

IMPORTANCIA DE LA EROSIÓN EÓLICA EN LOS SISTEMAS DUNARES COSTEROS

ELIZABETH NÚÑEZ

OSCAR LÓPEZ

Resumen:

El presente artículo de indagación tiene por objetivo demostrar el papel que juega la erosión en el transporte y sedimentación de arena, demostrando así la conformación y funcionamiento de dunas como un proceso que depende de muchos factores, como lo son la intensidad del viento, la cantidad de sedimentos que se depositen en una playa por parte del oleaje y cuales de estos son transportables por definición hacia el interior y a mayor distancia. Siendo así, el experimento realizado refleja una parte del sistema costero. En el caso de Chile, de 4.500 km de costa, sólo 5% corresponde a playas y dunas, teniendo estas últimas una superficie de 131.000 hectáreas el total distribuidas en tramos del centro norte al centro sur del país. Frente a las contribuciones que otorgan las dunas se reflejan los efectos de mitigación frente a riesgos naturales, estos van desde disminuir la salinidad de los suelos, protección de lagunas, vegetación y fauna autóctona de estos sitios, hasta el amortiguamiento de

fenómenos como marejadas e impactos de tsunamis. Frente a la actitud que tiene la población se refleja poco entendimiento a la dinámica de las dunas, pues su destrucción y urbanización va al alza, aun teniendo en cuenta los problemas asociados a estos emplazamientos por considerarse suelos de poca estabilidad. Entendiendo entonces los riesgos socioambientales que surgen por su destrucción o urbanización de estos espacios se considera replantearse las legislaciones que propongan con mayor firmeza la protección de las dunas puesto que brindan tanta protección si se mantienen naturalmente, o se convierten en una trampa mortal en caso de densificación.

Palabras clave: erosión eólica, dunas, arena, riesgos socioambientales.

1. Introducción

Según Stralher (1989) se denomina erosión eólica a dos actividades erosivas que lleva a cabo el viento: barrer las partículas sueltas del suelo, arrastrándolas o elevándolas por el aire (deflación) o a la acción de desgaste por el impacto de partículas de arena o polvo que puedan desgastar las rocas y el suelo, (abrasión). En esta investigación se busca establecer la primera opción, determinando cuánta influencia tiene el viento en el transporte de partículas de arena y cómo esta puede determinar el natural funcionamiento de una playa o duna y del ecosistema del cual es parte. Continuando con las referencias de Strahler, (1989) se puede denominar playa al depósito de sedimentos que se

moldea por la acción de olas, estas comprende: arena fina, extensas y suaves pendientes, arena gruesa escarpada, abruptas y alta cresta, es aquí donde comienza la dinámica del ecosistema costero, por su parte, la arena es depositada a tierra firme por la acción de las olas respecto a un cuerpo de agua específico, y estos sedimentos son transportados posteriormente por la acción del viento.

Las playas constituyen parte de un sistema costero, y según Merlotto et al., (2019):

“(…) los ecosistemas costeros constituyen uno de los sistemas más complejos y frágiles, pero también uno de los dinámicos, interdependientes, productivos y diversos del planeta. Debido a ello ofrecen una numerosa cantidad de servicios ecosistémicos de los que las sociedades se benefician. Entre los servicios brindados por el ecosistema costero pueden mencionarse los de abastecimiento (pesca, agricultura), de regulación (climática, morfo-sedimentaria o control de la erosión, de perturbaciones naturales o protección contra tormentas, hídrica) y culturales (actividades recreativas y turismo, identidad cultural, disfrute estético y paisajístico)”.

En esta dinámica intervienen tanto las acciones naturales como las antropogénicas.

Para establecer una relación directa con un sistema costero específico, se examina la conformación de las dunas costeras. Estas estructuras requieren de la acción del viento, cuya intensidad debe ser suficiente para transportar la arena y depositarla en un lugar adecuado hacia el interior. En el caso de las dunas en Chile, su formación natural data del período comprendido entre el Pleistoceno y el Holoceno. Este proceso

fue favorecido por un largo intervalo de tiempo con condiciones climáticas características, incluyendo un periodo seco que propició la deflación, una línea costera orientada favorablemente a los vientos y una topografía adecuada para el establecimiento de las dunas.

En la dinámica de una playa se observan constantes cambios morfológicos. Por ejemplo, el oleaje normal deposita sedimentos de arena, incrementando de manera continua su volumen y altura. En contraste, los oleajes más fuertes pueden arrastrar una gran cantidad de arena hacia el mar, alterando significativamente la morfología de la playa (Avaria, 2015).

Las dunas desempeñan un papel crucial en la gestión de desastres y en la adaptación al cambio climático, ya que actúan como barreras naturales entre la tierra y el mar. Estas estructuras reducen y amortiguan el impacto del oleaje generado por tormentas o tsunamis, disminuyen el riesgo de inundaciones y brindan protección frente a la elevación del nivel del mar (Avaria, 2015). Además, las dunas resguardan ecosistemas como lagunas costeras, estuarios, marismas, humedales y tierras bajas. También desvían el viento hacia sectores deprimidos, impidiendo la contaminación de la capa freática por infiltración de agua salada, lo que favorece el crecimiento de bosques cercanos a la línea de costa.

