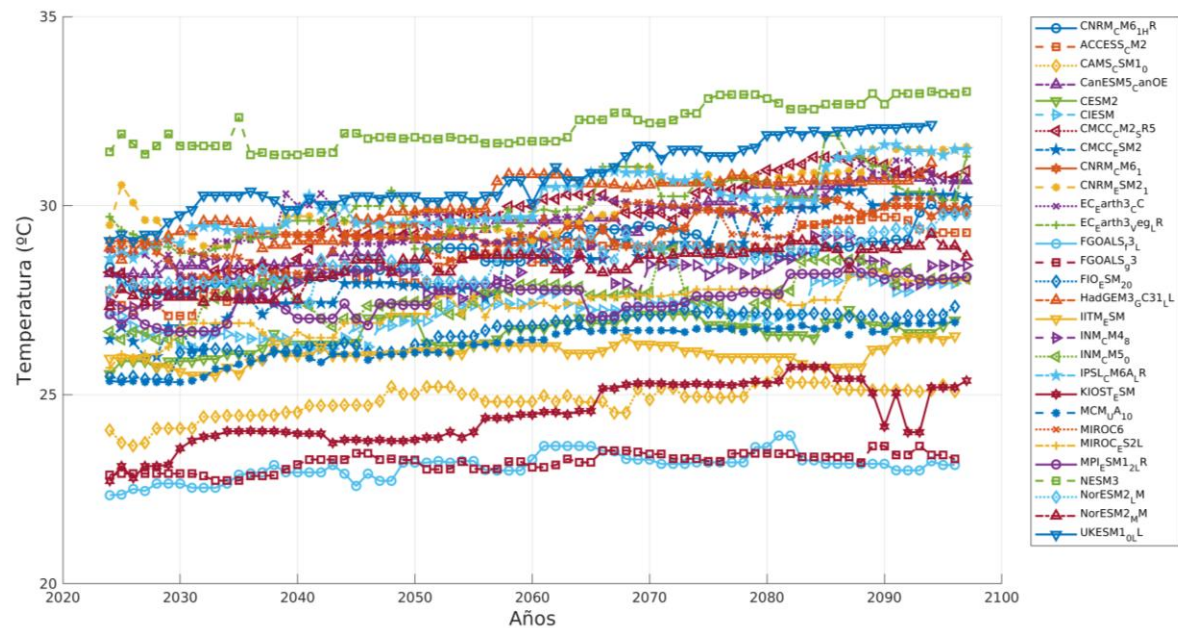
Se obtienen a partir

30 MODELOS CLIMÁTICOS
EN 2 ESCENARIOS RCP 4.5 Y
8.5

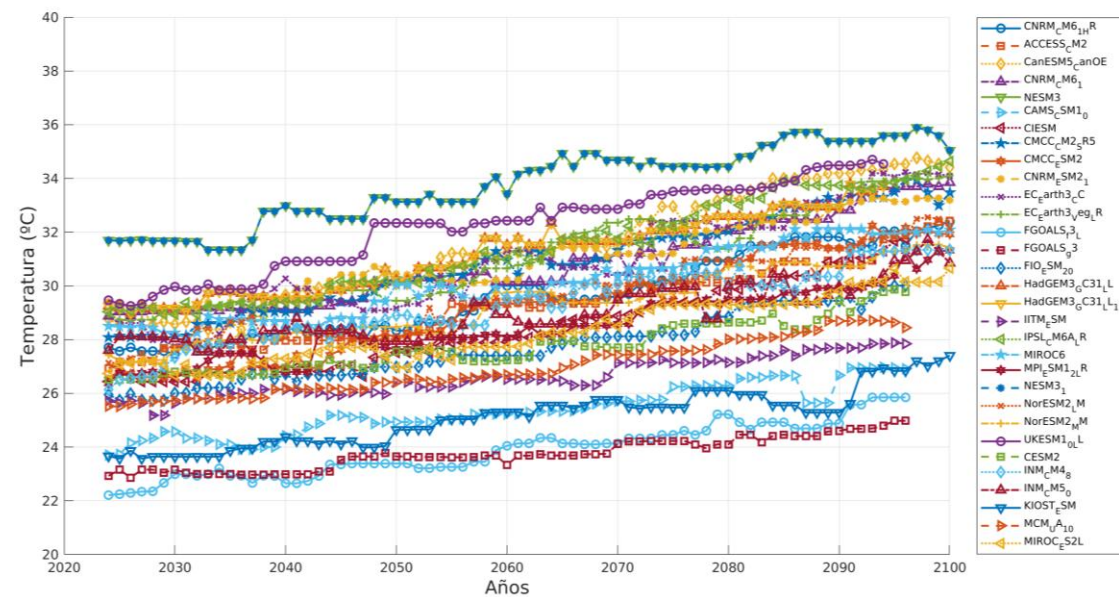
3 INTERVALOS
DE CONFIANZA

19 mapas de
proyecciones de
densidad futuras
de *P. oceanica*





Escenario 4,5



Escenario 8,5

Proyecciones temperatura máxima superficial

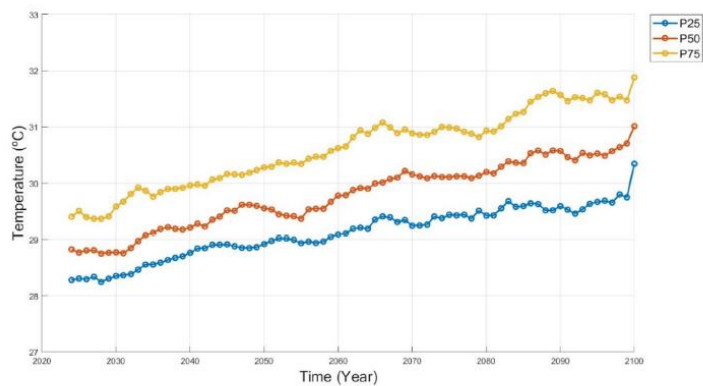


Figure 65. Projections of annual maximum sea surface temperature (°C) for the period 2024-2100 under scenario RCP-4.5, based on 29 climate models. The values represent the 25th (P25, blue line), 50th (P50, red line), and 75th (P75, yellow line) percentiles of the simulations.

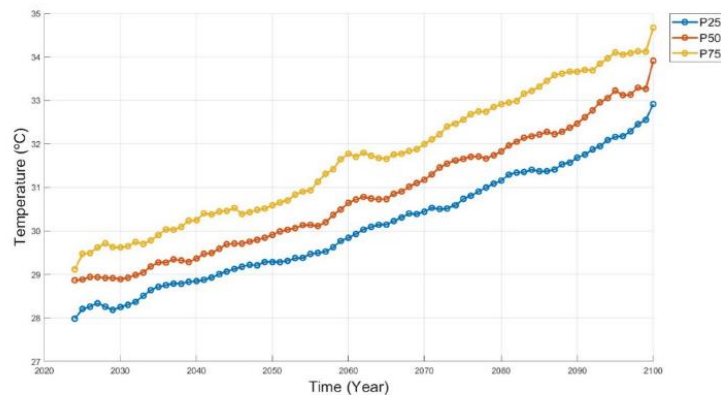


Figure 66. Projections of annual maximum sea surface temperature (°C) for the period 2024-2100 under scenario RCP 8.5, based on 29 climate models. The values represent the 25th (P25, blue line), 50th (P50, red line), and 75th (P75, yellow line) percentiles of the simulations.

Tmax proyectada (°C) por escenario y percentil

Escenario	Año	P25	P50	P75
RCP4.5	2030	25,62	26,98	28,58
RCP4.5	2050	26,62	28,51	29,68
RCP4.5	2100	28,56	30,10	31,16
RCP8.5	2030	25,70	27,54	29,42
RCP8.5	2050	26,87	28,23	30,07
RCP8.5	2100	32,11	32,84	34,30

La separación entre escenarios se amplifica hacia 2100. Esa diferencia entra directamente en la mortalidad y, por tanto, en la densidad futura.

