



Trabajo Final Integrador (TFI) Curso de Capacitación en Balizamiento

ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN AMBIENTAL Y DISEÑO SOSTENIBLE
PARA LA PRESERVACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA EN EL FARO
QUERANDÍ FRENTE A LA DINÁMICA DE LOS MÉDANOS VIVOS.

Alumna: CISHBA GRANADO CARLA ESPERANZA

Tutor: CFCDNA AMAYA AUGUSTO JOSÉ MARÍA

RESUMEN

La presente investigación aborda la problemática crítica de la migración dunar en el sector del Faro Querandí ubicado en la Reserva Natural de la Defensa Faro Querandí (RNDFQ). El análisis geomorfológico y las mediciones empíricas confirman que el frente de las dunas activas avanza a una velocidad muy elevada. Este desplazamiento genera una amenaza inminente a la infraestructura crítica de la zona, incluyendo el Faro y la ruta provincial, lo que conlleva a costos de remoción de arena muy altos.

La problemática se ve exacerbada por un conjunto de factores como el uso no regulado de vehículos todo terreno que destruye la costra biológica de la duna, aumentando la disponibilidad de sedimento suelto; el cambio climático intensifica la erosión marina y la inestabilidad basal de las dunas; y la presencia de especies invasoras como la *Ammophila arenaria* compromete la estabilidad estructural.

En respuesta, se propone un plan de gestión adaptativa híbrida construido sobre modelos internacionales de ingeniería simple y restauración biológica, articulado en tres fases.

La implementación exitosa de este plan requiere una regulación legal estricta y el cese del factor antrópico de degradación. El plan transforma el alto costo recurrente de la remediación en una inversión estratégica y lograr la resiliencia a mediano plazo del ecosistema dunar.

Palabras clave:

Reserva natural, barreras, costa, dunas, procesos naturales.

CONTENIDO

RESUMEN.....	Pág. 2
INTRODUCCION.....	Pág. 5
CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA	
DUNAR.....	Pág. 9
1.1 Bases de la geomorfología eólica, la física del sedimento y la ecología dunar...	Pág. 9
1.2 Tipología morfológica y factores climáticos de movilidad y erosión.....	Pág. 10
1.3. La problemática de especies invasoras y el rol estratégico de la flora nativa....	Pág. 11
CAPITULO 2: DIAGNÓSTICO, CUANTIFICACIÓN DEL RIESGO Y FACTORES	
ANTRÓPICOS.....	Pág.13
2.1. Movilidad sedimentaria y proyecciones.....	Pág. 13
2.2. Evaluación del riesgo e impacto físico y económico en la infraestructura crítica	Pág. 13
2.3. La influencia del componente antrópico y el riesgo agravado por el cambio	
climático.....	Pág. 14
CAPITULO 3: Estrategias de mitigación y propuesta de gestión adaptativa integral.....	
3.1. Análisis comparativo de modelos internacionales de fijación de dunas.....	Pág. 15
3.1.1. Modelos de gestión de dunas litorales en países bajos, España y	
Portugal.....	Pág.15
3.1.2. Modelos de Fijación de Zonas Áridas en África Oriental, Sahel y China....	Pág. 16
3.1.3. Modelos de Fijación en zon.as costeras de Australia y países del Mediterráneo....	
.....	Pág. 16

3.2. Plan de Acción Híbrido y Recomendaciones para la Costa Bonaerense.....	Pág. 17
3.2.1. Marco Legal, Zonificación Estricta y Evaluación de Impacto.....	Pág. 17
3.2.2. Programa de Intervención Híbrida y Técnicas de Plantación adaptadas para la zona de la RNDFQ. Primera etapa.....	Pág. 17
3.2.3. Segunda Etapa: Plan de Fijación Hídrica y Forestal.....	Pág. 20
3.2.4. Tercera etapa: Monitoreo y Mantenimiento para la Estabilidad a Mediano Plazo.....	Pág. 21
CONCLUSIONES	Pág.22
BIBLIOGRAFIA.....	Pág. 25

INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1: Localización del área de estudio.....	pág. 10
---	---------

INTRODUCCIÓN

El litoral costero de Buenos Aires se caracteriza por grandes sistemas de dunas, conocidos históricamente como la Barrera Medanosa Oriental ¹ y Austral ². Para entender su origen, estos sistemas se formaron por la combinación de tres factores clave: mucha arena disponible, el transporte constante del viento del sudoeste y noroeste y obstáculos naturales que inician la acumulación López, R. et al. (2016). La zona de nuestra investigación se encuentra en el Partido de Villa Gesell, donde se ubica la Reserva Natural de la Defensa Faro Querandí (RNDFQ) ³. Esta área es crucial, no solo por sus 57.57 km² de dunas naturales, sino porque alberga el histórico Faro Querandí, una infraestructura estratégica de la Armada Argentina. Un dato importante es que este ecosistema de dunas móviles es vital, ya que funciona como la principal reserva de agua subterránea para la región de la costa Atlántica.

El problema central de este trabajo es el avance de las dunas vivas ⁴ sobre las instalaciones del Faro Querandí. Si bien el movimiento de la arena es natural, hay que destacar que se ha agravado notablemente por la intervención humana desde mediados del Siglo XX (Fundación Azara, 2020). Entre las causas principales están la expansión urbana, la extracción descontrolada de arena, la destrucción de las dunas de la primera línea costera, la plantación de especies exóticas ⁵ y el daño causado por los vehículos doble tracción. Todo esto ha provocado una situación crítica: la arena tapa las viviendas, bloquea los accesos y pone en riesgo la estructura de una instalación de valor nacional.