Desde una perspectiva ecológica, las dunas fomentan el desarrollo de vegetación, lo cual contribuye a la creación de hábitats para diversas especies de fauna distribuidas fragmentariamente. Según su cobertura vegetal, las dunas se clasifican en dos

tipos: dunas estabilizadas, que presentan vegetación, y dunas activas, que carecen de ella. En este contexto, las dunas litorales son fundamentales para mantener el equilibrio sedimentario y dinámico de las playas. Sin embargo, estas estructuras enfrentan múltiples amenazas que comprometen su estabilidad:

“Estos sistemas naturales están sometidos a una fuerte presión de uso urbano, industrial, agrícola, forestal, minero y turístico, por lo que se observa una regresión de los sistemas dunarios en el país. En particular, las causas principales que producen regresión son: la interrupción del aporte de sedimentos terrestres debido a la regulación de los ríos y a la construcción de embalses; la expansión de áridos, y la eliminación del material vegetal de las dunas.” (Falcón y Valdéz, 2012)

La elevación del nivel del mar está asociada con un aumento en la frecuencia e intensidad de las marejadas. En las costas de Chile, este fenómeno ha experimentado un incremento significativo y, según las proyecciones relacionadas con el cambio climático, se espera que continúe en ascenso.

En cuanto a los tsunamis, Chile ha enfrentado aproximadamente diez eventos de este tipo durante los siglos XX y XXI, de los cuales cuatro han causado efectos devastadores, incluyendo una gran cantidad de pérdidas humanas. La extensa línea costera del país, sumada a su ubicación dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, lo convierten en un territorio altamente vulnerable a los tsunamis. Este riesgo afecta directamente a los centros poblados situados en zonas costeras, poniendo en peligro tanto a las comunidades locales como a sus

infraestructuras (Giroud y Rinaldi, 2014).

Entendiendo entonces que las dunas cumplen una función beneficiosa ante todos los peligros que enfrentamos como riesgos naturales presentes en el país, es importante establecer entonces qué tipo de interacción tiene Chile frente a la dinámica natural costera y en específico con las dunas, y si es necesario o no hacer cambios en la ordenanza territorial.

Un ejemplo ilustrativo de la urbanización en dunas costeras es el caso de la ciudad de Iquique, ubicada en el norte de Chile. Parte de su expansión se encuentra en la falda occidental de una duna activa de gran magnitud conocida como cerro Dragón. Esta urbanización presenta múltiples problemas debido a la deflación y la presencia de sedimentos sueltos, los cuales afectan directamente la salud de las personas. Los sedimentos finos se infiltran en los hogares, lo que genera problemas respiratorios en los habitantes.

En términos de infraestructura, la urbanización sobre dunas también genera problemas en el terreno, como asentamientos por humedad y hundimientos por compactación. Estas condiciones provocan fallas en los cimientos y desajustes en las estructuras, tales como el descuadre de puertas y ventanas, comprometiendo la habitabilidad y seguridad de las edificaciones (Ferrando, 2002).

Los suelos dunares en la localidad de Iquique continúan su ciclo natural de expansión, lo que provoca la acumulación de arena en diversas áreas. Esta situación ha obligado a algunos residentes a construir muros de

contención en sus patios traseros para enfrentar la formación de montañas de arena que rodean sus terrenos, generando la sensación de que serán literalmente sepultados.

Además de los problemas previamente mencionados, las dunas presentan una respuesta inadecuada ante eventos sísmicos debido a la inestabilidad de sus suelos de fundación. Durante un sismo, la arena tiende a reacomodarse internamente, generando desplazamientos y asentamientos por gravedad. Este comportamiento quedó evidenciado tras el terremoto de 2014, cuando muchas viviendas sufrieron graves daños en su infraestructura, y algunas quedaron inhabitables.

Ante estos riesgos, se recomienda la realización de estudios integrados geológico-geotécnicos, así como investigaciones detalladas sobre remociones en masa, dado que existen campamentos ubicados en zonas de alto riesgo. Sin embargo, desde 2005, el cerro Dragón fue declarado Santuario de la Naturaleza, lo que prohíbe cualquier tipo de construcción en este sector. Esta medida resulta aún más relevante considerando los graves riesgos naturales que afectan a las viviendas emplazadas en esta área (SERNAGEOMIN, 2014).

Un caso representativo de conflictos relacionados con la organización territorial y la protección ambiental de dunas en Chile es el de las dunas de Concón, ubicado en el litoral central del país. Este caso ha generado amplio debate y controversia, aunque no es el único en su tipo. Concón cuenta con una zona de dunas situada en una extensa terraza marina, de la cual 45

hectáreas fueron declaradas Santuario de la Naturaleza en 1993. Sin embargo, debido a presiones ejercidas por los propietarios, el área protegida fue reducida a tan solo 12 hectáreas en 1994.