Proyecciones de *P. oceanica* bajo RCP4.5

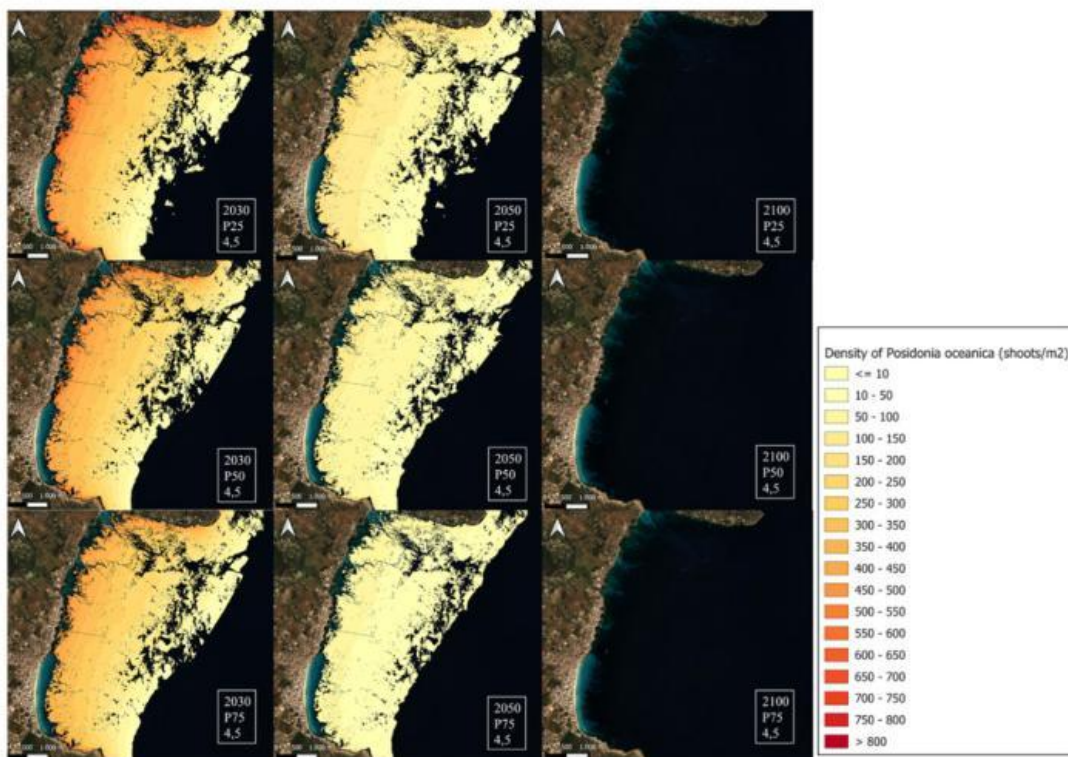


Figure 67. Projections of *P. oceanica* density (shoots/m²) under RCP 4.5 scenario for 2030, 2050 and 2100 (left, center and right). First row: percentile 25%. Medium row: percentile 50. Bottom row: percentile 75.

- 2030: todavía aparecen zonas con densidades medias-altas.
- 2050: descenso claro.
- 2100: pérdida casi total en escenarios medios/altos.

No solo cambia la extensión; cambia la densidad y, con ella, la capacidad de la pradera para sostener funciones ecológicas y protección costera.