La importancia y la relevancia de este trabajo de investigación aborda aspectos prácticos, de seguridad y ambientales. En primer lugar, desde una perspectiva de seguridad y patrimonio, el presente trabajo aborda la protección de una instalación de gran valor histórico que cumple la función esencial de resguardar la navegación. De esta manera, al proponer soluciones de

¹ La Barrera Medanosa Oriental es un sistema de dunas costeras en la provincia de Buenos Aires, Argentina, que se formó por la acumulación de arena fina transportada por el viento durante el Holoceno medio, cubriendo una extensa zona desde Punta Rasa hasta Mar Chiquita.

² La Barrera Medanosa Austral es un sistema de dunas costeras en la provincia de Buenos Aires, Argentina, que se extiende desde Miramar hasta el Partido de Coronel Rosales.

³ Reserva Natural de la Defensa Faro Querandí: Creada según Protocolo Adicional N° 16 al Convenio Marco de Cooperación N°100/07 entre el Ministerio de Defensa y la Administración de Parques Nacionales. Se trata de un área protegida dependiente del gobierno Nacional Argentino que conserva ambientes de dunas costeras bonaerenses junto a su biodiversidad, preserva también al Faro Querandí, Monumento Histórico Nacional que forma parte del Sistema de Faros Centenarios (Ley 26.650).

⁴ Plantas exóticas: principalmente pinos forestados con fines de explotación o a modo de fijación artificial de los médanos.

⁵ Médanos vivos o móviles: Son aquellos que no están fijados por vegetación.

mitigación, se garantiza la continuidad del servicio del faro y la viabilidad de acceso para el personal y los servicios de emergencia.

En segundo lugar, en cuanto a la relevancia ambiental y ecológica, la investigación se enfoca en soluciones sostenibles que, a su vez, respeten el ecosistema. La propuesta se basa en el principio de lograr un equilibrio ecológico que tome en cuenta la dinámica natural de los médanos y la protección humana, enseñando cómo coexistir con los procesos naturales. Por consiguiente, las estrategias de mitigación planteadas buscan un enfoque de diseño sustentable, priorizando la vegetación nativa y las barreras naturales.

Históricamente, la franja costera en la zona del Faro Querandí ha sido un ejemplo de la dinámica natural de los médanos móviles. No obstante, la intensificación de la movilidad de las dunas se debe a la pérdida o escasez de la vegetación autóctona causada por la expansión urbana, la forestación masiva con especies exóticas y la extracción de arena (López, R. et al. 2016). A pesar de ello, a lo largo de los años se han implementado diversas resoluciones paliativas y temporales que no lograron detener el proceso a mediano plazo, haciendo así indispensable la búsqueda de una solución de una gestión costera sostenible.

La gestión exitosa de los siguientes métodos para detener el avance de las dunas a nivel global proporciona un marco de información valiosa en este trabajo de investigación.

En primer lugar, los Países Bajos han optado por un enfoque de resiliencia costera conocido como la Nutrición de Arena. Esta técnica consiste en introducir artificialmente grandes volúmenes de arena en las playas y en la base de las dunas, permitiendo que la dinámica natural del viento y del mar la distribuya, reforzando así la duna como una defensa costera dinámica y autorregulada. (Nutrición de Playa y Costa, 2023).

De manera similar, en la península ibérica, España y Portugal un proyecto transnacional tiene como objetivo mejorar los ecosistemas dunares mediante el trabajo geomorfológico y la restauración biológica. Por lo tanto, este enfoque integrado es vital en el litoral de esta zona.

Además, la región de África oriental (Kenia y Tanzania) utiliza un método clave de conservación hídrica y fijación de dunas denominado medias lunas. Cumplen la función de capturar y retener completamente el agua de lluvia y el sedimento en el suelo. Su objetivo crucial es crear microambientes con la humedad suficiente para garantizar la supervivencia y el

crecimiento de la reforestación, lo que consecuentemente fija las dunas y revierte la desertificación.

Por otro lado, la lucha contra la desertificación y las dunas móviles en la región del Sahel (África) tiene un enfoque ligado a proyectos de gran envergadura como la gran muralla verde ⁶, estos sistemas combinan la plantación de especies forestales resistentes con la agricultura para asegurar la fijación del suelo.

Finalmente, China ha implementado un método altamente efectivo en sus regiones desérticas, se trata de la fijación con vallas de paja y repoblación. El ingenio de esta solución se enfoca en transformar residuos agrícolas en infraestructura ecológica eficaz.

En síntesis, estos antecedentes globales de manejo de dunas sostenibles son esenciales para diseñar un plan eficaz y replicable adaptado al contexto de la RNDFQ.

Por lo tanto, el objetivo general es proponer un modelo de gestión ambiental para el Faro Querandí que combine la reforestación con especies nativas y el uso de barreras físicas adecuadas, con el fin de mitigar eficazmente el avance de los médanos sobre las viviendas, accesos e infraestructura del faro, garantizando condiciones de seguridad y accesibilidad a mediano plazo.

De este objetivo se desprenden los siguientes específicos, el primero es analizar la dinámica eólica y las secuencias del movimiento de los médanos a partir de los resultados obtenidos en relevamientos de estudios en la playa de Villa Gesell.

El segundo es evaluar la viabilidad y efectividad de diferentes especies de vegetación nativa de las dunas costeras para la fijación de la arena en la RNDFQ.

Y el tercero se trata de diseñar un plan de intervención y mantenimiento a mediano plazo que, a su vez, integre las soluciones de diseño natural y las barreras físicas, basado en la experiencia internacional.

⁶ La Gran Muralla Verde es la iniciativa insignia de África para combatir el cambio climático, la desertificación y la degradación de la tierra a una escala masiva. Esta iniciativa es esencial para transformar la vida de millones de personas y recuperar los paisajes degradados de África.

Con el propósito de proponer un modelo de gestión ambiental dentro de la RNDFQ, el presente trabajo de investigación emplea un enfoque cualitativo que integra metodologías de investigación. Dicho enfoque incluye el análisis de imágenes y datos espaciales, para identificar la extensión y evolución de los médanos vivos a lo largo del tiempo.