En la actualidad, 50 hectáreas de estas dunas son de propiedad privada, y existe interés en desarrollar un proyecto inmobiliario de gran envergadura en este espacio, aprovechando su ubicación estratégica y su inigualable vista al mar (Sánchez, 2018).

No obstante, en Chile, muchas dunas han sido intervenidas por la acción antrópica de diversas maneras. Este fenómeno puede ejemplificarse mediante el análisis de algunos sistemas dunares del litoral central, según los datos recopilados por Castro (1992):

- Urbanización en áreas sensibles a la erosión: Cachagua (duna bordera y antigua), San Sebastian (duna libre), Reñaca (duna antigua), San Antonia (duna antigua).
- Extracción de arena, contaminación por basurales y áreas de desechos industriales: Punta Concón-Reñaca (duna antigua), Ritoque (duna antigua), Loncura (dunas libres), Santo Domingo (duna bordera).
- Tránsito excesivo de vehículos motorizados: Algarrobo (duna libre) y Santo Domingo.
- Campamentos turísticos o campings mal ubicados: Llolleo (duna bordera) y Punta Concón-Reñaca (duna antigua).

En este contexto, se busca analizar el funcionamiento natural de una zona

costera y la formación de dunas mediante un experimento básico que proporcione datos empíricos sobre cómo la erosión eólica transporta la arena y cuánto influye la intensidad del viento en este proceso. El objetivo es demostrar una de las dinámicas fundamentales de este sistema y destacar la importancia de conservar su funcionamiento natural.

El sistema costero debe ser comprendido no solo como un espacio destinado a la recreación y actividades humanas, sino también como un ecosistema complejo que requiere protección. Esto resulta especialmente relevante dado que las actividades humanas tienden a homogeneizar los hábitats, adaptándolos a sus conveniencias y "necesidades", lo que puede comprometer su equilibrio natural.

2. Metodología

Para la realización de este experimento y la redacción del presente artículo científico, se abordará el fenómeno de la erosión eólica, orientando la investigación en torno a las siguientes preguntas: ¿Cómo se distribuye la arena con diferentes grados de humedad frente a una erosión eólica? ¿Cómo influye la velocidad del viento en este proceso?

Con base en estas preguntas, se formularon dos hipótesis principales para guiar la investigación:

- Los granos de arena húmedos permanecerán en el mismo lugar, mientras que únicamente los

granos de arena secos serán transportados.

- La velocidad del viento ejerce una influencia significativa en la transportación de arena.

Para llevar a cabo este experimento, se realizó una recolección de muestras en las orillas del lago Llanquihue. La recolección consistió en tres tipos de arena negra de origen volcánico: arena mojada, arena húmeda y arena seca. Cada tipo de arena se dividió en porciones de 500 gramos para ser expuestas al viento según su grado de humedad. En total, se emplearon 12 muestras: 6 fueron expuestas a una velocidad mínima y las otras 6 a una velocidad máxima.

Para generar las corrientes de viento, se utilizó un secador de pelo con dos configuraciones de velocidad. La velocidad del aire emitido se calculó empleando una bola de plumavit como referencia, ajustando su peso para que coincidiera con el de la arena. Se construyó una pista de dos metros de longitud para medir el tiempo que la bola tardaba en recorrer dicha distancia.

En la configuración de velocidad mínima, la bola recorrió los dos metros en 1,24 segundos. Mediante cálculos matemáticos, se determinó que esta velocidad corresponde a 1,62 metros por segundo. Por otro lado, en la configuración de velocidad máxima, la bola tardó 0,86 segundos en completar el trayecto, lo que equivale a una velocidad de 2,33 metros por segundo. La diferencia entre ambas velocidades fue de 0,71 metros por segundo.

Este procedimiento permitió establecer un control efectivo para evaluar cómo la

velocidad del viento influye en la transportación de arena con diferentes grados de humedad.

Las 12 muestras fueron expuestas durante 1 minuto a ambas velocidades, simulando las condiciones en las que estas normalmente se exponen en las orillas del lago, dentro del contexto que el entorno del experimento permitía. Este se realizó en un área plana y despejada, lo que facilitó la recolección de datos. En primer lugar, se llevó a cabo el experimento y se observó que ambas velocidades tuvieron un alcance máximo de 2,40 metros. Por lo tanto, se dividió este rango en 6 secciones de 40 centímetros cada una, lo que permitió recolectar la arena transportada y sedimentada en cada sección. Posteriormente, se procedió a pesar la arena para determinar qué porcentaje había sido transportado y sedimentado.

Con los datos obtenidos, se crearon tablas y gráficos que representaron visualmente la información, facilitando su comprensión.

El objetivo de este experimento y la redacción de este artículo es resaltar la importancia de la protección de las dunas en Chile, entendidas como elementos clave en la formación de las zonas costeras. Para ello, se revisaron aspectos relacionados con la erosión eólica, la sedimentación de arena y la distribución de esta en las orillas de playas y lagos.