Proyecciones de *P. oceanica* bajo RCP8.5

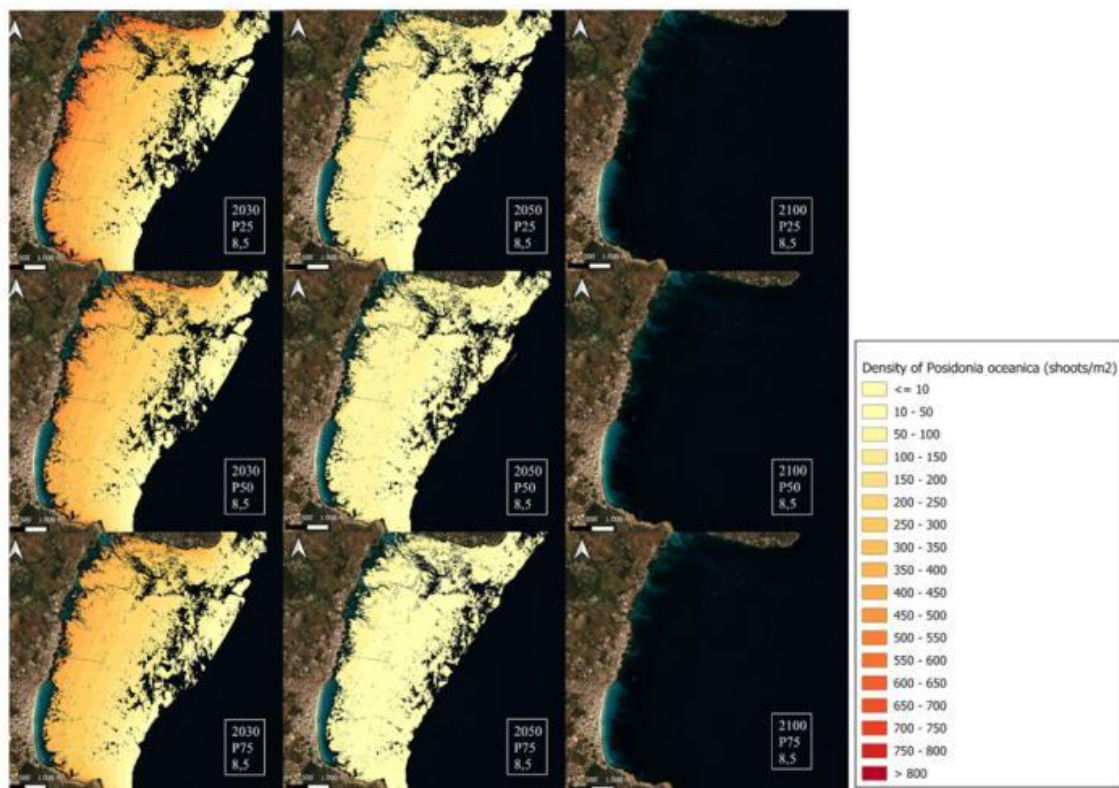


Figure 66. Projections of *P. oceanica* density (shoots/m²) under RCP 8.5 scenario for 2030, 2050 and 2100 (left, center and right). First row: percentile 25%. Medium row: percentile 50%. Bottom row: percentile 75%

- 2030: todavía aparecen zonas con densidades medias-altas.
- 2050: descenso claro.
- 2100: pérdida casi total en escenarios medios/altos.

La principal diferencia entre ambos escenarios aparece a finales de siglo: bajo RCP8.5, el mayor aumento de las temperaturas máximas del mar intensifica la pérdida de densidad de *P. oceanica*.

Diagnóstico ambiental integrado

La dimensión ambiental identifica pérdidas acumuladas, vulnerabilidades actuales y riesgos futuros.

Dunas

- Pérdida histórica muy elevada.
- Sistema actual pequeño y fragmentado.
- Capacidad de adaptación prácticamente nula por falta de espacio.

P. oceanica

- Límite superior relativamente estable.
- Señales de estrés por crecimiento/enterramiento.
- Fuerte declive de densidad futura por calentamiento.

Implicación: la adaptación no debe centrarse solo en obra o inundación; debe reducir presiones locales, proteger lo que queda y recuperar funciones naturales cuando sea posible.

Implicaciones ambientales para la adaptación

Proteger la pradera de *P. oceanica*

Reducir fondeos, turbidez, eutrofización y daños mecánicos para mantener densidad, conectividad y resiliencia frente al calentamiento.

Recuperar espacio dunar

Aumentar continuidad, vegetación y espacio de acomodación donde el frente urbano lo permita.

Reforzar soluciones basadas en la naturaleza

Usar soluciones que mantengan servicios ecosistémicos: defensa, hábitat, retención sedimentaria y paisaje.

Priorizar con evidencia espacial

Usar los mapas de vulnerabilidad, impacto y riesgo para identificar zonas críticas y comparar escenarios de adaptación.

An aerial photograph of a coastal city, likely Cala Millor, showing a sandy beach, turquoise water, and a dense urban area with many multi-story buildings. The image is overlaid with a semi-transparent dark blue filter.

Muchas Gracias

Dimensión ambiental · LIFE AdaptCalaMillor

www.LifeAdaptCalaMillor.com