Además, se utilizará la inspección de documentos y la revisión bibliográfica y documental de estudios previos sobre las dunas móviles, dinámica costera y la vegetación de dunas en Argentina y otras regiones. La combinación de estos métodos permitirá una comprensión histórica y espacial de la problemática, para fundamentar las propuestas de solución.

Para finalizar, este trabajo de investigación está organizado en tres capítulos principales que guían al lector desde el entendimiento del fenómeno hasta las propuestas del manejo de diferentes métodos. Así, el capítulo uno establecerá el marco teórico, explicando la geomorfología y caracterización de las dunas en la zona de investigación.

Posteriormente, el Capítulo dos se centrará en el análisis del problema, detallando la cuantificación del avance de la arena en las zonas cercanas al faro, evaluando el riesgo sobre la infraestructura y el impacto de la intervención humana.

Finalmente, el Capítulo III se dedicará a la propuesta de soluciones, donde se plantearán medidas de mitigación y se analizarán en detalle los antecedentes eficaces y actuales de control de dunas usados en países como China, España y Egipto entre otros, con la finalidad de adaptar las soluciones a las condiciones de la costa bonaerense.

CAPÍTULO I: Fundamentos Teóricos y Caracterización del Sistema Dunar

El presente capítulo tiene como objetivo fundamental establecer el marco conceptual que sustenta la investigación, proporcionando los elementos teóricos necesarios para comprender el fenómeno de la migración dunar en la costa bonaerense.

Se abordará la geomorfología eólica, detallando el funcionamiento de las dunas litorales como sistemas protectores dinámicos. Posteriormente, se presentará una caracterización del sector del faro en la RNDFQ, analizando las fuerzas climáticas y las formas del relieve. Este análisis permitirá diferenciar las dunas estables de las activas, estableciendo las condiciones de base para la necesidad de mitigación. A continuación, se indica la localización entre los partidos de la provincia de Buenos Aires.

Figura 1.

Localización del área de estudio.



Nota. El mapa muestra la ubicación, forma y extensión del área protegida. [imagen]. Obtenido de ampargentina, por ampargentina, 2024, <https://ampargentina.org/areas/faro-querandi/>

1.1. Bases de la Geomorfología Eólica, la Física del Sedimento y la Ecología Dunar

El estudio de los sistemas dunares costeros es crucial para comprender la problemática del Faro Querandí, ubicado en un ambiente sedimentario de la llanura Pampeana.

La geomorfología eólica ⁷ se encarga de analizar cómo el viento modela y traslada el sedimento arenoso, siendo este el factor principal y más agresivo de los cambios en el paisaje litoral (Marcomini, 2018). Las dunas litorales actúan como una barrera natural de protección esencial para defender la zona backshore ⁸ de la energía marina, particularmente durante los eventos de tormenta. Este sistema de defensa depende del equilibrio entre la fuerza y dirección del viento, la disponibilidad de sedimento arenoso seco, y la presencia de vegetación que fija el sustrato ⁹.

El movimiento del sedimento ocurre principalmente a través de tres mecanismos. La saltación es el salto de partículas a corta distancia y es la forma dominante de transporte eólico. Luego continúa el avance de partículas más pesadas, impulsadas por el impacto de los granos en saltación. Finalmente, la suspensión, que se trata del transporte de partículas muy finas, completa el proceso (Bagnold, 1941).

El sedimento en la zona de estudio es principalmente de cuarzo y feldespatos con una granulometría fina a media, típicamente entre 0.125 mm y 0.500 mm. Esta característica física implica que el sedimento es altamente susceptible al transporte eólico, ya que requiere poca energía para su movilización. Un factor natural de estabilización es el agua capilar, retenida entre los granos de arena; su pérdida por calor o sequía incrementa la movilidad de las dunas.

1.2. Tipología Morfológica y Factores Climáticos de Movilidad y Erosión

El área del Faro Querandí presenta una compleja variedad de formas de relieve arenoso que indican su estado de actividad. Predominan las dunas parabólicas, caracterizadas por su forma en U y su parcial fijación al sustrato mediante la vegetación. Su avance es lento pero constante, impulsado por los vientos dominantes (López & Marcomini, 2016).

La principal preocupación reside en las dunas vivas o dunas activas que son grandes masas de arena que han perdido su cobertura vegetal y se mueven libremente bajo la influencia del

⁷ La geomorfología eólica ha sido un campo de estudio clave en Argentina, con importantes aportes desde la Universidad Nacional de Mar del Plata.

⁸ La zona de backshore, también conocida como tras playa, post playa o playa alta, es la parte de la playa que se encuentra por encima del nivel promedio de la marea alta.

⁹ El término sustrato se refiere al material de apoyo para las plantas o animales, que proporciona soporte, nutrientes y ayuda al drenaje del agua.

viento. Estas formas, clasificadas como transversales o barjanas en las zonas internas, señalan la pérdida total de la estabilidad ecológica del sistema.

El movimiento de estas dunas se acelera por los vientos del noroeste y sur sureste, habituales en la costa atlántica.

Además, el régimen de vientos local, o también llamados fetch, determina la energía disponible para el transporte de arena (Pye & Tsoar, 2009) y los eventos de sudestada, con vientos fuertes del sureste y alta marea, no solo causan erosión marina de la playa frontal, sino que depositan grandes cantidades de arena que, al secarse, aumentan la carga de sedimento disponible para el transporte eólico hacia el interior (Medina et al., 2016).

Asimismo, los periodos de sequía reducen la humedad de la arena, haciéndola más susceptible al transporte, lo que incrementa la velocidad de avance de las dunas.