3. Resultados

Para iniciar la presentación de los resultados del experimento realizado, es

importante señalar que todas las muestras fueron expuestas a ambas velocidades durante un minuto bajo condiciones iguales. Además, es necesario recalcar algunos hechos relevantes ocurridos durante la aplicación de la metodología.

En primer lugar, la arena con mayor concentración de humedad (mojada) no presentó resultados significativos: no se transportó ni se sedimentó en ninguna de las dos velocidades. Por lo tanto, no es posible representar resultados para esta muestra, ya que no se observaron cambios.

En segundo lugar, la arena con humedad semi mojada mostró un comportamiento similar al de la muestra más húmeda. En la velocidad mínima, no se registró ningún tipo de transporte ni sedimentación. Sin embargo, al exponerla a la velocidad máxima, y tras una primera exposición de 1 minuto sin resultados, se decidió exponerla durante 3 minutos más. A pesar de ello, solo se logró transportar menos del 1% de la arena, desplazándose aproximadamente 0,6 cm, lo que no constituye un resultado significativo.

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos con la arena de menor concentración de humedad (seca).

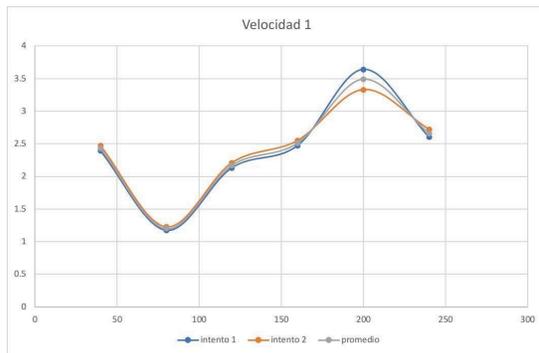
Tabla 1. Distancia de la arena (gr) con una velocidad máxima de 1,62 metros por segundo.

Distancia (cm)	Intento 1 (gr)	Intento 2 (gr)	Promedio
40	2,39	2,47	2,43
80	1,17	1,23	1,2
1,20	2,13	2,21	2,17

1,60	2,47	2,55	2,51
2,00	3,64	3,33	3,49
2,40	2,60	2,72	2,66

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Representación gráfica de la Tabla 1.



Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados presentados en la tabla y el gráfico elaborados a partir de los datos obtenidos, se observa que, de un total de 500 gramos para cada muestra, en promedio se movieron 13,28 gramos de arena. En este caso, la distancia máxima de recorrido fue de 2,40 metros, y el viento logró mover un 2,6% de la arena a lo largo de esta distancia.

Adicionalmente, la tabla muestra que la mayor sedimentación de arena se produjo en la distancia de dos metros. Este fenómeno puede explicarse por la tendencia de los materiales a separarse según su tamaño: el material más grueso se deposita primero, mientras que las partículas más finas se sedimentan a mayor distancia. En el experimento, en un rango de 40 cm, el viento trasladó en promedio 2,43 gramos de arena, mientras que en un rango de 80 cm, la cantidad fue de 1,2 gramos. Esto sugiere que el material

grueso se concentra en los primeros 40 cm, mientras que las partículas más finas se distribuyen desde los 80 cm hasta los 2,40 metros.

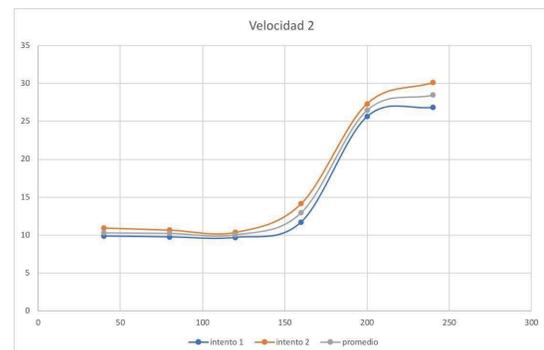
Asimismo, la distribución de la arena fue lineal a lo largo de la distancia, lo que aporta información valiosa sobre la dinámica de transporte eólico. Este patrón de comportamiento podría llevar a diversas conclusiones sobre la influencia del viento en la erosión y sedimentación de arenas en función de su granulometría y la distancia recorrida.

Tabla 2. Distancia de la arena (gr) con una velocidad máxima de 2,33 metros por segundo.

Distancia (cm)	Intento 1 (gr)	Intento 2 (gr)	Promedio
40	9,85	10,94	10,27
80	9,74	10,68	10,21
1,20	9,67	10,37	10,02
1,60	11,70	14,17	12,94
2,00	25,63	27,33	26,48
2,40	26,86	30,12	28,49

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Representación gráfica de la Tabla 2.



Fuente: Elaboración propia.

Para esta segunda velocidad, al igual que en la primera, se determinó que la distancia máxima recorrida fue de 2,40

metros. Dentro del total de 500 gramos por muestra, en promedio se transportaron 98,59 gramos de arena, lo que representa un 19,7% de arena movilizada, es decir, un 17,1% más que con la velocidad mínima. Es relevante destacar que, en este caso, la forma en que la arena se transportaba era ovalada, dejando un espacio sin arena en el centro, lo que sugiere que, a mayor velocidad, la duna formada en el suelo era más profunda.

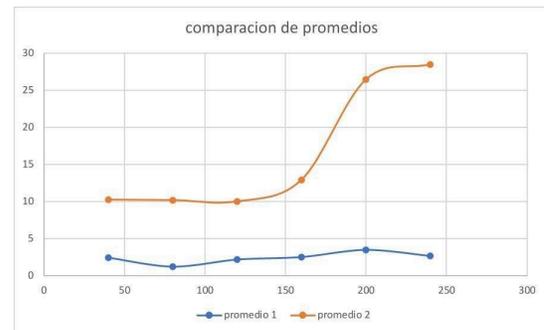
En comparación con la velocidad mínima, se observaron diferencias notables en el patrón de transporte de la arena. Según los datos de la tabla, desde los 40 cm hasta los 1,20 metros, el transporte de arena disminuía progresivamente, para luego aumentar nuevamente a los 1,60 metros y volver a decrecer hasta los 2,40 metros. Este comportamiento puede asociarse a la forma ovalada en la que se desplazaba la arena. En este sentido, se puede concluir que, al igual que en la velocidad mínima, el material grueso se encontraba en el rango de los 40 cm, pero, debido al aumento de la velocidad, también se observó material grueso en el rango de los 1,60 metros.

Tabla 3. Promedios totales de ambas velocidades.

Distancia (cm)	Promedio 1,62 m/s (gr)	Promedio 2,33 m/s (gr)
40	2,43	10,27
80	1,03	10,21
1,20	1,17	10,02
1,60	2,51	12,94
2,00	3,49	26,48
2,40	2,66	28,49

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Representación gráfica de la Tabla 3.



Fuente: Elaboración propia.

Es evidente que, a partir de los datos presentados en la tabla y el gráfico, a mayor velocidad se observa un mayor transporte de material, en este caso, arena. Además, al analizar las formas en que se transportó la arena en ambos casos (línea recta para la velocidad mínima y forma ovalada para la velocidad máxima) se puede deducir que, a mayor velocidad, la duna formada será más grande. Como conclusión, se puede afirmar que el transporte a baja velocidad tenderá a rellenar las dunas formadas por el transporte a mayor velocidad.

Sumado a lo mencionado anteriormente, se observó que, en general, el material más grueso se encontraba al inicio del recorrido, mientras que, a medida que se avanzaba, se encontraba material más fino. Esto permite afirmar que los materiales se distribuyen según su peso y, en este caso, también según su humedad. Al observar la orilla, desde la carretera hacia el lago, se encontró que el material más fino y seco estaba al inicio, ya que había estado expuesto al sol y al viento por un tiempo más prolongado. En segundo lugar, se localizó material más grueso y húmedo, y, finalmente, cerca del lago, el material era completamente mojado y grueso.

En el lugar visitado, se pudo observar que la cercanía con los volcanes favorecía la presencia de piedra ígnea en la última zona, mientras que en la segunda distribución había arena negra (proveniente del volcán) y material biológico. En la primera distribución, en cambio, se encontró únicamente arena seca.

4. Discusión

Este experimento demostró una parte del ciclo de la conformación costera, específicamente en lo que respecta a la formación de dunas a través de la erosión eólica. Sin embargo, para obtener una visión más completa del proceso, se recomienda incluir el análisis de la depositación de sedimentos por el oleaje y estudiar cómo el viento influye en este proceso, constituyendo así el ciclo completo.

En cuanto a los resultados del experimento, se verificó que el viento intenso, es decir, el de mayor velocidad, confirma lo que se denomina "competencia de los vientos" en el desarrollo y crecimiento de las dunas. Además, se observó que la altura a la que se propaga el viento también es un factor determinante, como se menciona en los estudios de Borgel (1963). La altura determinada en el experimento fue correcta, lo que sugiere que el procedimiento fue riguroso y bien estructurado, aunque de una manera sencilla, y que los resultados concordaron con la hipótesis inicial.

La hipótesis planteaba que los granos de arena mojados no se moverían y permanecerían en su lugar, mientras que los granos de arena seca se desplazarían

y se dispersarían de manera distinta: en línea recta para los vientos de baja velocidad y de forma ovalada para los vientos de alta velocidad. Los resultados mostraron que los sedimentos más gruesos y mojados quedaban en los tramos iniciales, tal como ocurre en las playas, donde el oleaje deposita los primeros sedimentos, generalmente más gruesos y pesados, hacia las orillas del lago. En cambio, la arena más fina se depositó más lejos de los tramos iniciales, en los últimos segmentos, lo que es consistente con la distribución de materiales en las playas, donde la arena fina queda más alejada de la orilla.