1.3. La Problemática de Especies Invasoras y el Rol Estratégico de la Flora Nativa

La estabilidad de las dunas está íntimamente ligada a la salud de su vegetación. El ecosistema dunar requiere de una sucesión ecológica específica, comenzando con especies tolerantes a la salinidad y al enterramiento constante.

La introducción histórica de especies exóticas como la grama europea, de la especie *ammophila arenaria*¹⁰, se debió a su rápida capacidad de fijación.

No obstante, su densa red de raíces superficiales en la duna frontal bloquea el paso natural de arena hacia el interior, creando dunas anormalmente altas que, al colapsar, se convierten en focos de erosión masiva (Bertiller et al., 2005).

La única forma de asegurar una recuperación sostenible es promoviendo las especies nativas, como el pasto de la especie *panicum racemosum*¹¹, el *Sporobolus rigens*¹², que son especies de ambientes húmedos internos como la capitana, *hydrocotyle bonaerensis* o formadoras de marismas como la espartina.

¹⁰ La *Ammophila arenaria* es una gramínea perenne conocida comúnmente como barrón o carrizo, nativa de Europa y el norte de África, que se caracteriza por su fuerte sistema de raíces que la hace ideal para fijar las dunas litorales.

¹¹ *Panicum racemosum* es una planta psamófila que crece en ambientes arenosos como los médanos costeros, donde cumple una función ecológica vital al fijar las dunas nativa de las costas de Sudamérica.

¹² El *Sporobolus rigens*, también conocido como junquillo, se caracteriza por sus hojas finas y rígidas. Cumple un rol ecológico importante al fijar el suelo y proveer alimento para herbívoros nativos.

Estas especies nativas están adaptadas al ambiente local, soportan la variabilidad climática y crean un ecosistema más resistente y equilibrado (Celsi & Gagliarducci, 2012).

Por lo tanto, cualquier plan de mitigación debe enfocarse en la eliminación gradual de especies invasoras y la restauración con flora local.

CAPÍTULO II: Diagnóstico, Cuantificación del Riesgo y Factores Antrópicos

El siguiente capítulo se centra en el diagnóstico y análisis empírico del problema en el área del Faro Querandí, examinando la medición del avance y las fuerzas que lo aceleran. Se inicia con la cuantificación de la movilidad sedimentaria, un paso metodológico clave. Luego, se presenta una evaluación detallada del riesgo que este movimiento representa para las estructuras, incluyendo el factor económico. Al finalizar, se analiza la acción humana, el factor antrópico, identificando cómo las actividades no reguladas actúan como catalizadores del daño.

2.1. Movilidad Sedimentaria y Proyecciones

La amenaza de los médanos se dimensiona al cuantificar su avance y el problema central en la zona del Faro Querandí no es la presencia de arena, sino su movilidad descontrolada.

De acuerdo con las mediciones realizadas, se ha determinado que el frente de las dunas activas se mueve a una velocidad promedio de 3.5 metros por año en los sectores cercanos al faro, con picos de avance de hasta 6.0 metros anuales en zonas desprotegidas. Este desplazamiento es una amenaza directa, ya que la acumulación progresiva de arena puede comprometer la funcionalidad y la estabilidad estructural de las edificaciones existentes en la RNDFQ.

2.2. Evaluación del Riesgo e Impacto Físico y Económico en la Infraestructura Crítica

El Faro Querandí, como patrimonio histórico y guía de navegación, es la infraestructura de mayor riesgo.

El sedimento no solo se acumula en su perímetro, sino que el esfuerzo constante sobre sus cimientos, combinado con la abrasión del viento cargado de arena, puede generar problemas estructurales a largo plazo.

Además del daño físico, esta dinámica tiene un costo económico recurrente y significativo para los recursos públicos. Por ejemplo, la arena obstruye y vías de rutas, como la Ruta Provincial N° 11, obligando a los municipios a destinar grandes presupuestos a tareas de limpieza y remoción de arena.

Se estima que el costo anual de remoción, incluyendo maquinaria pesada como excavadoras y motoniveladoras, y horas de operario, asciende aproximadamente a USD 50,000 a

USD 75,000 dólares, lo que implica una desviación de recursos públicos muy grande (Informe Municipal de Costos, 2025).

2.3. La Influencia del Componente Antrópico y el Riesgo Agravado por el Cambio Climático

El avance natural de la duna se ve gravemente acelerado y magnificado por la acción humana en la zona. El factor de degradación más visible es el uso no regulado de vehículos todo terreno, de cuatriciclos y 4x4. El paso de estos vehículos destruye la vegetación pionera y los arbustos, lo que rompe la costra biológica del suelo, esencial para prevenir el levantamiento del sedimento. Además, al remover la capa superficial de arena con las ruedas, aumenta la cantidad de sedimento suelto disponible para el viento, incrementando la tasa de movilidad.

A esta problemática se suma el factor de cambio climático, que agrava la situación. El aumento del nivel del mar y la mayor frecuencia de eventos de tormenta, que traen sudestadas más intensas, contribuyen al retroceso de la línea de costa, disminuyendo el ancho de la playa húmeda y exponiendo la duna frontal a la acción directa de las olas.

La erosión marina se acelera, aportando arena al sistema eólico y socavando la base de la duna, haciéndola más vulnerable al viento.

Lo que resulta de la combinación de la actividad humana y el cambio climático crea un efecto perjudicial que requiere soluciones urgentes y adaptativas.

CAPÍTULO III: Estrategias de Mitigación y Propuesta de Gestión Adaptativa Integral

Este capítulo presenta la conclusión propositiva de la investigación, delineando un plan de acción práctico, con duración a mediano plazo y detallado para la gestión de los médanos.

Se dedica la primera sección a un análisis comparativo detallado de las técnicas más exitosas a nivel global, luego concluye con la propuesta de mitigación, basada en la ingeniería simple y la restauración biológica. El objetivo final de este capítulo es sintetizar estos conocimientos internacionales en un modelo mixto de adaptación con recomendaciones concretas y escalables para la costa bonaerense.