La variabilidad en la velocidad del viento también es un factor relevante, así como las condiciones climáticas. Un clima más cálido y seco incrementa la capacidad de transporte de la arena, ya que esta se seca y se vuelve más fácilmente movilizable, lo que incrementa la deflación si hay vientos favorables. En conclusión, los resultados del experimento sugieren que la conformación de una playa y la dinámica de las dunas están determinadas por el volumen y tipo de material, la humedad, el tiempo de exposición al viento, la intensidad y velocidad del viento, el clima y la deposición de material por acción de las olas, todos los cuales interactúan para crear el ciclo natural de las dunas.

El experimento realizado siguió una metodología bastante rudimentaria, por lo que, aunque los resultados obtenidos fueron concluyentes, es importante señalar que podrían variar al contar con mejores implementos e instrumentos. Además, si se utilizara otro tipo de arena, como arena de diferente granulometría o con características físicas distintas, los

resultados podrían diferir. Asimismo, el tamaño de las muestras y el tiempo de exposición al viento podrían influir en los resultados obtenidos, lo que sugiere que los experimentos realizados con muestras a mayor escala o con exposiciones más prolongadas podrían arrojar información adicional.

Otro factor relevante es la distancia e intensidad con la que la arena es expuesta al viento. Una medición más precisa y variada de estos parámetros podría permitir obtener datos más representativos. Además, el sitio de realización del experimento, al ser plano, no simula completamente las condiciones naturales de una duna. Por ello, sería recomendable realizar el experimento en un área escarpada o agregar vegetación, lo que podría ofrecer una mejor representación de cómo se comporta la arena en un entorno natural, en especial en dunas estabilizadas.

Para obtener una visión más completa de la dinámica del transporte de arena, sería interesante experimentar con vientos provenientes de distintas direcciones. La orientación del viento puede afectar significativamente la forma en que los granos de arena se desplazan y, por lo tanto, influir en la morfología de las dunas formadas. Además, se podría realizar el experimento con la presencia de objetos que simulen construcciones o áreas pobladas, lo que podría crear obstáculos en el proceso de transporte y depositación de arena. Este tipo de prueba permitiría entender cómo la arena continúa dispersándose a pesar de la intervención antrópica, proporcionando información valiosa sobre la resiliencia de las dunas y su capacidad de adaptación ante cambios en el entorno.

Se observó que, a la máxima velocidad y con la arena más seca, el transporte y depósito de la arena adoptó una forma ovalada, similar a las dunas parabólicas típicas de la costa, formadas por vientos frontales. En estas dunas, la arena se deposita en forma de "U". Por otro lado, en la velocidad más lenta, el transporte de la arena formó una estructura más parecida a las dunas transversales, las cuales se generan por vientos uniformes y perpendiculares a su dirección (Instituto Geográfico UC). Así, se puede concluir que la velocidad máxima favorece la expansión de la duna, acumulando mayor cantidad de arena. Por lo tanto, en áreas donde predomine un viento de alta intensidad, la acumulación de arena será continua, lo que llevará a una expansión constante de las dunas.

Este fenómeno puede asociarse con la situación de la ciudad de Iquique, ubicada en el norte de Chile, donde la expansión urbana ha llegado a zonas de dunas en altura. En este contexto, los habitantes de estas áreas deben enfrentar la constante acumulación de arena, tanto en sus terrenos como por la inhalación de partículas finas transportadas por el viento.

En cuanto a la protección de las dunas, actualmente no existe en Chile un decreto de ley que proteja integralmente estas zonas, ni siquiera aquellas que han sido declaradas santuarios de la naturaleza. Además, dentro de las áreas de dunas, algunas hectáreas han cambiado de disposición, pasando de ser santuarios naturales a ser entregadas a manos privadas, como en el caso de Concón. A esto se suma la constante insistencia de estos privados por iniciar o continuar proyectos de construcción. La

fiscalización de estos procesos recae en los planes reguladores de cada comuna, lo que puede generar conflictos de interés que interfieren con una correcta regulación. En este sentido, la consulta ciudadana desempeña un papel fundamental como freno a los proyectos que amenacen las zonas naturales.

Sumado a esta falta de regulación, existe una prohibición por parte del Ministerio del Medio Ambiente de ingresar con vehículos a las playas o zonas de dunas, como es el caso de Ritoque. Sin embargo, persiste una falta de conocimiento y conciencia ciudadana sobre la importancia de respetar estas restricciones, lo que pone en peligro la conservación de este patrimonio cultural y natural.

Las dunas, al ser catalogadas como santuarios de la naturaleza, adquieren un valor importante no solo por su función ecológica, sino también por su potencial como objetos de estudio científico. Su formación natural y su ubicación en la costa las convierten en elementos clave para investigaciones geológicas, paleontológicas y botánicas. Además, su rol en la protección frente a desastres naturales, como tsunamis y marejadas, es fundamental, ya que ayudan a mantener la línea de costa estable. En este sentido, las dunas actúan como barreras naturales que mitigan los efectos de estos fenómenos y contribuyen a la seguridad de las comunidades cercanas.

Desde una perspectiva geológica, las dunas se han formado a lo largo del tiempo con acumulaciones de arena que datan del Pleistoceno. Estas formaciones generan un subsuelo inestable, lo que hace que su habitabilidad sea

problemática. La filtración de agua en el subsuelo de las dunas genera compactación, y los sismos pueden alterar la disposición de las arenas internas, lo que pone en riesgo las estructuras construidas en estas áreas. Este tipo de suelos son susceptibles a desestabilizarse, lo que puede generar fallos en los cimientos de las construcciones y hacer que estas no sean adecuadas para ser habitadas a largo plazo.

Además, las construcciones en estas zonas pueden resultar económicamente inviables debido a los altos costos de reconstrucción y las soluciones momentáneas que se deben implementar para mitigar los riesgos. Esto expone aún más a las personas que habitan en estas áreas a los peligros naturales y pone de manifiesto la importancia de considerar estos factores al momento de planificar el uso del suelo en zonas cercanas a las dunas.

5. Reflexiones

A través de la realización de este experimento, pudimos observar de manera directa cómo un proceso natural tan complejo como la erosión eólica puede ser simulado de forma sencilla. Este enfoque práctico nos permitió obtener una base empírica sólida para nuestra investigación, lo que en conjunto con el marco teórico proporcionó una comprensión más profunda sobre la formación de las dunas y su relevancia en el ciclo natural costero.

El proceso de deflación, que fue el enfoque central de nuestra investigación, se comprende mejor al considerar los múltiples factores que lo determinan. La

observación directa nos permitió identificar cómo el viento afecta la distribución y el transporte de la arena, lo que en última instancia da forma a las dunas. Además, al correlacionar los resultados del experimento con el marco teórico, pudimos comprobar que este fenómeno no es aislado, sino que está condicionado por factores como la velocidad del viento, la humedad de la arena y la configuración del terreno. Este tipo de experimentos no sólo refuerza la comprensión científica de los procesos naturales, sino que también subraya la importancia de las dunas como elementos claves en la dinámica costera, ayudando a conservar la estabilidad del litoral y a proteger las áreas circundantes.

Aptitudinalmente, el equipo de trabajo demostró una gran cohesión, ya que ambos miembros contribuyeron de manera activa y equilibrada al desarrollo del experimento y la investigación. Adoptaron una actitud colaborativa, lo que permitió mantener el orden y la dirección del objetivo principal de la investigación.

Desde el punto de vista conceptual, se profundizó en diversos términos geográficos, como los diferentes tipos de dunas, que varían según su forma y conformación en función de las condiciones climáticas y los lugares donde se encuentran.

En cuanto a las reflexiones finales, se destaca que en Chile la densificación de zonas de riesgo es un fenómeno recurrente que afecta diversas realidades geográficas. En este caso, el riesgo observado fue el relacionado con las dunas, pero también existen otros riesgos asociados a las inundaciones por

proximidad a cuerpos de agua, el peligro de derrumbes debido a suelos inestables durante episodios meteorológicos, los deslizamientos de tierra (deslaves) y el riesgo de lahares por la cercanía a volcanes, entre otros.

Las dunas, como se mencionó anteriormente, ofrecen importantes beneficios, pero se destaca la falta de consideración del Estado chileno sobre su papel en los planes de mitigación frente a desastres naturales, como los tsunamis. Se considera incomprensible que un país sísmico y con alta probabilidad de tsunamis a lo largo de su costa, como ha quedado demostrado en episodios anteriores, no contemple a las dunas, junto con la vegetación, como una barrera natural efectiva frente a estos desastres. Además, las dunas tienen un efecto positivo frente al cambio climático, ya que pueden ayudar a mitigar el aumento del nivel del mar y la intensificación de fenómenos como las marejadas.

Un estudio de vulnerabilidad de playas, realizado por el Ministerio del Medio Ambiente (2019), predice que 35 playas, desde Antofagasta hasta el Biobío, experimentarán cambios en su línea litoral debido a la erosión, aunque aún no se comprenden completamente las causas de esta erosión generalizada. Se estima que las playas, desde Arica hasta el canal de Chacao, podrían retroceder entre 3 y 23 metros debido a cambios en los oleajes para el año 2045. Esto podría generar alteraciones en los puertos y aumentar el riesgo de cierre de varias caletas de la costa. Este estudio resalta que el oleaje será determinante en la transformación costera de Chile, lo que hace urgente mantener en buen estado las zonas dunares. Dado que el impacto

del cambio climático es global y su magnitud aún no es completamente comprendida, es crucial tomar medidas prontas y eficaces para mitigar este impacto, utilizando las dunas costeras como barreras naturales. También se recomienda incluir la forestación de vegetación o bosques, lo que fortalecería aún más la protección natural frente a desastres.