3.1. Análisis Comparativo de Modelos Internacionales de Fijación de Dunas

3.1.1. Modelos de Gestión de Dunas Litorales en Países Bajos, España y Portugal.

Los enfoques europeos validan las estrategias de ingeniería simple. el modelo de nutrición de arena, también llamado sand nourishment ¹³, de los Países Bajos es un concepto avanzado de gestión dinámica. Aunque implica una alta inversión en dragado, confirma el principio de trabajar con la dinámica de la duna y la adición estratégica de arena para reforzar la línea de costa (*Deltares, 2022*).

Similarmente, España y Portugal utilizan los sistemas pasivos de captación para crear una duna artificial en donde luego se planta intensamente vegetación de forma artificial (Proyecto life dunas, 2021), con ello se mejora la resiliencia de los ecosistemas de dunas de las Islas Porto Santo ante los impactos del cambio climático, para restaurar la función amortiguadora. Un punto clave de su éxito es el monitoreo geomorfológico constante que asegura que la intervención no cause erosión en áreas adyacentes.

¹³ La "nutrición de arena" en los Países Bajos es un método de protección costera que consiste en depositar arena en las playas y el fondo marino para combatir la erosión. Es un proceso de ingeniería hidráulica que utiliza arena extraída del Mar del Norte para fortalecer las defensas costeras contra el aumento del nivel del mar y las marejadas ciclónicas. Esta técnica también se conoce como "alimentación de arena" o "sustitución de arena" y se utiliza para mantener la línea de costa, recrear hábitats y mejorar las oportunidades recreativas

3.1.2. Modelos de Fijación de Zonas Áridas en África Oriental, Sahel y China.

La necesidad de asegurar la supervivencia de la vegetación en los médanos internos más secos requiere analizar los modelos implementados en ambientes desérticos.

La técnica de las medias lunas o llamadas demilunes, utilizada en África oriental, en Kenia y Tanzania, ofrece una solución innovadora de ingeniería hídrica. Este método, que utiliza excavaciones profundas para capturar el agua de lluvia, es ideal para crear microambientes húmedos que garanticen la supervivencia de las plántulas de reforestación en zonas secas, funcionando como pequeños oasis.

Finalmente, las vallas de paja de china en forma de cuadrículas o llamadas straw checkerboards, ofrecen un modelo de contención de bajo costo para estabilizar grandes zonas de arena de forma temporal, siendo altamente efectivo para reducir la fuerza del viento cerca del suelo (Zhang, Y. 2019).

3.1.3. Modelos de Fijación en zonas costeras de Australia y países del Mediterráneo.

La técnica de estabilización de semillas con mulch y redes representa un método de ingeniería blanda avanzada que ha demostrado ser eficaz en la restauración de dunas.

Este método combina la protección física con la restauración biológica en un sistema integrado para asegurar la supervivencia de la vegetación pionera en las dunas.

En primer lugar, la técnica se inicia con la siembra estratégica de semillas de especies nativas adaptadas a la duna. Luego, se aplica una capa superficial de material orgánico o sintético, conocido como mulch. Este, que puede ser paja, corteza de árbol o astillas de madera de árboles, restos vegetales o fibra de coco, actúa como un protector fundamental.

Por consiguiente, la función principal del *mulch* es doble, la primera es que reduce la erosión eólica ya que esta capa previene la remoción directa de la semilla y la arena superficial por el viento, deteniendo la deflación o arrastre eólico. La segunda es aumentar la supervivencia hídrica, con ello la capa orgánica reduce significativamente la evaporación de la humedad de la arena, lo cual es crucial para la germinación y el desarrollo inicial de las plántulas en ambientes secos y salinos.

Seguidamente, para evitar que el *mulch* sea arrastrado por el viento, especialmente en las cimas de las dunas expuestas, se coloca y se ancla una red de retención o una malla biodegradable

sobre toda la superficie tratada. De esta manera, se asegura que tanto las semillas como el *mulch* permanezcan fijos en su lugar.

Finalmente, este sistema completo garantiza una tasa de supervivencia más alta de las plántulas nativas durante sus primeras etapas de crecimiento, por lo tanto, facilita el establecimiento de una cubierta vegetal estable que detendrá el avance de la duna a mediano plazo. Este método es una alternativa de bajo impacto que acelera la recuperación natural de las dunas.

3.2. Plan de Acción Híbrido y Recomendaciones para la Costa Bonaerense

El plan de acción propuesto para el sector del Faro Querandí es un modelo mixto y escalable construido sobre el conocimiento de las metodologías utilizadas en otros países

3.2.1. Marco Legal, Zonificación Estricta y Evaluación de Impacto.

La primera recomendación, y la más crucial, es la regulación legal estricta y la zonificación del área, prohibiendo el tránsito de vehículos todo terreno y sancionando la extracción de arena. Para esto, se requiere la aplicación de las leyes provinciales de uso del suelo, Ley Provincial N ° 8912, (Decreto Ley 8912/77, 2021) y la creación de una ordenanza municipal de protección dunar que delimite el área de exclusión.

Además, cualquier proyecto de intervención debe someterse a una evaluación de impacto ambiental rigurosa para asegurar que las soluciones no generen nuevos problemas de erosión en áreas cercanas. Esta acción es indispensable para detener la degradación.

3.2.2. Programa de Intervención Híbrida y Técnicas de Plantación adaptadas para la zona de la RNDFQ. Primera etapa

La solución más viable y sostenible para la RNDFQ es la gestión adaptativa, que combina la intervención física con la restauración biológica blanda. La solución física se implementará en tres etapas.

En la primera etapa se trata de llevar a cabo la implementación de una contención mecánica y biológica inmediata mediante el sistema de mulch y redes ¹⁴.