Nos llama la atención la cantidad de población que habita en áreas de dunas, como en el caso del litoral central, y más aún en ciudades como Iquique, donde la población sigue expandiéndose hacia los cerros dunares. En muchos casos, estas áreas albergan viviendas sociales o campamentos que han presentado problemas significativos en su infraestructura, convivencia con grandes masas de arena e inestabilidad del suelo. Esto nos lleva a la conclusión de que estos terrenos claramente no son aptos para la urbanización, lo que subraya la necesidad de rediseñar y revisar la planificación urbana, considerando tanto las posibilidades como los riesgos inherentes a los terrenos donde se emplaza la expansión urbana.

Es importante destacar que los movimientos socioambientales han dado mayor visibilidad a los conflictos que surgen en torno a las dunas, y hemos observado que estos movimientos han jugado un papel clave en la lucha por la conservación y protección de estos ecosistemas naturales. En Chile, la legislación relacionada con la protección de las dunas no es clara ni determinante, y en muchas ocasiones se priorizan los intereses habitacionales, ya sea para personas vulnerables que enfrentan la escasez de terrenos aptos o para la clase acomodada que busca

propiedades con vistas privilegiadas.

En este contexto, resalta el movimiento Duna Viva, una organización autoconvocada que lucha por la protección del borde costero de Viña del Mar y Concón. Este movimiento ha expuesto casos emblemáticos como el del hotel Punta Piqueros, cuya construcción implicaba la destrucción de zonas dunares, y que además presentaba riesgos relacionados con incendios, terremotos y tsunamis, convirtiéndolo en lo que se denomina un “ataúd”. También se destaca el caso de la constructora Reconsa, que destruyó un campo dunario en Concón. A través de estas denuncias, Duna Viva logró organizar a la ciudadanía y presionar a las autoridades para que cumplieran con su rol de fiscalización y planificación, buscando reducir la impunidad con la que operan algunas inmobiliarias.

Sin embargo, hasta el presente año, continúan autorizándose proyectos inmobiliarios que afectan a las dunas, como el caso del proyecto de urbanización y loteo Costa de Montemar VI etapa, que se encuentra a solo 69 metros del santuario de la naturaleza de Concón. Este proyecto ha logrado que se reabra el estudio de impacto ambiental en la zona de Reñaca-Concón, lo que podría llevar a una urbanización a gran escala en el sector (El Mostrador, 2022).

En el ámbito investigativo, las dunas chilenas han captado la atención de investigadores internacionales debido a sus particularidades. Sin embargo, resulta preocupante que el Estado chileno no haya logrado generar una conciencia amplia ni haya promulgado leyes contundentes para asegurar la

protección y conservación de estas zonas dunares.

6. Referencias

- Avaria, C. C. (2015). Geografía de las dunas costeras de Chile: Instrumentos y pautas para su manejo integrado. Ediciones UC.
- Börgel, R. (2015). Las dunas litorales en Chile; teoría y aplicación.
- Castro, C. (1992). Alteración antrópica sobre las dunas chilenas y su estado de conservación. *Bosque*, 13(1), 53-58.
- El Mostrador, (2022)SEA tramita permiso ambiental que permitirá construcciones en las dunas de Concón. <https://www.elmostrador.cl/dia/2022/01/20/se-a-tramita-permiso-ambiental-que-permitira-construcciones-en-las-dunas-de-concon/>
- Falcón, M. F., & Valdés, A. (2012) Antecedentes Geológicos y Geomorfológicos del Campo Dunar, Punta de Concón, Comuna de Concón, Región de Valparaíso.
- Ferrando, F. (2002). La Ciudad sin Urbanismo: instalación residencial junto a secciones andinas inestables, dunas activas, bancos de arena y rodados fluviales. *Revista de Urbanismo*, (5).
- Herrera, L. G., & Villegas, A. R. (2014). Diseño Urbano y Gestión de Riesgo. Medidas de Mitigación y Prevención para el caso de Tsunamis. *Provincia*, (32), 43-70.
- Instituto Geográfico Universidad Católica, http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/geomorfologia/html/5_2_3.html
- Merlotto, A., Verón, & Bértola, G. (2019). Servicios ecosistémicos de regulación en playas del partido de General Alvarado, Buenos Aires, Argentina. *Revista de geografía Norte Grande*, (73), (pp.113-131) <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022019000200113>
- Ministerio de Medio Ambiente (2019) Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/2019-10-22-Informe-V02-CCCostas-Exposicio%CC%81n-Rev1.pdf>
- Sanchez Gonzalez, M. (2018). Implicancias de la expansión inmobiliaria en la estabilidad dunar. V región de Valparaíso, Chile. Area de estudio: campo dunar de Concón (Doctoral dissertation).
- SERNAGEOMIN, (2014) Efectos Geológicos de los Sismos del 1 y 2 de abril de 2014: Observación de daños en casas ubicadas en los sectores altos del mar, Matilla 2, Las Dunas 1 y población Carol Urzúa (ZOFRI), Comuna de Iquique.
- Stahler, A. & Stahler, A. (1989) *Geografía Física*. (pp.348)