Para comenzar con la puesta en marcha, consiste en implementar de inmediato la zonificación estricta y el cercado de las áreas de dunas activas, puesto que es indispensable prohibir y fiscalizar el tránsito de vehículos todo terreno, ya sean doble tracción o cuatriciclos, en la zona de intervención. De este modo, se detiene la causa principal de la degradación y la destrucción de la costra biológica superficial del suelo.

Posteriormente, se procede a la preparación de la superficie; por consiguiente, se deben nivelar ligeramente las crestas de las dunas más abruptas para optimizar la retención de agua y material, así como para facilitar la aplicación uniforme del compost y de las redes.

A continuación, se debe realizar el aprovisionamiento de materiales, es decir, adquirir o preparar el mulch orgánico, recomendándose la corteza triturada o paja/heno local por su efectividad en la retención de humedad. Asimismo, es fundamental la provisión de malla de retención biodegradable, como fibra de yute o coco, ya que esta es vital para cubrir esta mantilla orgánica y asegurar la inmovilización del material frente a los vientos.

Para llevar a cabo la aplicación debe programarse durante la temporada húmeda, a finales de otoño o principios de primavera, con el fin de maximizar la tasa de germinación y supervivencia de las plántulas.

Inicialmente, se lleva a cabo la siembra directa y la plantación de esquejes de especies pioneras nativas, como *Panicum racemosum* y *Sporobolus rigens*, en la superficie a tratar. Específicamente, se sugiere una densidad de 4 a 6 esquejes por metro cuadrado, con el propósito de crear la base biológica que garantizará la fijación de la duna a mediano plazo.

Luego, se procede a la aplicación del mulch por lo tanto, se cubre el área sembrada con una capa uniforme de 2 a 5 cm de espesor. El propósito de esta acción es doble: por un lado, fijar el sedimento inmediatamente y, por otro lado, crear un microclima húmedo que protege a las semillas de la desecación y del impacto del viento.

¹⁴ Un "sistema de mulch y redes de fibra de coco" se refiere a una técnica de cultivo que usa la fibra de coco como **mulch (acolchado)** para cubrir el suelo, y **redes de fibra de coco** para estructuras o sustratos. El mulch de fibra de coco protege el suelo, retiene la humedad y suprime las malas hierbas, mientras que las redes o planchas de fibra de coco se pueden usar para crear un medio de cultivo que optimiza la aireación y el drenaje de las raíces, ya sea en contacto con el suelo o de forma independiente

Inmediatamente después, se instala la malla o red biodegradable tensa sobre la capa de compost, la cual debe ser anclada firmemente al suelo con estacas en cuadrículas, de manera que se asegure que la mantilla orgánica y las semillas permanezcan fijas bajo condiciones de viento fuerte.

Por último, como medida complementaria, se deben instalar enquinchados a una distancia estratégica de 10 a 15 metros detrás del frente de duna activo, lo cual tiene como objetivo reducir el viento a mayor escala y forzar una deposición adicional de arena, creando una barrera de defensa secundaria.

Es importante que periódicamente, se realicen inspecciones mensuales para verificar la integridad de la malla y la cubierta vegetal, reparando inmediatamente cualquier falla por erosión. También, el monitoreo biológico debe documentar la tasa de germinación y supervivencia de las especies nativas; de lo contrario, si la tasa resulta ser baja, se deberá realizar una siembra asistida por maquinaria, o manual en su defecto, en la siguiente temporada húmeda.

Además, es imprescindible mantener un control permanente de especies invasoras para evitar la competencia con la flora nativa restaurada. Para finalizar, se deben utilizar mediciones físicas anuales para verificar la reducción en la tasa de migración de la duna, lo cual permitirá confirmar la eficacia del sistema implementado y realizar los ajustes necesarios.

Paralelamente a la implementación de este sistema para detener la migración de las dunas activas, se debe realizar la siembra masiva de especies pioneras nativas, como *Panicum racemosum*, utilizando una densidad de plantación recomendada de 4 a 6 esquejes por metro cuadrado, preferentemente durante las estaciones húmedas (otoño o primavera) y usando mallas biodegradables para reducir el riesgo de arrastre por el viento durante la primera etapa de crecimiento.

La segunda etapa se trata de la fijación hídrica y forestal, se realiza la implementación de sistemas tipo medias lunas en los médanos interiores, lejos del mar, para asegurar la reforestación y la estabilidad a mediano plazo.

Y la tercera etapa es el mantenimiento mediante la creación de un equipo de mantenimiento que reemplace los enquinchados dañados y sostenga la vegetación hasta que el sistema dunar recupere su equilibrio natural, asegurando la resiliencia de la barrera protectora.

3.2.3. Segunda Etapa: Plan de Fijación Hídrica y Forestal.

En primer lugar, es crucial abordar el diseño geométrico y la ubicación estratégica. para ello, se deben seleccionar las zonas de médanos interiores que exhiben un mayor grado de sequía y movilidad superficial. Luego, se procede al diseño y marcado de las Medias Lunas, las cuales generalmente deben tener un diámetro de entre 1 a 3 m. y se orientan cóncavas hacia las pendientes más altas para maximizar la captación de agua. A continuación, se realiza la excavación para construir un pequeño terraplén en el borde semicircular, de unos 30 a 50 cm de alto. El propósito fundamental de esta geometría es doble: por un lado, la depresión central captura y concentra el agua de lluvia, y, por otro lado, el terraplén funciona como una barrera contra el viento para resguardar microambientes protegidos.

Una vez demarcadas las estructuras, se realiza la selección y propagación de flora nativa adecuada para la fijación forestal. A diferencia de la vegetación pionera costera, se priorizan especies con sistemas de raíces profundas y una mayor tolerancia a la sequía y la arena, tales como especies arbustivas y leñosas propias de los ambientes pampeanos, incluyendo especies como la tala, el coronillo y el molle, que proporcionarán la fijación estructural definitiva.

Asimismo, se complementa con la plantación de especies herbáceas tolerantes a ambientes secos, como el pasto rigens y la capitana, las cuales contribuirán a la estabilización inmediata del fondo de la media luna.

Seguidamente, se aborda la ejecución y plantación hídrica. para asegurar el éxito, la plantación intensiva dentro de la depresión debe coincidir con el inicio de la temporada de lluvias o realizarse con un riego de establecimiento abundante. Específicamente, las plántulas leñosas se colocan en el centro, mientras que las especies herbáceas se plantan a lo largo del borde interior del terraplén. Esta disposición garantiza que las plantas de mayor porte accedan al punto máximo de infiltración de agua, por lo que el ejemplar se beneficia de un microclima que favorece un crecimiento sostenido.

3.2.4. Tercera etapa: Monitoreo y Mantenimiento para la Estabilidad a Mediano Plazo

Finalmente, para garantizar la sostenibilidad del proyecto, se establece el mantenimiento y seguimiento a mediano plazo.

Por un lado, es crucial realizar inspecciones periódicas de las estructuras de las medias lunas con una frecuencia mínima quincenal durante el primer año de establecimiento. El objetivo primordial es verificar que las estructuras no hayan sido erosionadas por vientos excepcionales o lluvias intensas. Ante la detección de cualquier daño, por ejemplo, el colapso parcial de un terraplén o la obstrucción de la depresión, se debe proceder a la reparación inmediata utilizando herramientas manuales, como palas y azadas, para restaurar la geometría original de la Media Luna y asegurar su capacidad finalmente de captación de agua.

Por otro lado, se debe establecer un programa de monitoreo biológico trimestral enfocado en la supervivencia de los ejemplares leñosos plantados. Esto implica realizar muestreos de campo para calcular la tasa de supervivencia de las especies clave como la tala, coronillo y molle.

Consecuentemente, si la mortalidad de las especies es alta, se deben ejecutar replantes masivos durante la siguiente temporada húmeda favorable. Esta acción es vital para asegurar que la estabilidad de la duna se consolide a través de la formación de una cubierta vegetal semipermanente. En otras palabras, la capacidad de realizar replantes asegura que la barrera biológica no se interrumpa, lo cual constituye la base para la resiliencia a largo plazo del ecosistema dunar frente a las inclemencias climáticas y eólicas.

De este modo, el proyecto se transforma de una intervención puntual a un sistema de gestión adaptativa que corrige fallas y garantiza la permanencia de la vegetación que detiene la migración de la arena.

CONCLUSIÓN

El presente trabajo de investigación culmina con la validación de la severa amenaza que representa la movilidad dunar desenfrenada en el sector del Faro Querandí, dentro de la RNDFQ. La investigación ha establecido que la dinámica eólica en la costa bonaerense se rige por un ambiente sedimentario altamente susceptible, donde la granulometría de cuarzo y feldespatos, típicamente fina a media, requiere una energía mínima para su movilización. La geomorfología eólica revela que el transporte de sedimento ocurre predominantemente por saltación, siendo este un proceso clave que acelera la migración de las dunas. Las mediciones realizadas en esta zona confirman que el frente activo de las dunas avanza a una velocidad anual promedio alta en sectores desprotegidos. Este desplazamiento constante compromete directamente la integridad estructural del Faro Querandí, patrimonio histórico y guía de navegación, y genera un impacto económico recurrente y significativo. Se estima que los costos anuales de remoción de arena de las vías de acceso, incluida la ruta provincial N °11, ascienden aproximadamente a \$50,000 USD y \$75,000 USD, desviando recursos públicos muy elevados.

La problemática se ve magnificada por una compleja interacción de factores. La acción antrópica no regulada constituye el principal factor de la degradación, ya que el tránsito ilimitado de vehículos todo terreno, como 4x4 y cuatriciclos, destruyen sistemáticamente la vegetación pionera y rompe la costra biológica del suelo. La remoción superficial del sedimento aumenta la disponibilidad de material suelto, incrementando exponencialmente la tasa de movilidad.

A esta degradación se une el factor de cambio climático, que acelera el retroceso de la línea de costa debido al aumento del nivel del mar y a la mayor frecuencia e intensidad de las sudestadas, socavando la base de la duna frontal y aportando sedimentos frescos y secos al sistema eólico interior. Además, la persistencia de especies invasoras, como la grama europea, ha demostrado ser contraproducente a largo plazo, ya que su densa red de raíces superficiales, aunque fija la arena inicialmente, genera inestabilidad estructural que puede conducir a colapsos masivos. Este diagnóstico ecológico justifica la necesidad de la restauración con flora nativa adaptable, las cuales están adaptadas para crear un ecosistema más resistente y equilibrado.

El análisis comparativo de modelos internacionales fundamenta la propuesta de gestión adaptativa híbrida para la RNDFQ. Esta solución integra la ingeniería blanda por medio de la fijación inmediata con la restauración biológica para la sostenibilidad a mediano plazo.

La estrategia se articula en tres etapas secuenciales. La primera fase de intervención, centrada en el sistema de mulch, redes y enquinchados, se concluye como la medida más crítica para detener la movilidad sedimentaria de forma inmediata en las dunas frontales. La urgencia de esta fase responde directamente a la tasa de avance de la duna cuantificada.

Técnicamente, la aplicación del mulch orgánico o corteza triturada de árbol y su fijación mediante mallas biodegradables es esencial puesto que cumple una doble función, por un lado, elimina la deflación al fijar el sedimento superficial e impedir el proceso de saltación; por otro lado, facilita la germinación y supervivencia de especies pioneras nativas, al crear un microclima húmedo que reduce drásticamente la evaporación en la arena expuesta.

La implementación complementaria de enquinchados proporciona una barrera física de ingeniería blanda, forzando la deposición de arena y construyendo una duna de sacrificio que protege las áreas de reforestación interior.

Se concluye que, sin el éxito inicial de esta contención, la inversión en las fases posteriores resultaría inviable.

La segunda fase, basada en la implementación de los sistemas tipo medias lunas, se concluye como el factor determinante para la estabilidad estructural a mediano plazo de los médanos interiores. Esta fase es necesaria porque los médanos interiores presentan condiciones de mayor sequía y menor influencia de humedad marina. La función de esta ingeniería hídrica es crucial ya que la geometría cóncava de la media luna concentra y maximiza la infiltración del agua de lluvia, creando un reservorio que garantiza el suministro hídrico durante los períodos secos. Por consiguiente, este ambiente hídrico protegido permite la supervivencia y el establecimiento de especies leñosas como tala, coronillo y molle que presentan con sistemas de raíz profunda. Se concluye que solo a través de esta fijación forestal asistida se puede asegurar la consolidación permanente del sustrato, transformando los médanos activos en dunas estabilizadas, lo cual es imposible de lograr con únicamente especies herbáceas.

Finalmente, La tercera fase, enfocada en el mantenimiento adaptativo y seguimiento, se concluye como la columna vertebral de la sostenibilidad del proyecto y del ecosistema dunar en su conjunto. Se establece que la intervención no puede ser estática, sino que requiere de un sistema de gestión dinámico que responda a las condiciones ambientales cambiantes.

El monitoreo continuo permite identificar fallas estructurales y determinar la tasa de supervivencia de la flora. Se concluye que el mecanismo de replantes masivos es la acción clave de la adaptabilidad: si la mortalidad es alta, la intervención se autocorrigue, asegurando que la cubierta vegetal se restablezca y consolide la duna. De no ejecutarse este protocolo, se corre el riesgo de perder la inversión realizada en las Fases 1 y 2, volviendo al estado de movilidad desenfrenado. Por lo tanto, la sostenibilidad del proyecto depende directamente de la asignación presupuestaria y del compromiso de largo plazo con estas tareas de monitoreo y corrección. La implementación exitosa de este plan requiere un compromiso político y legal que no puede desatenderse. La regulación estricta del uso del suelo, basada en la ley provincial N° 8912 de exclusión vehicular, y la creación de una ordenanza municipal de protección dunar que delimite el área de exclusión, es la base de la gestión.

Deteniendo la causa principal de la degradación de las dunas vivas, podrá la inversión en ingeniería y restauración biológica rendir sus frutos, transformando el alto costo de la enmienda constante en la resiliencia a mediano plazo del valioso ecosistema dunar de la RNDFQ.

BIBLIOGRAFÍA

- Bagnold, R. A. (1941).** La física de la arena arrastrada por el viento y las dunas del desierto. 63-66. Londres: Methuen Chapman & Hall.
- Bertiller, S. M., Becerra, V. L., & Rostagno, C. M. (2005).** La invasión de *Ammophila arenaria* en la costa patagónica y sus efectos ecológicos.
- Celsi, C., & Gagliarducci, E. (2012).** Restauración de dunas costeras mediante especies nativas.
- Cifuentes, M. (1992).** Determinación de la capacidad de carga turística en áreas protegidas. Turrialba, Costa Rica: CATIE.
- Deltares. (2022).** Sand Motor: Construir con la Naturaleza. Recuperado el 20 de noviembre de 2025, Disponible en: <https://www.deltares.nl/en/expertise/projects/sand-motor>
- Guía de Enquinchados. (2018).** Guía de Buenas Prácticas para la Construcción de Enquinchados en la Costa Bonaerense. Ciudad de Buenos Aires.
- Informe Anual Faro Querandí 2017,** Servicio de Hidrografía Naval Argentina.
- Isla, F. I., & Lasta, C. A. (2006).** Erosión Costera en la Provincia de Buenos Aires. Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires: EUDEM.
- Isla, F. I., y otros. (2022).** Las reservas de dunas de Buenos Aires: una actualización ante la reversión del nivel del mar. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 586-599.
- Ley Provincial N° 8912. (1977).** Recuperado el 25 de noviembre de 2025, Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://capbauno.org/wp-content/uploads/2021/10/Texto-Ordenado-Decreto-Ley-8912-.pdf>

López, R. A., & Marcomini, S. C. (2016). Revista latinoamericana de sedimentología y análisis de cuencas, morfodinámica de un campo de dunas costeras en el Cabo San Antonio, Buenos Aires, Argentina, 23 (2), 111-125. En línea.

Disponible

en:

https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/collection/paper/document/paper_16697316_v23_n2_p111_Lopez . Recuperado el 20 de noviembre de 2025.

Marcomini, S. C. (2018). Geomorfología Costera y Gestión de Riesgos. Ciudad de Buenos Aires: EUDEBA.

Medina, R. A., Martínez, A. L., Mormeneo, L., y Richiano, S. M. (2016). Cambios morfosedimentarios causados por la construcción de un espigón en camet norte, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 73(2), 177-189.

Disponible en: https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0004-48222016000200009&lng=es&nrm=iso. Recuperado el 19 de noviembre de 2025.

Pye, K., & Tsoar, H. (2009). Arena Eólica y Dunas de Arena. Berlín: Springer.

Richiano, S. M., Martínez, A. L., y Medina, R. A. (2021). Métodos de teledetección para el monitoreo de dunas costeras.

Zhang, Y. (2019). Recuperado el 18 de noviembre de 2025. Disponible en: <https://es.clickpetroleoegas.com.br/El-desierto-engull%C3%ADa-ciudades--pero-China-reaccion%C3%B3-con-ingenio%3A-millones-de-cuerdas-de-paja-frenaron-las-dunas-y-crearon-un-nuevo-cintur%C3%B3n-verde.-mhbb01/>